جامعة أم القرى
UMM AL-QURA UNIVERSITY
معهد خادم الحرمين الشريفين
لأبحاث الحج والعمرة

السجل العلمي

١٦-١٧ ربيع الثاني ١٤٤٧هـ الموافق ٨- ٩ أكتوبر ٢٠٢٥م

الملتقى العلمي الخامس والعشرون
لأبحاث الحجّ والعمرة والزّيارة

الابتكار والاستدامة في خدمة ضيوف الرحمن


بسم الله الرحمن الرحيم

تقديـــم

برعاية كريمة من خادم الحرمين الشريفين الملك سلمان بن عبدالعزيز آل سعود - حفظه الله - نُظِّم الملتقى العلمي الخامس والعشرون لأبحاث الحج والعمرة والزيارة، الذي يُقيمه معهد خادم الحرمين الشريفين لأبحاث الحج والعمرة بجامعة أم القرى، تحت شعار: «الابتكار والاستدامة في خدمة ضيوف الرحمن»، وذلك في رحاب المدينة المنورة، في إطار انعقاده السنوي الذي يتناوب بين مكة المكرمة والمدينة المنورة.

يُعدّ هذا الملتقى مناسبة علمية مرموقة تجمع المختصين والباحثين والمسؤولين والعاملين في مجالات الحج والعمرة والزيارة، لاستعراض خلاصة أبحاثهم ودراساتهم ومقترحاتهم التطويرية، وتبادل الخبرات والتجارب، واستعراض أحدث الممارسات والتقنيات العلمية العالمية، بما يسهم في الارتقاء المستمر بمنظومة الخدمات المقدمة لضيوف الرحمن، تحقيقًا لتوجيهات القيادة الرشيدة - أيدها الله - في تسخير البحث العلمي والمعرفة لخدمة الحرمين الشريفين وزائريهما. ويهدف الملتقى إلى استقطاب الباحثين المتخصصين من الجامعات والمعاهد البحثية في المملكة، إلى جانب العاملين في الأجهزة الحكومية والقطاعين الخاص وغير الربحي، لتقديم أوراقهم العلمية الأصيلة ضمن محاور الملتقى لهذا العام 1447هـ، والتي شملت ما يأتي:

- البنية التحتية الذكية منخفضة الانبعاثات.
- إدارة البصمة الكربونية وتحقيق الاستدامة البيئية (الحج الأخضر).
- الابتكار في تهيئة البيئات المناخية للمشاعر المقدسة.
- إدارة سلوك الحشود وتحليل ديناميكيات الحركة.
- الرعاية الصحية الرقمية والحلول الابتكارية التفاعلية.

وقد تلقت اللجنة العلمية للملتقى (164) ملخصاً بحثياً مقدماً من أكثر من (50) جهة أكاديمية وحكومية وخاصة وغير ربحية، جرى تحكيمها من قِبل نخبة من الخبراء والمتخصصين وفق المعايير العلمية المعتمدة، حيث تم اختيار (67) موضوعاً علمياً ، من ضمنها (28) ورقة بحثية أصيلة أدرجت ضمن هذا السجل العلمي، بينما نُشرت بقية المشاركات في المنصة الإلكترونية للملتقى ضمن الملصقات العلمية الخاصة بأوراق العمل.

وبهذه المناسبة، تتقدم اللجنة العلمية للملتقى بجزيل الشكر والتقدير للباحثين الذين أسهموا في إثراء الملتقى بأعمالهم العلمية المتميزة، وللمحكمين والخبراء من الكليات والمعهد الذين اضطلعوا بمسؤولية تقييم وتحكيم الأوراق البحثية، وأسهموا في رفع مستوى المخرجات العلمية. كما تعبر اللجنة عن خالص الامتنان لكل من قدم الدعم العلمي والمادي والمعنوي لإنجاح هذا الحدث العلمي، وفي مقدمتهم معالي وزير التعليم، وسعادة رئيس جامعة أم القرى، وشركاء النجاح من الجهات الحكومية والخاصة والغير ربحية ومنسوبي معهد خادم الحرمين الشريفين لأبحاث الحج والعمرة.

اللجنـــة العلميـــة للملتقـــى العلمـــي الخامـس

والعشريـــن لأبحاث الحج والعمرة والزيارة

اللجنة الرئيسية للملتقى العلمي الخامس والعشرين لأبحاث الحج والعمرة والزيارة

رئيس اللجنة: د. خالد بن عبد الرحمن الغامـــــدي

أعضاء اللجنة:

د. عبد الله بن عبد الحميد باقاســـي

د. علي بن محسـن الشـــــــــهري

أ.د. خالد بن ســـــليم الحـــــــربي

أ.د. صبحي بن سعيد الحـــــــــارثي

أ.د. بسام بن حسيـــــن مشـــــــاط

د. إبراهيم بن عـــــلي الخـــــالدي

د. أحمد بن محـــمد كـــــــــابلي

د. عمار بن عبد الباسط الصـــــــائغ

أ.د. فتحي بن فـــــــوزي شعـــبان

د. وليد السيـد أبو السعود خمـيس

أ.نايف بن محـــــمد بـــــــشرف

أ.رذاذ بنت حسيــن قـــــــــباني

قائمة المحتويات

محور ادارة سلـوك الحشـود وتحليـل ديناميكيـات الحركـة 08

سلوكيات الحجاج والمعتمرين عوامل تكونها واستراتيجات إدارتها 09

نحو تحسين الوصول إلى الرعاية الصحية للحجاج: توصيف سلوكيات طلب الرعاية الصحية واستخدام الموارد في المدينة المنورة 17

نمذجة ومحاكاة ديناميكيات الحشود أثناء موسم الحج في مكة المكرمة: إطار تحليلي متقدم لتحسين إدارة الحركة وتقليل المخاطر 23

بناء مقياس سلوك الحشود في المشاعر المقدسة: دراسة كمية بأثر رجعي على عينة من حجاج ومعتمري موسم ١٤٤٦هـ 31

إدارة الكفاءات واستدامة الأداء القيادي: دراسة تطبيقية على شركات مقدمي الخدمة في موسم الحج 40

الرصد اللحظي عن السلوكيات غير الطبيعية أثناء الحشود في موسم الحج 53

إطار متكامل للذكاء الاصطناعي متعدد النماذج لإدارة الحشود في المشاعر المقدسة 64

محور الرعايـة الصحيـة الرقميـة والحلول التكنولوجيـة التفاعليـة 73

تعزيز الرعاية الصحية في الحشود: نموذج جديد للرعاية الصحية عن بُعد في الحج 74

أنظمة الفرز الأولي للشكاوى العضلية الهيكلية في التجمعات المكتظة: مراجعة أدبية وإطار مقترح لتطبيقه في الحج 82

أثر أدوات التحول الرقمي والمشاركة المجتمعية على الوعي الغذائي وخدمات الغذاء في مرافق الرعاية الصحية خلال موسم الحج 90

تحليل عوامل الخطر المسببة للإجهاد الحراري على طرق المشاة الرئيسية بالمشاعر المقدسة وكيفية الحد من مخاطرها 97

محور البنية التحتية الذكية منخفضة الانبعاثات 107

ارتفاع درجات الحرارة في المدن الكبرى وعلاقتها بالأنشطة البشرية: دراسة حالة في مدينة مكة المكرمة 108

محور التحـــول نحـــو الحـــــج الأخضـــر (Green Pilgrimage) 117

نظام مبتكر لتخزين البرودة الحرارية العميقة ومياه جليدية لحفظ الأضاحي نحو حج مستدام وأخضر 118

إطار عمل تحفيزي باستخدام تقنية البلوك تشين لتعزيز الممارسات البيئية المستدامة في مدن الحج الذكية 129

الاسترداد المستدام للمواد والطاقة من النفايات البلدية في مكة المكرمة، المملكة العربية السعودية 137

نموذج مبتكر لجمع النفايات في موسم الحج: توظيف الذكاء الاصطناعي لدعم الاقتصاد الدائري في ضوء الخبرات الدولية 145

الأداء الوظيفي لأغطية الرأس للمرأة المحرمة باستخدام منسوجات مستدامة 155

مكثفات فائقة مستدامة من مخلفات نواة التمر لخدمة المشاعر المقدسة 167

محور إدارة البصمـــة الكربونيـــة وتحقيـــق الاستـدامـــة البـيـئـيـة 175

التقنيات التفاعلية في إدارة إسكان الحجاج: نحو بنية تشغيلية ذكية ومرنة 176

تقييم البصمة الكربونية وتطوير استراتيجيات التخفيف في المشاعر المقدسة من أجل التنمية المستدامة 186

محور الابتكـار في تهيئـة البيئـة المناخيـة للمشاعـر المقدسـة 197

تطوير طلاء طارد للحرارة باستخدام مواد ذكية لتطبيقات التبريد السلبي 198

نظام مؤتمت ذكي متكامل مع الذكاء الاصطناعي لحماية المسطحات الخضراء في المشاعر المقدسة 205

الاتجاهات والظواهر المناخية التاريخية في مكة المكرمة والمدينة المنورة: الآثار المترتبة على راحة الحجاج 215

تحليل وتقييم المخاطر الجيوبيئية في منطقة جبل أحد بالمدينة المنورة 223

حول إدارة مستدامة للنفايات في المشاعر المقدسة: تحويل النفايات إلى طاقة في خدمة ضيوف الرحمن 234



محـــور

إدارة سلـوك الحشـود وتحليـل ديناميكيـات الحركـة

سلوكيات الحجاج والمعتمرين عوامل تكونها واستراتيجات إدارتها

خالد بن سليم الحربي - قسم الخدمة الاجتماعية، كلية العلوم الاجتماعية، جامعة أم القرى

Pilgrims and Umrah pilgrims behaviors: Factors of formation and management strategies

Khaled Salim Al-Harbi - Department of Social Service, College of Social Sciences, Umm Al-Qura University
*Corresponding author: E-mail (kssharbi@uqu.edu.sa)

الملخص

تهدف هذه الورقة للتعرف على أبرز العوامل الاجتماعية والثقافية والنفسية والبيئية المؤدية لظهور عدد من السلوكيات من قبل الحجاج والمعتمرين في موسمي الحج والعمرة والتي تسهم في بروز مشكلة الحشود وتنامي حجمها، وفي ذات السياق تحاول هذه الورقة الكشف من الطرق والاستراتيجيات العلمية والتطبيقية التي تساعد الجهات المعنية في التعامل مع تلك الحشود وإدارتها. ولتحقيق هذه الأهداف فقد تم الاعتماد بشكل رئيس على مراجعة علمية دقيقة للأدبيات والنظريات العلمية المفسرة لسلوكيات الحشود وإدارتها. وخلصت الورقة لعدد من النتائج أبرزها أن هناك عوامل اجتماعية وثقافية مرتبطة بالمجتمعات التي قدم منها الحجاج والمعتمرين تدفع بهم للانخراط في الحشود في داخل الحرم المكي وفي المشاعر المقدسة، كما أن هناك عوامل نفسية واجتماعية في ضل حراك جماعات الحجيج تعد مثيراً لحدوث استجابات متعددة لتنامي حجم الحشد وتغير شكله وسلوكياته، كما أن البيئة المكانية والإيكولوجية وحالة الطقس لها جوانب مؤثرة في سلوكيات الحشد.

كما توصلت الورقة إلى أن أبرز إستراتيجيات إدارة سلوكيات الحجيج الحاشدة يجب أن تنطلق من منظور نفسي اجتماعي يركز على فهم العوامل النفسية والاجتماعية والثقافية التي أسهمت في بروز تلك السلوكيات ووضع خطط علمية تكاملية نفسية اجتماعية، أدرية وأمنية تمكن من إدارة تلك الحشود بفعالية عالية.

الكلمات الدالة: سلوكيات الحجاج - إدارة الحشود - العوامل النفسية والاجتماعية.

Abstract

This article aims to identify the most prominent social, cultural, psychological and environmental factors that lead to the emergence of a number of behaviors by pilgrims and Umrah pilgrims during the Hajj and Umrah seasons, which contribute to the emergence and growth of crowds, and in the same context, this paper tries to determine scientific and applied methods and strategies that help the concerned authorities in dealing with and managing these crowds. To achieve these goals, the paper relied mainly on a thorough scientific review of the literature and scientific theories explaining crowd behavior and management. The article concluded with a number of findings, most notably that there are social and cultural factors associated with the societies from which pilgrims and Umrah pilgrims come that push them to engage in crowds inside the Makkah Mosque and in the holy sites, and that there are psychological and social factors in the movement of pilgrim groups that trigger multiple responses to the growth of the crowd size and change its shape and behaviors, and that the spatial and ecological environment and weather conditions have influential aspects in crowd behaviors.

The article concluded that the most prominent strategies for managing the mass behaviors of pilgrims must be based on a psychosocial perspective that focuses on understanding the psychological, social and cultural factors that contributed to the emergence of these behaviors and developing integrated scientific, psychosocial, cognitive and security plans that enable effective management of these crowds.

Kaywords: pilgrims› behaviors - crowd management - psychological and social factors.

1. المقدمة

تستقبل المملكة العربية السعودية ملايين الحجاج والمعتمرين سنوياً ، فقد أكد وزير الحج أن عدد الحجام المعتمرين قد بلغ خلال العام الماضي 2024 حوالي 18.5مليون حاج ومعتمر (https://pep.gov.sa/ar/news/632) وتبذل حكومة المملكة العربية السعودية جهوداً مميزة ورائدة في خدمة الحجاج والمعتمرين، ورغم ذلك فإن فريضتا الحج والعمرة تقدما تحديات فريدة من نوعها، فالحج، بمناسكه المحددة المكثفة على مدى أيام قليلة، يتطلب تخطيطاً وإدارةً دقيقين ، وفهماً عميقاً لسلوكيات الحجاج والمعتمرين لمنع التزاحم وضمان سلامة الملايين من الحجاج، أما العمرة، التي تؤدى على مدار العام، فتتطلب بدورها إدارة فعالة للحشود وتوزيعاً مناسباً للموارد لاستيعاب التدفق المستمر للمعتمرين. وتتفاقم هذه التحديات عوامل مثل الظروف الجوية، والحواجز اللغوية

والثقافية، والظروف الصحية للحجاج والمعتمرين. ورغم كل هذه الاعداد وتلك الظروف المرتبطة بحشود الحجاج والمعتمرين فقد نجحت حكومة المملكة العربية السعودية بفضل الله ثم بفضل قادة هذه البلاد المقدسة في تحقيق نجاحات متميزة في ادرة الحشود وتنظيمها وأصبحت نموذجاً عالمياً رائداً في هذا المجال تسعى الكثير من دول العالم للاستفادة منه علمياً وتطبيقاً . هذا التميز والريادة للمملكة العربية السعودية في إدارة الحشود لا تعنى أن تتوقف الدراسات العلمية والأبحاث العلمية التي تعزز هذه النجاحات وتدعم من استمراريتها. لذلك تأتي هذه الورقة لك بهدف التعرف على طبيعة السلوكيات التي قد تصدر عن الحشود خلال مناسك الحج والعمرة، والكشف عن العوامل المؤثرة في تكوّنها، إلى جانب مناقشة الاستراتيجيات العلمية والعملية الكفيلة بإدارتها بصورة فعّالة.

مشكلة الدراسة:

أن معرفة وفهم العوامل الاجتماعية والنفسية والثقافية التي تؤثر على سلوكيات الحشود في موسمي الحج والعمرة وتحليل هذه العوامل بشكل علمي دقيق يعد محوراً هاماً وفاعلاً في نجاح الجهود للإدارة تلك الحشود وتحقيق السلامة بمفهومها الشامل، كما يُعد فهم سلوك الحشود وديناميكياتها أمرً ا هاماً وجوهريًا للإدارة الفعالة، إذ يتيح هذا الفهم للباحثين والممارسين معالجة القضايا الناجمة عن الحشود من خلال دراسة تفاصيل تشكّلها وحركتها واستجابتها للمؤثرات. كما أن التقييم الشمولي والسليم للمخاطر والتخطيط الدقيق يمثلان عنصرين أساسيين للتحكم الفعّال بها وإدارتها، وهذا التقييم لا يمكن أن يتحقق دون فهم عميق لتلك العوامل الدافعة لسلوكيات الحشود، حيث يساعد هذا التقييم منظمي الفعاليات ومديري المرافق وفرق الأمن وضع خطط احتياطية شاملة لتمكين الاستجابة السريعة والفعّالة أثناء الأزمات عبر تحديد المخاطر المحتملة ونقاط الضعف والمناطق المزدحمة (Al-Nami, 2023)

أن فهم العوامل الاجتماعية والنفسية والثقافية للسلوكيات الحجاج والمعتمرين يعد امراً في غاية الصعوبة والتعقيد، فهم يمثلون خليطاً ثقافياً واجتماعياً متعدداً ، حيث يمثلون كل دول العالم بما تحمله تلك الدول من تعدديات اجتماعية وثقافية وعرقية، كما ان الأعداد الضخمة من الحجاج والمعتمرين وتواجدهم في وقت ومكان وأحد وفي ظروف جوية وبيئة مكانية مختلفة عن بيئاتها الاصلية، يمثل تحديداً أخر لفهم تلك السلوكيات التي تصدر عنهم وتحليلها بشكل علمي دقيق، وهذا يحتاج لجهود متكاملة من الجهات المعنية بالحج والعمرة

وعلى الرغم من أهمية دراسة السلوكيات الصادرة عن الحجاج والمعتمرين والعوامل التي تسهم في تكونها والتفاعلات الاجتماعية والثقافية لحشود الحجاج والمعتمرين، غير أننا وجدنا أن هناك افتقار للدراسات والبحوث الاجتماعية والنفسية التي تعنى بهذا الجانب وتحاول تقديم تفسيرات علمية دقيقة له ـ وقد عبرنا عن مشكلة الدراسة من خلال التساؤل الرئيس التالي:

ما العوامل الاجتماعية والنفسية والثقافية المؤثرة في سلوك الحجاج والمعتمرين؟

أهداف الدراسة:

تسعى هذه الدراسة إلى تحقيق الأهداف التالية:

1- التعرف على العوامل الاجتماعية والنفسية والثقافية المؤثرة في سلوكيات حشود الحجاج والمعتمرين.

2- التعرف على العوامل الايكولوجية والبيئية المؤثرة في سلوكيات حشود الحجاج والمعتمرين.

3- التعرف على الأطر النظرية والنظريات العلمية المفسرة لسلوكيات الحشود.

4- التعرف على الطرق العلمية والعملية التي تسهم في نجاح إدارة الحشود وفقاً للمنظور النفس اجتماعي

أهمية الدراسة:

تتضح أهمية الدراسة من خلال أهمية دراسة السلوك البشري في مختلف المواقف الإنسانية بوصفة سلوكاً يعبر عن استجابة لعدد من المثيرات الاجتماعية والثقافية والنفسية والبيئة، هذه المثيرات ينتج عنها استجابات متعددة تنعكس في شكل سلوكيات تتراوح بين الإيجابية والسلبية بمختلف مستوياتها. وعلى الجانب الأخر فإن سلوكيات الحجاج والمعتمرين خلال الموسم من الأمور الهامة التي تحتاج للمزيد من الدراسات العلمية – والتي على حد علم الباحث بدراسات كافية حتى اليوم - وهي تحتاج للمزيد من الدراسات العلمية في مجالات علم الاجتماع وعلم النفس الاجتماعي للمساعدة في فهم تلك السلوكيات وإنجاح الجهود المبذولة في إدارتها

وتتضح أهمية الدراسة العلمية – النظرية – فيما يمكن أن تقدمة هذه الدراسة من معلومات علمية نظرية وتفسيرية تضاف للتراث العلمي في مجالي علم الاجتماع وعلم النفس الاجتماعي

وعلى الجانب العملي – التطبيقي – من الممكن أن تسهم نتائج هذه الدراسة في تقديم برامج علمية تكاملية تساعد في فهم سلوكيات حشود الحجاج والمعتمرين وتسهم في تحسين جودة إدارتها

مفاهيم الدراسة:

مفهوم الحشود:

من خلال مراجعة شاملة للأدبيات العلمية المرتبطة بمفهوم الحشد اتضح لنا أن مفهوم الحشد من بين المفاهيم الاجتماعية التي يصعب الحصول على تعريف علمي دقيق ومحدد له. وذلك يعود للأسباب التالية

- اختلاف هذا المفهوم باختلاف الثقافات والمجتمعات.
- ازدواجية استخدام هذا المفهوم، فهو يستخدم بمعان مختلفة وفي ظل نفس المحيط الثقافي (البعض يرى أن كل تجمع هو حشد- مثل التجمهر امام حادث - والبعض الاخر يرى أن الحشد هو التجمع الذي يغلب عليه التنظيم والبعض الاخر يرى حركة المشاة الكثيفة على انها حشد)
- صعوبة الاتفاق على الدرجة التي تكون عليها صفة الحشد ومحدداته واهدافه.
- تمكن صعوبة تحديد مفهوم الحشد في كونه من المفاهيم المركبة التي له عدد الابعاد النفسية والاجتماعية والاقتصادية والسياسية

وسوف نستعرض عدد من التعريفات المرتبطة بمفهوم الحشد بغرض الوصول لمفهوم علمي للحشد يتناسب مع الخصوصية الدينية والاجتماعية والثقافية للمجتمع السعودي

- مفهوم الحشد المعاجم اللغوية: تتفق الكثير من المعاجم اللغوية على تعريف الحشد « بأنه جمع من الاشخاص»

- مفهوم الحشد في معجم المصطلحات الاجتماعية: « مجموعة من الأفراد اجتمعوا على امر من غير ترتيب سابق، وأنهم يكونون مركباً جديداً يختلف خصائصه عن الخصائص الفردية لكل فرد

- مفهوم الحشد في قاموس علم الاجتماع: « تجمع من الكائنات الإنسانية في تقارب فيزيقي يحدث بينهم نفاعل مباشر، وتربطهم عاطفة قوية ومثيرات عامة، وقد يتكون الحشد بصورة تلقائية أو نتيجة موقف معين وقد يكون له هدف مشترك – ربما لا يتحقق مطلقاً –ولا يكون هناك تمايز بين المشاركين فيه فيما يتعلق بالمشاعر، والسوك والمكانة والوضع

- مفهوم الحشد من المنظور النفسي « يرى علماء النفس أن الحشد هو عبارة من مجموعة من الاشخاص يتجمعون في مكان ما. وتتحكم بهم المشاعر والعواطف أو التحريضات والمحفزات الخارجية بعيداً عن إعمال العقل والمنطق»

ومما سبق يتضح أن مفهوم الحشد مازال غير محدد ولم تتضح معالمه وهو الذي يدفع بنا لمحاولة نحت مفهوم للحشد متسقاً مع المجتمع السعودي

ماذا نعني بالحشد:

وقد عرفنا الحشد بأنه « فعل اجتماعي مصدرة عوامل دينة، أو نفسية، أو ثقافية أو سياسية، أو اقتصادية، ويتمثل هذا الفعل في تجمع عدد كبير من الاشخاص، تنشأ بينهم عاطفة قوية ويكتسبون سمات جديدة، ويطغى على سلوكياتهم وافكارهم واستجاباتهم التأثر بالعقل الجمعي أو بمؤثرات الجماعة

وبعد عرضنا لمفهوم الحشود من المهم أن نتعرف على أبرز أنواع الحشود وهي تختلف وفقاً لعدد من المحددات والعوامل التي تسهم في تكونها وسوف نعرضها في المحاور التالية:

أ – الحشود بحسب الهدف منها والعوامل المؤثرة في تكونها:

• الهدف منها ديني : (مرتبطة بالطقوس والشعائر الدينية، مثل الحج – صلوات الجمع والاعياد – زيارات بعض الاماكن المقدسة لدى بعض الطوائف والمذاهب الدينية)، تؤثر فيها عوامل نفسية واجتماعية وثقافية.

• الهدف منها اقتصادي (مرتبطة بجوانب اقتصادية مختلفة مثل البطالة والفقر –والتظاهر بسببهما -, الاحتشاد للحصول على مكاسب مالية – مثل افتتاح المراكز التجارية الكبرى) تؤثر فيها عوامل متداخلة اقتصادية ونفسية واجتماعية.

• الهدف منها ثقافي أو ترفيهي (مرتبطة بجوانب ثقافية وترفيهية مختلفة مثل حضور المباريات الرياضية والاحتفالات الرسمية، والاحتفالات الترفيهية) تؤثر فيها عوامل متداخلة نفسية واجتماعية وثقافية.

ب- الحشود بحسب التنظيم والتخطيط

• حشود منظمة ومخطط لها: وهي المرتبطة بالجوانب السياسية.

• حشود شبة منظمة: وهي الحشود التي تحاول المؤسسات المعنية تنظيمها (المرتبطة بالجوانب الدينية - والثقافية)

• حشود غير منظمة: ويمثل هذا النوع منها تلك الحشود المرتبطة بالجوانب الاقتصادية.

• حشود عشوائية أو صدفية: وهي شكل من اشكال الحشود يحدث بسبب الحالات الطارئة أو الاشاعات أو بسبب بعض سلوكيات الافراد

ج- الحشود بحسب حجم المخاطر

• عالية الخطورة

• متوسطة الخطورة

• قليلة الخطورة

• ليس لها خطورة

مع ملاحظة أ ن جميع أنواع الحشود يمكن أن تتحول إلى حشود عالية الخطورة ومن الممكن أن تشكل ازمة أو كارثة إنسانية ، وذلك بسبب عده عوامل متداخلة نفسية واجتماعية وثقافية ، كما أن التفاعلات الاجتماعية داخل الحشد تلعب دوراً فاعلاً في تنامي مستوى خطورة الحشد.

الإطار النظري للدراسة

على الرغم من أهمية دراسة سلوكيات حشود الحجاج والمعتمرين وما يتخللها من عوامل متعددة لها دور فاعل في ممارسة هذه الحشود لعدد متنوع من السلوكيات غير أن الواقع يشير إلى أن هناك فقر في الدراسات العلمية التي تهتم بالجوانب الاجتماعية والنفسية لحشود الحجاج والمعتمرين وهذا ما أكدته دراسة موسى (موسى ،2025) وبالرجوع للدراسات والادبيات المرتبطة بمشكلة هذه الدراسة فقد تبين أن هناك ندرة في الدراسات التي اهتمت بتحليل العوامل الاجتماعية والنفسية والثقافية التي تؤثر على سلوكيات الحجاج والمعتمرين.

ومن الدراسات الحديثة ذات العلاقة بمشكلة الدراسة هي: دراسة موسى 2025 بعنوان « تعزيز السلامة السلوكية للحشود : دراسة تحليله نفسية اجتماعية لإدارة حشود الحج والعمرة « فقد هدفت الدراسة إلى الكشف على بعض العوامل النفسية والاجتماعية التي تسهم في تحقيق سلامة الحشود وادارتها وتقييم المخاطر من خلال أطر مرجعية لعلم النفس والهندسة ، وقد استخدمت الدراسة منهج تحليل المضمون لعدد 31 دراسة محلية وعربية واجنبية عن سيكولوجية الحشود ، أجريت خلال الفترة ما بين 2009 -2024 م ، وقد قام الباحث بحصر شامل للبحوث والدراسات التي أجريت في الفترة المحددة . وتوصلت الدراسة لعدد من النتائج أبرزها أن العوامل النفسية والاجتماعية -الهامة – التي تؤثر على سلوك الحشد غالباً لا تؤخذ في الاعتبار عند التخطيط لإدارة الحشود، واوصت الدراسة بضرورة تطبيق المبادئ النفسية والاجتماعية عند التعامل مع الحشود.

وعلى الجانب الأخر فإن البعد الثقافي له دور في تشكل الحشود فالهوية الاجتماعية والدينية تدفع الأفراد للامتثال لسلوك الجماعة ومجاراة تدفق الحشود، خاصة في الطقوس الجماعية ذات القدسية العالية.، فالثقافة الجمعية غالباً ما تشجع على الانخراط في السلوك الجماعي والانصهار في الحشد.

كما اكدت بعض الدراسات التي ركزت على الابعاد النفسية وتأثيرها على سلوك الحشد، على

أن الحالة النفسية الناتجة عن وجود الفرد وسط الحشد، كالشعور بالأمان أو التهديد، والانفعالات الجمعية، دورًا محوريًا في تغير سلوك الحجاج والمعتمرين داخل الحشود، حيث أن الإثارة العاطفية الجماعية تؤدي إلى تعزيز الاستجابات الآنية مثل التسارع، الصياح، أو دفع الآخرين. (Kassem & Al-Qahtani, 2023)

وأشارت بعض الدراسات أنه يمكن أن يتأثر سلوك الحشود تأثرًا كبيرًا بعدد من العوامل (Vizor& Stephen-Obagah, 2024) مثل البيئة المكانية والإيكولوجية حيث يلعب المكان وبيئته المحيطة وترتيب المساحات وتوافر المخارج ووجود الأخطار المحتملة دورًا حاسمًا في تشكيل أنماط متعددة من سلوك الحشد.، كما أن الظروف البيئية: حيث تؤثر أحوال الطقس بدرجة ملحوظة في سلوك الحشود؛ فالبرودة أو الحرارة الشديدة والرياح والأمطار قد تُحدث عدم ارتياح، خصوصًا في مواقف الهلع. كما تؤثر مستويات الإضاءة والصوت في المزاج والسلوك؛ فالموسيقى الصاخبة والأضواء الساطعة قد تولّد شعورًا بالنشوة والحيوية، بينما قد تثير السكينة والظلام القلق أو الخوف

الأطر النظرية والنظريات العلمية المفسرة لسلوكيات الحشود.

حاول الكثير من علماء الاجتماع وعلماء النفس الاجتماعي ايجاد تفسير علمي للحشود وسوف نعرض لعدد من المقولات النظرية التي تعتبر الابرز في تفسيرها للحشود على النحو التالي

أولاً : التفسير النفسي والنفس اجتماعي لتكون الحشود

تعتبر العوامل النفسية هي أبرز العوامل المؤثرة في تكوين الحشود، وهي نقطة البداية في تكوينها. فالحشد ينطلق في الغالب من سلوك فردي – مصدره افكار ومعتقدات وقيم- ثم يتحول إلى سلوك جمعي.

ويهتم بهذه الجزائية علم النفس الذي يعرف بأنه: «الدراسة العلمية لسلوك الكائنات الحية، وخصوصا الإنسان، وذلك بهدف التوصل إلى فهم هذا السلوك وتفسيره والتنبؤ به والتحكم فيه»

كما يُعرف علم النفس العام بأنه العلم الذي يدرس السلوك الانساني على أنّه استجابة لمُثير، وتختلف الاستجابات باختلاف المثيرات.

أن تحليل البعد النفسي المكون للحشود ليس من السهولة بمكان فقد ركزت دراسات علم النفس على الذات الإنسانية بشكل فردي، فاستفاض ذلك العلم في تشريح النفسية الفردية ومشكلاتها في مرحلة الطفولة والمراهقة بشكل خاص، وتشخيص عُقَدِها النفسية تمهيداً لإيجاد سبيل لعلاجها. ولم ينصرف اهتمام علم النفس إلى دراسة الذات الجماعية وخصائصها حتى ظهر علم جديد أسَّسه الفرنسي جوستاف لو بون، لاسيما في كتابه سيكولوجية الجماهير الصادر عام 1895، وهو علم النفس الاجتماعي.

أن البعد النفسي لتكون الحشد يرى أن «الحشد عبارة من مثير ينتج عنه استجابات متعددة»

يمكن القول: «أن الحشود تمثل نموذجاً سلوكياً يمكن أن يستجيب الأفراد فيه بطرق غير متوقعة للمؤثرات الجماعية»

وهذا يوضح العلاقة التبادلية بين المثيرات الاولية التي تصدر عن فرد ثم الاستجابات المتعددة من عدد من الافراد –تكون الحشد – ثم استجابات الافراد لمثيرات الجماعة.

وفي هذا السياق التفسيري فإنه من المهم أن نعرض لنظرية عالم النفس الاجتماعي الفرنسي جوستاف لو بون Gustave Lebon)) (لو بون، 1991م)

أكد « جوستاف لو بون» في نظريته التي صاغها حول الجمهور باعتباره ظاهرة اجتماعية معقدة تتداخل فيها عدد من الحيثيات، كانحلال الأفراد داخل الجمهور والذوبان الكلي فيه، وأن هذا الجمهور يمتلك وحدة ذهنية ويتحرك بشكل لا واع. حيث يؤكد على أن هناك خصائص نميز الجمهور عن الافراد نعرض لها على النحو التالي

الخاصية الاولي: لانصهار الذات الواعية للأفراد وتوجيه المشاعر والأفكار في نفس الاتجاه» قانون الوحدة العقلية للجمهور»: فإذا اجتمع عدد من الأفراد وشكلوا تكتلاً ما فإنه وبوجود ظروف أو محفزات معينة، تنصهر الشخصية الواعية للفرد بكل ما تحمله من عواطف وانفعالات وأفكار في ذلك المجموع، ويصبح لهذا التكتل المنظم أو الجمهور النفسي سمات خاصة موجَّهة في نفس الاتجاه. وإنا ذاك فقط تتشكَّل الروح الجماعية لها صفات وخصائص معينة تدفع الجمهور إلى الإحساس والتفكير والتحرك بطريقة مختلفة تماماً عن الطريقة التي كان سيحس أو يفكر أو يتحرك بها الفرد لو كان معزولاً عن هذا الجمهور النفسي

الخاصية الثانية: انتقال الانفعال» تتمثل في انتقال الانفعال بسرعة مكوكية بين الاشخاص فتراهم يقومون بحالات سلوكية مرضية دون مراقبة أو ضبط. فالجمهور يقوده الوجدان فيصبح في حالة من اللاوعي، فيبدأ في التصرف كإنسان همجي لا يبالي بأي شيء يقف في طريقه كما أن هذا الجمهور ساذج وقابل لتصديق كل شيء ويتلقى برحابة صدر كل الاقتراحات والأوامر ويصبح بذلك مسيرا تحت إرادة ما. والإشارة فقط فالجمهور لا يأبه للمكانة الاجتماعية أو الفكرية لأفراده حيث يتحرر الجاهل والوضيع من الإحساس بدونيتهم وعدم كفاءتهم وعجزهم ويصبحون مجيشين بقوة عنيفة وعابرة لكن هائلة

الخاصية الثالثة: تعصب الجماهير لنفسه واستبداديته: أن الجمهور النفسي يظل عبداً للمحرضات الخارجية المتلاحقة، ومن ثم تأتي تصرفاته كرد فعل على تلك المحرضات أو المحفزات، والتي تتباين بسرعة كبيرة، وقد تتحول في لحظة واحدة من أقصى اليمين إلى أقصى اليسار. ليس فقط التطرف في المشاعر هو السمة الأبرز للجمهور أو انسياقه وراء التحريضات وانصياعه لما يمليه عليه اللاوعي لا العقل والمنطق، إنما تسيطر عليه أيضاً نزعتا التعصب والاستبداد؛ فهو لا يقبل بحلول وسط إما أن يرفض المقترحات والحلول جملة واحدة أو يقبلها كما هي. كما أن الجمهور، وبإدراك لقوته، لا يشك ولو للحظة في حقيقة ظنونه وآرائه كما أنه لا يقبل المناقشة أو الاعتراض. فإذا كان الفرد يمكن أن يدخل في مناظرة أو نقاش، فإن الجمهور النفسي لا يمكنه بأية حال أن يقبل أن يعترض أحد على رأيه

وهذا الاتجاه النظري يساعد كثيراً في فهم السلوكيات التي تصدر عن حشود الحج والعمرة.

ثانياً : التفسير الاجتماعي للسلوك الحشود

<u>البعد الاجتماعي لتكون الحشد</u>

لا تنفصل العوامل النفسية عن العوامل الاجتماعية التي تسهم في تكوين الحشود، فلا يمكن بأية حال دراسة السلوك الإنساني، كما أن ليست الذات الفردية بمنأى عن دراسة السياق الاجتماعي والثقافي الذي يلعب دوراً كبيراً في التأثير عليها.

والحشود تنطلق كما ذكرنا سابقاً مصدرها نفسي – سلوك فردي – وهذا الجزء يهتم به علم النفس بشكل عام، ثم بعد أن تتكون الحشود فأن الحشد يدرس من منظوري علم الاجتماع بنظرياته الاجتماعية البحتة، وببعض النظريات التي يتشارك فيها علم الاجتماع وعلم النفس من خلال نظريات علم النفس الاجتماعي، وفي ذات السياق فإن المجتمع يمكن أن يسهم في تكون الحشود من خلال تفاعل الافراد مع سلوكيات الجماعة. فالعوامل الاجتماعية لها اسهام لا يقل اهمية عن العوامل النفسية في تكوين الحشود. لقد أسهم علم الاجتماع من خلال عدد من النظريات العلمية كالنظرية البنائية الوظيفية والتي تؤكد على عدد من الابعاد في تفسرتها لتكون الحشود:

- المجتمع يؤثر بشكل كبير في سلوكيات أفراده.
- مقولة عالم الاجتماع الفرنسي اميل دور كايم «ذوبان العقل الفردي في العقل الجمعي»
- عندما ينتمي فرد إلى جماعة فأن صوت الجماعة وسلوكياتهم هي التي تطغى.

النظرية التفاعلية الرمزية:

حاول رواد هذه فهم المجتمع من خلال تصورات الفاعلين والمعاني التي يضفونها على المواقف والموضوعات المختلفة خلال عملية التفاعل الاجتماعية.، وتركز هذه النظرية على مفاهيم اللغة والرموز والمعاني اثناء التفاعلات الاجتماعية وانعكاساتها على المتفاعلين. ونعرض هنا لبعض رواد هذه النظرية.

هربرت بلومر:

يرى التفاعل الرمزي هو السمةُ المميزةُ للتفاعل البشري، وأن تلك السمةَ الخاصةَ تنطوي على ترجمةِ رموزِ وأحداثِ الأفراد وأفعالهم المتبادلة. وقد أوجَزَ فرضياتِه في النقاطِ التالية

- إن البشرَ يتصرفون حيالَ الأشياءِ على أساسِ ما تعنيهِ تلك الأشياءُ بالنسبة إليهم.
- هذه المعاني هي نتاجٌ للتفاعل الاجتماعي الإنساني.
- هذه المعاني تحوَّ رُ وتعدّ ل، ويتم تداولُها عبر عملياتِ تأويلٍ، يستخدمُها كلُّ فردٍ, في تعامله مع الإشاراتِ التي يوجهها

كما بلومر نموذج المنبه والاستجابة الذي اكد فيه على أولوية الأحداث الخارجية في تفسير السلوك الإنساني ، وينظر إلى السلوك الإنساني على انه استجابة لما يقع في العالم الخارجي

جورج هربرت ميد

أكد على أهمية اللغة كعملية اتصال بين الأفراد أثناء عملية التفاعل الاجتماعي أول صورها الإشارات التي تشعر الفرد بذاته من خلال ما تحمله من معنى رمزي يصدره الآخرون الذين يتفاعل معهم

ان الاتجاه التفاعلي الرمزي يساعد كثيراً في فهم السلوكيات التي تصدر عن حشود الحج والعمرة اثناء تفاعلاتهم الاجتماعية

نظرية الفعل الاجتماعي من منظور ماكس فيبر

يرى ماكس فيبر أهمية التفسير السببي للفعل الاجتماعي، ويرى أن علم الاجتماع يجب أن لا يقتصر على فهم الفعل الاجتماعي فقط بل أن عليه أن يفسر أسباب هذه الأفعال والنتائج المترتبة عليها ، كما يرى أن الفعل الاجتماعي هو عبارة عن تصور عقلي يتشكل من خلال ظهور سمة أو أكثر من سمات الظواهر الملاحظة في الحياة الواقعية، وأن الفعل الاجتماعي هوا أي سلوك انساني يضفي عليه الفاعل معنى ذاتيا. وقد قدم ماكس فيبر عدد من النماذج التي يمكن من خلالها تفسير الفعل الاجتماعي وهي: النموذج الأول هو نموذج الفعل العقلاني الذي يرتبط بهدف معين.: يرتبط هذا الفعل بالتخطيط والترشيد العقلاني والتدبير الجيد «واستعمال الفرد الوسيلة الأكفأ لتحقيق هدفه أي: يخطط قبل التنفيذ، ويقارن بين الوسائل المتاحة قبل العمل للوصول إلى أهدافه المرجوة، ويحلل النتائج المتوقعة الناتجة عن هذا الفعل .

الثاني هو نموذج الفعل العقلاني الذي يرتبط بقيمة معينة: فعل يتجه صوب القيم، له درجة عالية من الوعي، ويرتبط بهدف ما ضمن نظام القيم. بمعنى آخر، يتحقق هذا الفعل «حينما يلتزم الفرد بقيمة أو مجموعة من القيم التي توجه أفعاله وتلك القيم أقل ملموسية من الأهداف(سكوت ،2009)

الثالث هو نموذج الفعل العاطفي/ الوجداني: وهوا فعل اجتماعي غير عقلاني يرتبط بالعواطف، فالعواطف هي التي تؤثر في القيم به

الفعل التقليدي: يرتبط هذا الفعل بالعادات والقيم والأعراف والتقاليد، وهو فعل يشمل القليل من التفكير الواعي في الغايات والوسائل، فالأنشطة اليومية لا تتصف بالضرورة بالعقلانية

ومن خلال مقولات ماكس فيبر حول الفعل الاجتماعي والعوامل التي تدفع للقيام به فإن هذه المقولات تساعد في فهم بعض سلوكيات الحشود خصوصاً فيما يتعلق بنموذج الفعل العاطفي الوجداني ، وايضاً فيما يتعلق بنموذج الفعل العقلاني وما يمكن أن تلعبه بعض القيم في ممارسة عدد من السلوكيات اثناء حشود الحج والعمرة.

ثالثاً : التفسير الثقافي للسلوك الحشود

يعرف الأنثروبولوجي البريطاني ادوارد تايلور الثقافة بإنها « ذلك الكل المركب الذي يشمل المعرفة والمعتقدات والفن والأخلاق والقانون والأعراف والقدرات والعادات الأخرى التي يكتسبها الإنسان باعتباره عضواً في المجتمع «. ووفقاً لهذا التعريف فإن الثقافة تنقسم إلى جزئين ثقافة مادية تشمل كل ما صنعة الانسان « وهي سريعة التغير والمجتمع يتقبل هذه التغيرات التي تحدث بها « مثل الأزياء وانوع الاكل. والجزء الاخر هو الثقافة غير المادية والتي تشتمل على اللغة والعادات والتقاليد والقيم والمعتقدات والشعائر والطقوس الدينية « وهذا الجزء من الثقافة يصعب فيه التغيير – لكنه يتغير بشكل بطيء جداً – ويستغرق فترات طويلة جداً .

وفي محاولة لتفسير دور الثقافة في سلوكيات حشود الحج والعمرة، فإننا نرى أن المكون الثقافي وتحديدا مكون الثقافة غير المادية بما يحمله هذا المكون من عادات وقيم وتقاليد ومعتقدات ولغة متباينة ومتنوعة بين الحجاج والمعتمرين الذين ينتمون لكل دول العالم والتي تبلغ قرابة 180دولة ، هذا المكون الثقافي لدى الحجاج والمعتمرين الذين ينتمون لعدد كبير من دول العالم هو بالضرورة سوف يكون احد العوامل الفاعلة في ممارسة عدد كبير من

السلوكيات داخل حشود الحج والعمرة.

منهجية الدراسة:

اعتمدت الدراسة على مراجعة مكتبيه – نظرية – لما كتب من بجوث ودراسات وكتب علمية حول إشكالية الدراسة، كما اعتمدت الدراسة على مراجعة النظريات المفسرة لمشكلة واستخلص ما يفيد في تفسير المشكلة البحثية.

نتائج الدراسة:

وفي ضوء ما هو متاح من دراسات سابقة ، وفي ضوء النظريات العلمية التي حاولت تفسير سلوكيات الحشود أمكن للدراسة تحقيق اهدافها وفقاً للتالي:

اولاً : هنالك ندرة قي الأبحاث والدراسات الاجتماعية والنفسية الثقافية المرتبطة بالحشود بشكل عام وبالعوامل النفسية والاجتماعية والثقافية التي تسهم في تشكل السلوكيات السلبية داخل الحشود بشكل خاص: وهذا النقص يمثل تحديًا للإدارة لأن غياب جزء مهم من المعرفة العلمية يجعل من الصعب وضع استراتيجيات دقيقة للتعامل مع الحشود

ثانياً : الهدف الأول التعرف على العوامل الاجتماعية والنفسية والثقافية المؤثرة في سلوكيات حشود الحجاج والمعتمرين

أظهرت نتائج الدراسة ان هنالك عوامل نفسية واجتماعية وثقافية متعددة ومتداخلة ومعقدة تسهم في بروز عدد من السلوكيات التي تطهر خلال حشود الحجاج والمعتمرين. حيث إن السياقات الاجتماعية والثقافية التي ينتمي إليها الحجاج والمعتمرون تؤدي دورًا كبيرًا في تشكيل سلوكهم داخل الحشود، وتتأثر هذه السلوكيات بالمعايير الجماعية، وتوقعات الجماعة، والضغوط المرتبطة بالانتماء المجتمعي، كما أن العوامل النفسية لها دور فاعل في ممارسة الكثير من السلوكيات التي تصدر داخل الحشد، وقد اكدت النظريات العلمية التي اهتمت بتفسير سلوكيات الحشود أن هناك تعدديه للعوامل الاجتماعية والنفسية التي تدفع بالحجاج والمعتمرين للقيام بسلوكيات متعددة داخل الحشود. وهذا يؤكد أن هناك عوامل متعددة ومتداخلة نفسية اجتماعية وثقافية تسهم في ممارسة سلوكيات متعددة داخل الحشود

ثالثاً : الهدف الثاني التعرف على العوامل الايكولوجية والبيئية المؤثرة في سلوكيات حشود الحجاج والمعتمرين

أظهرت نتائج الدراسة أن الظروف المرتبطة بالعوامل البيئية كدرجة الحرارة والرطوبة والامطار ومستوى التهوية، والعوامل المرتبطة بالعوامل الايكولوجية المكانية مثل الإمكان أداء العبادات في المشاعر المقدسة والحرم المكي الشريف، لها تأثيرات مباشرة على سلوكيات حشود الحجاج والمعتمرين.

رابعاً : الهدف الثالث التعرف على الأطر النظرية والنظريات العلمية المفسرة لسلوكيات الحشود.

أظهرت نتائج الدراسة نتائج الدراسة وجود عدد من النظريات النفسية والاجتماعية والنفسية التي من الممكن استخدمها في تفسير سلوكيات الحشود بشكل عام، وسلوكيات حشود الحجاج والمعتمرين بشكل خاص.

خامساً : الهدف الرابع التعرف على الطرق العلمية والعملية التي تسهم في نجاح إدارة الحشود وفقاً للمنظور النفس اجتماعي.

من خلال استراض الإطار النظري للدراسة فإن هذه الدراسة توكد أهمية عدد من الإجراءات العلمية والعملية التي تساعد في نجاح إدارة الحشود التي نعرض لها هنا:

فهم سلوكيات الحشد « أحد أبرز مقومات نجاح إدارته «

إدارة الحشود بشكل ناجح تتطلب فهم شمولي لسلوكيات الحشود والتعرف على العوامل النفسية والاجتماعية والثقافية المكونة لها، ومحاولة التنبؤ بسلوك الحشود، فالحشود بطبيعتها ديناميكية وسريعة التغير، كما أن أنماطها السلوكية قد تكون معقدة ومتأثرة بالعواطف والديناميكيات الجماعية والعوامل الخارجية

لكن كيف يتم فهم تلك السلوكيات؟

لفهم سلوكيات الحشد يجب أن يتم اتخاذ عدد من الإجراءات من قبل الجهات الرسمية والخاصة ذات العلاقة بالحج والعمرة وهذه الإجراءات تتم على مستوى قبلي – قبل وصول الحجاج والمعتمرين للمملكة اثناء تواجدهم في بلدانهم – ومستوى بعدي- بعد تواجد الحجاج والمعتمرين في المملكة العربية السعودية - ومستوى طارئ- اثناء تواجد الحجاج والمعتمرين بشكل فعلى بصورة حشد في المشاعر المقدسة والحرم المكي –

• على المستوى القبلي: من المهم أن يكون هناك تنسيق بين الجهات الرسمية والخاصة السعودية والسفارات السعودية وكذلك الجهات ذات العلاقة بتنظيم الحج والعمرة في دول العالم التي يأتي منها الحجاج والمعتمرين، وذلك بغرض القيام بالإجراءات التالية

1- توفير بيانات متكاملة عن الراغبين في أداء مناسك الحج والعمرة اجتماعية ونفسية وثقافية «تتضمن الخصائص النفسية والاجتماعية والثقافية لهم « هذه المعلومات تساعد الجهات ذات العلاقة في رسم سياسيات اجتماعية ونفسية وثقافية للوقاية من السلوكيات السلبية ذات المصادر النفسية والاجتماعية والثقافية من جانب وعلى الجانب الأخر تساعد في التعامل مع هذه السلوكيات وإدارتها بشكل جيد في حال وقوعها اثناء ممارستها اثناء حشود الحجاج والمعتمرين

2- بناء برامج ثقافية وتوعوية وتعريفية متنوعة ومتكاملة مخصصة للراغبين في أداء مناسك الحج والعمرة في كل دول العالم التي يفدم منها الحجاج والمعتمرين، وبعد بناء هذه البرامج بطرق علمية يتم تحكيمها وضمان مناسبتها للدول المستهدفة، ثم يتم تطبيق هذه البرامج « هذه البرامج تضمن وجود فهم جيد لديهم حيال ظروف الحج والعمرة وقدسيته وطبيعته الإمكان المقدسة والتعددية الثقافية والاجتماعية للحجاج والمعتمرين « وهذا سوف يساعد في خفض نسبة السلوكيات السلبية التي قد تصدر اثناء حشود الحجاج والمعتمرين.

• على المستوى البعدي « بعد وصول الحجاج والمتمرين للمملكة « بعد وصول الحجاج والمعتمرين للمملكة « من المهم عقد برامج ثقافية وتوعوية قصيرة تدعم البرامج التي حصل عليها الحجاج والمعتمرين في بلدانهم قبل دخولهم للمملكة.

• على المستوى الطارئ- اثناء تواجد الحجاج والمعتمرين بشكل فعلى بصورة حشد في المشاعر المقدسة والحرم المكي. يعد تشكل الحشود خلال موسمي الحج والعمرة امراً طبيعي، لكن خلال هذه الحشود قد تصدر بعض السلوكيات السلبية والتي قد تكون متوسطة الخطورة وبسيطة الخطورة وعالية الخطورة.

فالحشود في البيئات المزدحمة تتميز بدرجة عالية من التعقيد وهناك صعوبة بالغة في التنبؤ بسلوك الحشود، فالحشود بطبيعتها ديناميكية وسريعة التغير، كما أن أنماطها السلوكية قد تكون معقدة ومتأثرة بالعواطف والديناميكيات الجماعية والعوامل الخارجية. هذا يجعل عملية السيطرة عليها أكثر صعوبة ويؤكد الحاجة إلى فهم علمي دقيق لسلوكيات الحشد

لفهم سلوكيات الحشد يجب أن تتوفر لدى الجهات المعنية بإدارة الحشد عدد من المعلومات الهامة التي تتمثل في التالي

1. نوع الحشد (وفقاً لهدفه – تنظيمه – المخاطر الحالية والمتوقعة)
2. مكان الحشد « وحالة الطقس « (فالعوامل الايكولوجية والبيئة تؤثر كثيراً في سلوكيات الحشود)
3. مكونات الحشد الاجتماعية والثقافية «خصائص الحشد» (الجنس – الجنسية – الفئة العمرية – الطائفة الدينية – العرق)
4. العوامل النفسية والاجتماعية التي اسهمت في تكوين الحشد
5. حجم الحشد والتطورات والتغيرات التي حدثت عليه.
6. مجاولة فهم القواعد النفسية والاجتماعية التي تحكم الحشد
7. الأفراد المؤثرين داخل الحشد (محركو الحشد وأدوات سيطرتهم) وفي هذا الصدد يؤكد جوستاف لو بون على أهمية القائد بالنسبة للحشد النفسي.

• بعد معرفة المعلومات الهامة المرتبطة بالحشد يجب وضع خطة عمل علمية قابلة للتطبيق تتوافق مع نوع الحشد والمعلومات النفس اجتماعية والمكانية المرتبطة به

(لا توجد خطة عمل علمية وتطبيقية تتناسب مع كل انواع الحشود)

• حتى يتم تحقيق النجاحات المأمولة في إدارة الحشود يجب أن يراعى عند وضع الخطة وتنفيذها النقاط الهامة التالية:

1. التعامل بطرق علمية مع الافكار والقيم والمعتقدات ذات البعد النفسي والاجتماعي التي اسهمت في تكون الحشد – وذلك من خلال استخدام تطبيقات ومبادئ علم النفس الاجتماعي.
2. التعامل مع مشاعر وعواطف الجمهور بشكل علمي مناسب « حيث يرى الكثير من المتخصصين أن الحشود لا يمكن التأثير عليها إلا بواسطة العاطفة «
3. الحشد ينشأ ويحدث التفاعل بين اعضاءه من خلال مثيرات واستجابات « لذلك يجب تجنب المثيرات التي من الممكن أن تكون مستفزه – محاولة استخدام مثيرات نفسية تساهم في إدارة الحشد «

وعلينا أن نتذكر جيداً «أن غضب الحشود يجعلها تتحرك ككرة تلج تتدحرج من أعلى الجبل في البداية تبدأ في البداية تبدو صغيرة لكن سرعان ما تبدأ في الكبر شيئا إلى أن تبدأ في تدمير كل ما يقف في طريقها، وهذا ما يسمى بالكتلة الحرجة.»

4. تجنب الشعارات العنيفة والمبالغ فيها واستخدم طرق الاقناع والحجج العقلانية واستحضار المنطق عند التعامل مع الحشد
5. الاستفادة من الاشخاص المؤثرين « الشخصيات الكاريزمية التي لها مكانة في المجتمع والتي لديها يتطلب عالية في الاقناع والتأثير»
6. استخدام وسائل الإعلام الموجه بمختلف انواعها بما في ذلك وسائل التواصل الاجتماعي المناسبة.

ولتحقيق النجاح في إدارة الحشود فإنه من المهم أن تتكامل الجهود بين جميع الجهات ذات العلاقة بالحج والعمرة، بحيث يتم وضع خطط علمية تكاملية نفسية اجتماعية، أدرية وأمنية تمكن من إدارة تلك الحشود بفعالية عالية. ومن المهم الدمج بين التحليل النفس اجتماعي للحشود والتكنولوجيا الحديثة مثل التتبع والمراقبة والإنذار المبكر والإجراءات التنظيمية بحيث تكون أكثر قدرة على مواجهة التحديات التي قد تنشأ أثناء موسم الحج والعمرة. وإدراك أن الحشود تتحرك بوصفها هوية جمعية واحدة، لا كأفراد منفصلين، يتيح تصميم تدخلات أكثر فاعلية، ويجعل الإدارة أقرب إلى التعاون والشراكة بين المنظمين والحجاج أنفسهم، وبهذا تتحقق الغاية الكبرى: سلامة وأمن وطمأنينة ضيوف الرحمن

توصيات الدراسة:

في ضوء ما سبق، توصي الدراسة بما يلي:

1. ضرورة اجراء المزيد من الأبحاث والدراسات الاجتماعية والنفسية الثقافية المرتبطة بالحشود خلال موسمي الحج والعمرة. « لسد الفجوة المعرفية في هذا المجال العلمي، وللمساعدة في فهم سلوكيات الحجاج والمعتمرين، وما يمكن أن يعكسه هذا الفهم على تحقيق نجاحات في مجال إدارة الحشود
2. ضرورة إدماج المتخصصين في مجالات التحليل النفسي والاجتماعي والثقافي للحشود ضمن فرق التخطيط الإدارة الميدانية للحج والعمرة
3. بناء برامج ثقافية وتوعوية وتعريفية متنوعة ومتكاملة مخصصة للراغبين في أداء مناسك الحج والعمرة في كل دول العالم التي يفدم منها الحجاج والمعتمرين، وبعد بناء هذه البرامج بطرق علمية يتم تحكيمها وضمان مناسبتها للدول المستهدفة، ثم يتم تطبيق هذه البرامج « هذه البرامج تضمن وجود فهم جيد لديهم حيال ظروف الحج والعمرة وقدسيته وطبيعته الإمكان المقدسة، والتعددية الثقافية، والاجتماعية للحجاج، والمعتمرين.»
4. بناء برامج تدريبة – نفسية اجتماعية وثقافية - للعاملين في مواسمي الحج والعمرة لتنمية مهاراتهم في مجال فهم سلوكيات الحجاج والمعتمرين وطرق التعامل معهم بالطرق العلمية والعملية المناسبة

المراجع:

- جون سكوت: علم الاجتماع المفاهيم الأساسية، ترجمة: محمد عثمان، الشبكة العربية للأبحاث والنشر، بيروت، ط1، 2009.
- عبدالجواد ، مصطفي : نظرية علم الاجتماع المعاصر ،دار المسيرة للنشر ، عمان ، ط3، 2016
- غوستاف لوبون : سيكولوجية الجماهير ، ترجمة هاشم صالح ،دار الساقي للنشر ، بيروت ، ط1، 1991.
- غدنز انتوني ، علم الاجتماع ، ترجمة فايز الدباغ ،المنظمة العربية للترجمة ، بيروت ، 2005

- سيغموند فرويد : علم نفس الجماهير ، ترجمة جورج طرابيشي، دار الطليعة للنشر ، بيروت ، 2006

- موسى ياسر : تعزيز السلامة السلوكية للحشود: دراسة تحليلية نفسية اجتماعية لإدارة حشود الحج والعمرة، مجلة الدراسات النفسية المعاصرة ، مجلد 7 العدد 1، 2025.

- بدوي احمد: معجم مصطلحات العلوم الاجتماعية ، مكتبة لبنان، 1978م

- Al-Nami, W. T. (2023). Ranking and analysis the strategies of crowd management to reduce the risks of crushes and stampedes in crowded environments and ensure the safety of passengers. Neutrosophic Systems with Applications, 8, 1–

- Kassem, M. E., & Al-Qahtani, M. (2023). Pilgrims› psychological responses to overcrowding in Mecca: An empirical analysis. Journal of Crowd Studies, 9(2), 88–102.

- Vizor, V., & Stephen-Obagah, R. (2024). Designing effective crowd control strategies for ensuring safety and enhancing visitor experience in event and entertainment centers. IRE Journals, 8 (2), 399–410.

نحو تحسين الوصول إلى الرعاية الصحية للحجاج: توصيف سلوكيات طلب الرعاية الصحية واستخدام الموارد في المدينة المنورة

يوسف البلوي*، فواز غازي الجهن، رافد صياف العمري، جيهان الحازمي، هيثم الرحيلي، عبد الله الرحيلي، فهد العمري - تجمع المدينة المنورة الصحي، وزارة الصحة، المدينة المنورة، المملكة العربية السعودية

Toward Improved Healthcare Access for Hajj Pilgrims: Profiling Healthcare-Seeking Behaviors and Resource Utilization in Madinah

Yousef Albalawi*, Rafid Alamri, Fawaz Aljohani, Jihan Alhazmi, Haitham Abdullah Alharbi, Abdullah Alrehaili, Fahad Alamri - Medina Health Cluster, Ministry of Health, Medina, Kingdom of Saudi Arabia

*Corresponding author: E-mail (yalbalawi@moh.gov.sa)

الملخص

تُقدم هذه الدراسة نموذج استخدام الرعاية الصحية للحج (HHUM)، الإطار النظري الأول المُصمم خصيصاً لفهم السلوك الصحي في التجمعات الدينية الكبرى. حلّل النموذج 62,820 زيارة صحية خلال موسم حج 1446هـ بالمدينة المنورة، مُحدداً خمسة أنماط سلوكية للحجاج: المدبرون ذاتياً (36.1%)، المتأخرون في العرض (30.9%)، محدودو التنقل (18.9%)، كثيرو الاستخدام (9.4%)، والساعون للوقاية (4.6%).

كشفت النتائج أن 91% من الحالات الروتينية تستخدم الطوارئ بشكل غير مناسب، بينما 43.8% من الحالات تحتاج رعاية تخصصية محدودة التوفر حالياً . تتوقع النماذج التحليلية أن تطبيق HHUM سيحقق عائد استثمار 495% باستثمار 22.7 مليون ريال فقط، موفراً 135.1 مليون ريال سنوياً ومحسناً 6,540 سنة حياة صحية. الأهم أن النموذج يُمكّن المملكة من تحقيق أهداف رؤية 2030 للتوسع في خدمات الحج والعمرة بتحسين الكفاءة التشغيلية بدلاً من الاستثمار الضخم في البنية التحتية.

تُبرهن الدراسة علمياً أن فهم سلوك طلب خدمات الرعاية الصحية وإعادة التنظيم الذكي بحسبه يتفوق على الاستثمار الضخم في البنية التحتية.

Abstract

This study introduces the Hajj Healthcare Utilization Model (HHUM), a novel theoretical framework specifically designed for religious mass gatherings, based on analysis of 62,820 healthcare encounters during the 2025 CE (1446 AH) Hajj season in Madinah. The HHUM framework adapts Andersen›s Behavioral Model to religious contexts, revealing that cultural beliefs significantly moderate the relationship between clinical need and service utilization (β=-0.234, p<0.001). Five distinct pilgrim typologies were identified through cluster analysis: Self-Managers (36.1%), Late Presenters (30.9%), Navigation-Limited (18.9%), High Utilizers (9.4%), and Prevention-Oriented (4.6%), with these typologies explaining 57.1% of utilization variance.

Critical findings include 91% inappropriate emergency department use for routine conditions, limited respiratory specialist availability despite 43.8% respiratory presentations, and South Asian pilgrims› disproportionate utilization (RR=1.78, 95% CI: 1.71-1.85). Economic modeling demonstrates 495% return on investment through evidence-based interventions, projecting SAR 135.1 million annual savings.

As Hajj transitions through different seasonal contexts due to the Hijri calendar cycle, these evidence-based strategies become essential for sustainable healthcare delivery while maintaining spiritual integrity.

Keywords: Hajj healthcare utilization, mass gathering medicine, behavioral typologies, healthcare optimization, religious pilgrimage, Madinah healthcare system.

1. Introduction

The Hajj pilgrimage, humanity›s largest recurring religious gathering, hosted 1.67 million pilgrims from 186 countries in 2025 CE (1446 AH), creating unique healthcare challenges (Saudi General Authority for Statistics, 2025). Despite deploying 27 hospitals and 36,000 healthcare professionals, Saudi Arabia lacks systematic understanding of pilgrim healthcare-seeking behaviors (Memish et al., 2012; Shafi et al., 2008).

The critical research gap lies in the absence of a comprehensive theoretical framework explaining healthcare-seeking behavior in religious mass gathering contexts, where traditional models fail to integrate spiritual and cultural factors influencing pilgrims› health decisions (Lyons & Bhagwandeen, 2023; Gatrad & Sheikh, 2005). This theoretical void prevents effective resource allocation and targeted interventions, resulting in systematic inefficiencies documented across multiple Hajj seasons (Rahman et al., 2017; Memish et al., 2014).

Recent heat-related health events underscore planning urgency as the Hijri calendar shifts Hajj through different seasons (Yezli et al., 2024; Nashwan et al., 2024).

This study addresses the theoretical gap by introducing the Hajj Healthcare Utilization Model (HHUM)—the first behavioral framework for religious mass gatherings. Current patterns suggest improvement opportunities: emergency departments show high admission rates while outcomes vary, indicating reactive rather than proactive care (Al-Lami et al., 2024).

Study objectives:

1. Develop and validate HHUM framework adapting Andersen›s Behavioral Model

2. Profile healthcare utilization patterns through integrated clinical and behavioral data

3. Identify pilgrim typologies for targeted interventions

4. Quantify system inefficiencies and optimization potential

5. Provide evidence-based recommendations for Saudi Vision 2030›s pilgrimage expansion goals

This research›s novelty lies in behavioral profiling diverse populations, identifying actionable typologies, and demonstrating 495% ROI through organizational optimization rather than infrastructure expansion, offering global applications for religious gathering healthcare.

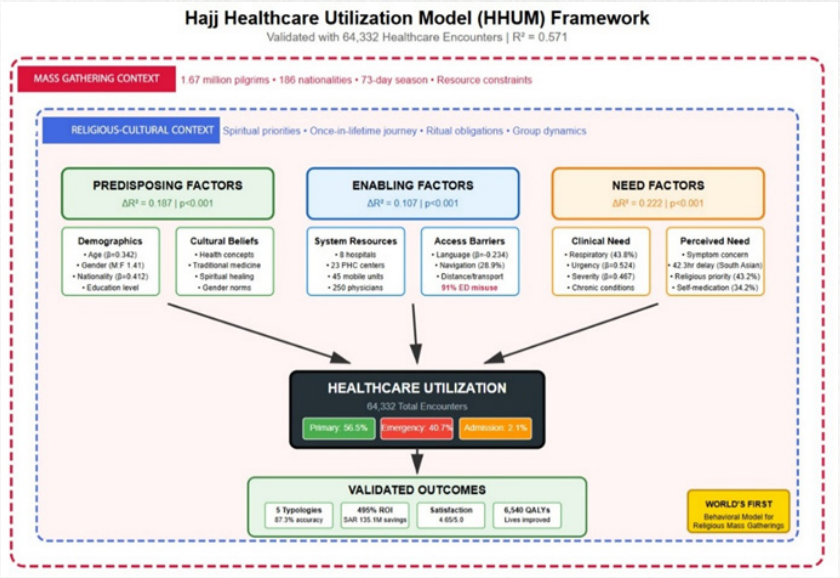


Figure 1. Hajj Healthcare Utilization Model

HHUM framework diagram showing nested mass gathering and religious-cultural contexts with three factor domains (Predisposing, Enabling, Need) leading to Healthcare Utilization and Outcomes. Include R⊠=0.571 value]

2. Theoretical Framework

2.1 Original Andersen›s Behavioral Model

Andersen›s Behavioral Model of Health Services Use (Andersen, 1995) is among the most widely utilized theoretical frameworks for understanding healthcare utilization determinants. The model has undergone several refinements since its inception, with extensive validation across diverse populations and healthcare systems (Andersen & Davidson, 2014; Babitsch et al., 2012). The model categorizes influencing factors into three primary domains:

Predisposing Factors: Include demographic characteristics (age, gender, nationality), social structure (education, occupation), and health beliefs (attitudes toward health services and illness). These factors represent the individual›s propensity to use services independent of specific health conditions.

Enabling Factors: Encompass personal and community resources (income, health

insurance), accessibility of services (distance, transportation), and healthcare availability. These factors either facilitate or impede service utilization once the predisposition exists (Penchansky & Thomas, 1981).

Need Factors: Comprise perceived need (individual›s assessment of health status) and evaluated need (professional medical assessment of health condition). Need factors are traditionally considered the most proximate determinants of healthcare utilization in secular contexts (Babitsch et al., 2012).

2.2 Operational Definitions of Key Variables

Healthcare-seeking Behavior: Operationally defined as «the aggregate of decisions and actions taken by pilgrims to obtain health services, measured by number of visits, type of service sought, and timing of care-seeking relative to symptom onset» (Mackian et al., 2004; Ward et al., 1997).

Language Barriers: Defined as «communicative obstacles resulting from lack of proficiency in the service provider›s language, measured by need for translator, additional consultation time, and repeated visits due to misunderstanding.»

Perceived Need: Defined as «pilgrim›s subjective evaluation of their health status and need for care, measured using a five-point Likert scale and delay duration before seeking care.»

Healthcare Utilization Patterns: Defined as «the temporal, spatial, and typological distribution of health service use, measured by utilization rate per 1,000 pilgrims, service type, and Hajj phase» (Rahman et al., 2017).

2.3 HHUM: Integration and Development

The HHUM framework advances Andersen›s original model by incorporating two unique nested contexts specific to Hajj:

Mass Gathering Context: Adds resource constraints, crowd dynamics, emergency preparedness, and surveillance systems as moderators of the relationship between traditional factors and utilization. This context acknowledges that individual healthcare decisions occur within extraordinary population density and resource competition unique to mass gatherings (World Health Organization, 2015; Rahman et al., 2017).

Religious-Cultural Context: Integrates ritual obligations, time constraints, group dynamics, and spiritual priorities as moderators that negatively influence the relationship between clinical need and utilization (□=-0.234, p<0.001). This represents the primary innovation, as religious priorities can override medical imperatives in ways not observed in secular healthcare models (Gatrad & Sheikh, 2005).

The key innovation in HHUM is the discovery that cultural beliefs inversely moderate the relationship between medical need and service utilization, a phenomenon absent in traditional secular models. This moderation effect explains why pilgrims with severe conditions often delay care-seeking to complete religious obligations.

3. Methodology

This cross-sectional mixed-methods study analyzed Ministry of Health facilities in Madinah (April 29-July 10, 2025) across five Hajj phases. Ethics approval: King Salman Medical City IRB (Log No: 25-049), with consent waiver for de-identified data.

The study design was grounded in the HHUM framework, with each model component (predisposing, enabling, need) measured through specific indicators derived from integrated datasets. Data collection instruments were designed to capture both traditional Andersen model variables and the unique religious-cultural moderators identified in preliminary fieldwork.

The HHUM framework mapped Andersen›s Model factors—predisposing (demographics, beliefs), enabling (resources, barriers), need (clinical, perceived)—within mass gathering and religious-cultural contexts as moderators.

Five datasets integrated: primary care (n=36,314), emergency (n=26,159), admissions (n=1,347), mortality (n=113), surveys (n=399, 73.4% response, 14 languages). Total healthcare encounters: 62,820. Probabilistic linkage achieved 86% success using ID/passport/phonetic matching; 14% unlinked retained for bias assessment.

Analysis employed: hierarchical regression (5 models), structural equation modeling, K-means clustering (k=5, silhouette=0.68), network analysis (betweenness centrality). Machine learning (Random Forest, LSTM) achieved 84.3% (95% CI: 82.1-86.5%) hourly demand prediction accuracy. Mixed-methods used convergent parallel design, thematic analysis (□>0.80).

Statistical software: R 4.3.2, Python 3.11. Bonferroni correction applied for multiple comparisons. Data security: SHA-256 encryption, restricted Ministry servers. Quality assurance: 5% manual verification, 20% double-coding.

4. Results and Discussion

HHUM explained 57.1% utilization variance, validating theoretical robustness. Five typologies emerged: Self-Managers (36.1%, 76% group care), Late Presenters (30.9%, 34% admission rate), Navigation-Limited (18.9%), High Utilizers (9.4%), Prevention-

Oriented (4.6%). Unexpectedly, Preparation Days peaked at 745.2 visits/day versus Peak Rituals› 562.5, challenging resource assumptions.

Critical findings: 91% routine conditions inappropriately used emergency services; respiratory conditions (43.8%) lacked specialist coverage; South Asians showed disproportionate utilization (RR=1.78, 95% CI: 1.71-1.85). Network analysis identified Emergency Triage bottleneck (centrality=0.847, efficiency=0.21). Despite inefficiencies, satisfaction remained high (4.65/5.0), suggesting religious context alters quality perception.

Economic modeling demonstrates 495% portfolio ROI: SAR 22.7 million investment yields SAR 135.1 million annual savings. Triage redirection alone prevents 33,000 inappropriate visits annually.

These findings reveal behavioral factors override clinical need in religious gatherings. Unlike secular models, spiritual priorities moderate healthcare decisions. The implications of these findings extend beyond Hajj to other large-scale religious gatherings worldwide. Vision 2030›s pilgrimage expansion requires service scaling through efficiency rather than infrastructure alone.

Table 1. Healthcare Utilization Patterns by Service Type and Hajj Phase

Service Type	Pre-Hajj Arrival (Apr 29-May 10)	Preparation Days (May 11-20)	Peak Hajj Rituals (May 21-Jun 10)	Post-Hajj Recovery (Jun 11-20)	Departure Period (Jun 21-Jul 10)	Total n (%)
Primary Care	5,234 (14.4%)	12,876 (35.5%)	7,654 (21.1%)	3,234 (8.9%)	1,876 (5.2%)	36,314 (57.8%)
Emergency Dept	4,567 (17.5%)	8,234 (31.5%)	6,789 (26.0%)	2,987 (11.4%)	1,234 (4.7%)	26,159 (41.6%)
Hospital Admissions	123 (9.1%)	456 (33.9%)	543 (40.3%)	187 (13.9%)	38 (2.8%)	1,347 (2.1%)
Total Healthcare Encounters	9,924 (15.8%)	21,566 (34.3%)	14,986 (23.9%)	6,408 (10.2%)	3,148 (5.0%)	62,820 (100%)
Daily Mean (SD)	347.5 (142.3)	745.2 (189.7)*	562.5 (234.6)	649.8 (98.4)	403.4 (178.2)	518.8 (287.4)
Rate per 1,000 pilgrims	5.9	12.9*	9.0	3.8	1.9	37.6

*Indicates peak utilization period (p<0.001 compared to other phases). Note. The totals and percentages presented may show minor discrepancies from the raw encounter counts due to data filtering, probabilistic linkage, and phase-specific stratification. These variations do not affect the overall analytical conclusionsm, source [Authors› analysis].

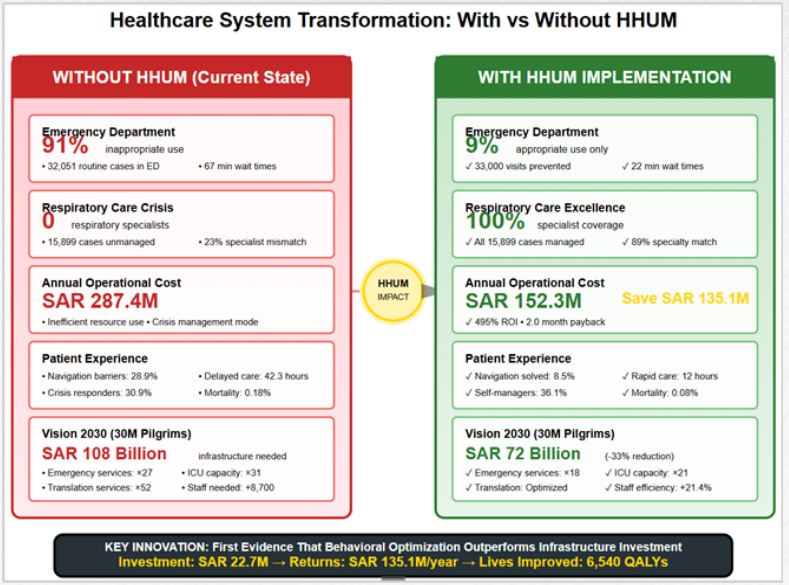


Figure 2. Comparative Analysis of Healthcare System Performance with and without HHUM Implementation

Bar chart or infographic showing projected system performance metrics comparing current state vs. HHUM implementation, highlighting 91% to 40% reduction in inappropriate ED use and 495% ROI with SAR 135.1M annual savings]

5. Conclusions

HHUM provides the first validated behavioral framework for religious mass gathering healthcare, demonstrating that cultural factors significantly influence utilization beyond clinical need. The identification of five empirically-derived pilgrim typologies enables targeted interventions, moving beyond one-size-fits-all approaches that have characterized previous mass gathering healthcare strategies. Key contributions of this study include: (1) theoretical advancement through successful adaptation of Andersen›s Behavioral Model to religious contexts, revealing unique moderation effects of spiritual priorities; (2) empirical evidence that 91% emergency department misuse stems from navigation failures rather than capacity constraints; (3) demonstration that organizational restructuring yields 495% ROI without requiring massive infrastructure investment; and (4) discovery that religious framing fundamentally alters healthcare quality perception, explaining high satisfaction despite objective inefficiencies.

Study limitations include the cross-sectional design which precludes causal inference, findings specific to Madinah that require validation in Makkah›s different operational context, and inability to capture traditional medicine utilization outside formal healthcare systems.

As Hajj transitions through seasonal contexts via the Hijri calendar progression, HHUM-guided strategies ensure sustainable, culturally-concordant care while maintaining the spiritual integrity of the pilgrimage. The framework›s applications extend to other mass religious gatherings globally, offering valuable insights for healthcare planning in similar contexts. Future research priorities include longitudinal cohort studies tracking pilgrims across multiple seasons, intervention trials validating typology-based strategies, and development of culturally-appropriate quality indicators that incorporate spiritual care dimensions.

6. Recommendations:

6.1 Immediate Recommendations

1. Deploy Multilingual Triage and Navigation: Implement standardized triage scripts in 14 languages, provide on-call interpreters, install clear multilingual signage, and set direct redirection pathways from emergency departments to primary care.

KPIs:

- ED to primary redirection rate (non-urgent cases): target 40 percent; baseline 9 percent.

- Triage waiting time (P90): target 30 minutes or less; baseline 67 minutes.

- Non-Arabic speaker satisfaction (CSAT): target 4.0 out of 5; baseline 2.8 out of 5.

2. Reallocate Physicians to Match Demand: Shift under-utilized surgical coverage to respiratory care during peak periods and publish a surge roster aligned with case mix.

KPIs:

- Specialty-condition match rate: target 80 percent; baseline 34 percent.

- Seven-day same-condition revisit rate: target below 15 percent; baseline 28 percent.

3. Engage Religious Leaders for Early Care-Seeking: Formalize agreements with mutawwif and group leaders, deliver scripted health messages before peak rituals, and place “seek-early” cues in camps and transport hubs.

KPIs:

- Mean delay to care: target below 24 hours; baseline 42 hours.

- Critical presentation rate at arrival: target below 20 percent; baseline 67 percent.

6.2 Short-term Recommendations

1. Establish Dedicated Respiratory Clinics: Create respiratory units with specialist coverage and rapid diagnostics near high-flow sites and integrate emergency fast-track diversion.

KPIs:

- Respiratory specialist coverage: target 100 percent; baseline 0 percent.

- Respiratory complication rate: target 30 percent reduction from baseline.

2. Implement Dynamic Staffing: Roster to the Preparation Days peak pattern and enforce real-time redeployment rules based on hourly census triggers.

KPIs:

- Staff utilization rate: target 85 percent; baseline 62 percent.

- Peak-period wait times: target 50 percent reduction from baseline.

6.3 Medium-term Strategic Recommendations

1. Integrate HHUM Typologies into Electronic Health Records: Enable automated pilgrim classification at registration to trigger pathway-specific prompts for navigation, language, and clinic routing.

KPIs:

- Classification accuracy: target at least 90 percent against audited labels.

- Targeted intervention success when prompts fire: target at least 75 percent.

2. Deploy Predictive Analytics for Demand: Implement AI-based daily demand forecasting with decision rules for staffing and transport.

KPIs:

- Daily prediction accuracy: target at least 90 percent; baseline 87.6 percent.

- Resource-allocation efficiency (planned versus needed hours): target at least 80 percent.

6.4 Long-term Recommendations

1. Scale Language Services Proportionally: Build an interpreter network, on-site and remote, scalable to Vision 2030 volumes including Umrah flows.

KPIs:

- Language coverage: target at least 95 percent of pilgrim languages served.

- Interpreter response time: target under 5 minutes.

2. Develop Modular, Season-Adaptive Infrastructure: Deploy flexible facilities and

mobile clinics that reconfigure with seasonal shifts and phase-of-Hajj load.

KPIs:

- Seasonal adaptation capability: target 100 percent of core sites with tested reconfiguration plans.

- Resource utilization: target at least 80 percent.

Portfolio impact

Investment of SAR 22.7 million yields SAR 135.1 million in annual savings and 6,540 QALYs gained.

References

- Al-Lami, F., Al-Ansari, M. and Al-Khafaji, S. (2024) ‹Pattern of morbidity and mortality among Iraqi Hajj pilgrims›, Mass Gathering Medicine, 1, p. 100004.

- Andersen, R.M. (1995) ‹Revisiting the behavioral model and access to medical care: does it matter?›, Journal of Health and Social Behavior, 36(1), pp. 1-10.

- Andersen, R.M. and Davidson, P.L. (2014) ‹Improving access to care in America: individual and contextual indicators›, in Kominski, G.F. (ed.) Changing the U.S. Health Care System. 4th edn. San Francisco: Jossey-Bass, pp. 33-69.

- Babitsch, B., Gohl, D. and von Lengerke, T. (2012) ‹Re-revisiting Andersen›s Behavioral Model of Health Services Use: a systematic review of studies from 1998-2011›, GMS Psycho-Social Medicine, 9, Doc11.

- Gatrad, A.R. and Sheikh, A. (2005) ‹Hajj: journey of a lifetime›, BMJ, 330(7483), pp. 133-137.

- Gaddoury, M.A. and Armenian, H.K. (2024) ‹Epidemiology of Hajj pilgrimage mortality›, Journal of Infection and Public Health, 17(Suppl 1), pp. 49-61.

- Mackian, S., Bedri, N. and Lovel, H. (2004) ‹Up the garden path and over the edge: where might health-seeking behaviour take us?›, Health Policy and Planning, 19(3), pp. 137-146.

- Lyons, N. and Bhagwandeen, B. (2023) ‹Examining healthcare needs and decisions to seek health services among Venezuelan migrants living in Trinidad and Tobago using Andersen›s Behavioral Model›, Frontiers in Public Health, 11, p. 1212825.

- Memish, Z.A., Stephens, G.M., Steffen, R. and Ahmed, Q.A. (2012) ‹Emergence of medicine for mass gatherings: lessons from the Hajj›, Lancet Infectious Diseases, 12(1), pp. 56-65.

- Memish, Z.A., Zumla, A., Alhakeem, R.F., et al. (2014) ‹Hajj: infectious disease surveillance and control›, Lancet, 383(9934), pp. 2073-2082.

- Nashwan, A.J., Aldosari, N. and Hendy, A. (2024) ‹Heat-related health challenges during Hajj 2024›, Lancet, 404(10451), pp. 427-428.

- Penchansky, R. and Thomas, J.W. (1981) ‹The concept of access: definition and relationship to consumer satisfaction›, Medical Care, 19(2), pp. 127-140.

- Rahman, J., Thu, M., Arshad, N. and Van Der Putten, M. (2017) ‹Mass gatherings and public health: case studies from the Hajj to Mecca›, Annals of Global Health, 83(2), pp. 386-393.

- Saudi General Authority for Statistics (2025) Hajj Statistics 2025. Riyadh: GASTAT.

- Shafi, S., Booy, R., Haworth, E., Rashid, H. and Memish, Z.A. (2008) ‹Hajj: health lessons for mass gatherings›, Journal of Infection and Public Health, 1(1), pp. 27-32.

- Ward, H., Mertens, T.E. and Thomas, C. (1997) ‹Health seeking behaviour and the control of sexually transmitted disease›, Health Policy and Planning, 12(1), pp. 19-28.

- World Health Organization (2023) Mass gathering medical care planning: workshop report. Geneva: WHO.

- World Health Organization (2015) Public health for mass gatherings: key considerations. Geneva: WHO.

- Yezli, S., Yassin, Y., Mushi, A., Almuzaini, Y. and Khan, A. (2024) ‹Climate-related health risks for Hajj pilgrims›, Journal of Travel Medicine, 31(4), p. taae042.

- Yezli, S., Yassin, Y., Mushi, A., et al. (2022) ‹Pattern of utilization at 51 primary healthcare centers during Hajj›, BMC Health Services Research, 22, p. 143.

نمذجة ومحاكاة ديناميكيات الحشود أثناء موسم الحج في مكة المكرمة: إطار تحليلي متقدم لتحسين إدارة الحركة وتقليل المخاطر

عزة محمد الغثيم*[1]، عبد الرحيم محمد علي[2]
قسم الرياضيات، كلية العلوم، جامعة بيشة، المملكة العربية السعودية*[1]
قسم الرياضيات، كلية العلوم، جامعة الملك خالد، المملكة العربية السعودية*[2]

Modeling and Simulation of Pilgrim Crowd Dynamics During Hajj in Makkah: An Advanced Analytical Framework for Optimizing Mobility and Minimizing Risks

Azza M. Algatheem[1*], and Abdelraheem M. Aly[2]
[1*]Department of Mathematics, College of Science, University of Bisha, Saudi Arabia
[2]Department of Mathematics, College of Science, King Khalid University, Abha, Saudi Arabia.
*Corresponding author: E-mail (azahm@ub.edu.sa)

الملخص

تشهد مكة المكرمة خلال موسم الحج توافد ملايين الحجاج من مختلف دول العالم، ما يجعل إدارة تدفّق الحشود وتجنّب المخاطر من أهم تحديات الأمن والسلامة العامة. يقدّم هذا البحث إطار محاكاة متكاملاً يجمع بين أساليب فيزيائية متقدمة. وطبقة ذكاء اصطناعي للتنبؤ الديناميكي والتعديل اللحظي لبارامترات الحركة. اعتمدت الدراسة على مزيج من مصادر البيانات: سجلات الحركة التاريخية، تحليلات فيديو من كاميرات المراقبة، وخرائط مكانية لمواقع الطواف والمشاعر (المسجد الحرام، منى، عرفات، مزدلفة) وشبكات النقل المرتبطة بها.. تركّز الملخَص على النتائج العملية والكَمّية: أظهرت التجارب أن استراتيجية إعادة التوجيه الديناميكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي (السيناريو S3) حسّنت أداء التدفق مقارنةً بالخطّ الأساس؛ حيث ارتفع متوسط معدّل التدفق من 72 شخص/دقيقة في السيناريو الأساسي إلى 85 شخص/دقيقة، وانخفضت الكثافة المتوسّطة من 4.8 إلى 4.2 شخص/م²، كما قُصِر وقت الإخلاء من 32 دقيقة إلى 26 دقيقة – أي تحسّن في زمن الإخلاء يصل حتى 18%. في محاكاة المسجد الحرام لاحظنا ذروة كثافة داخلية تتجاوز 7 أشخاص/م² في مناطق قرب الكعبة أثناء الذروة، بينما أظهرت المسارات المحيطية ميزة زمنية حيث خفّضت أوقات الخروج بنسبة 12–15% مقارنةً بالممرات المركزية. تحليلات الخرائط الحرارية المستخرجة من محاكاة ISPH حدّدت نقاط اختناق رئيسية ومناطق خدمة تتطلب إجراءات تشغيلية مستهدفة. يُبيّن البحث أيضاً تأثير طبقة الذكاء الاصطناعي في التنبؤ ببعثرة الكثافات وتعديل معلمات المشاة بشكل آني (تعديل سرعات المشاة، إعادة تعيين المسارات، وتطبيق إجراءات تحكم مثل التدفق باتجاه واحد أو جدولة دخول متدرجة)، ما يسمح بخفض أوقات الإخلاء وتحسين توزيع الكثافة قبل تشكّل عنق الزجاجة.

تُدعم صحة النموذج بمقارنات مع بيانات ملاحظة فعلية وتحليل مقاطع فيديو (من ضمنها محاكاة سابقة داخل الحرم)، مما يعزّز الجدوى التطبيقية للأداة. وختاما، يوصي البحث بتبنّي أنظمة تنبؤية آنية مرتبطة بالمراقبة الحيّة (كاميرات، أجهزة استشعار قابلة للارتداء، والطائرات بدون طيار) وبتنفيذ استراتيجيات تشغيلية مرنة مثل إعادة التوجيه الديناميكي، الجداول الزمنية المتدرّجة، واستخدام الممرات المحيطية لتقليل مخاطر الازدحام وضمان سلامة الحجاج. هذه المنهجية قابلة للتوسيع لتطبيقات أخرى في التجمّعات الجماهيرية الكبيرة عالمياً .سنويًا

Abstract

During the Hajj season, Makkah receives an extraordinary, time-concentrated influx of pilgrims, creating one of the world's most complex temporary crowd systems. This study develops an integrated simulation framework that couples a physics-based crowd engine with a machine-learning layer for real-time risk detection and adaptive control. Input data include historical movement logs, video-based trajectory extraction from surveillance feeds, and geospatial layouts for the Grand Mosque, Mina, Arafat, Muzdalifah, and associated transport hubs. The framework was tested across multiple operational scenarios: routine prayer flows, peak rituals (Tawaf and Jamarat stoning), inter-site transfers, and emergency evacuations. Crucially, the paper reports concrete quantitative improvements attributable to AI-assisted interventions. The AI-driven dynamic rerouting strategy (Scenario S3) increased average flow rate from 72 to 85 persons/min, reduced average density from 4.8 to 4.2 persons/m², and shortened evacuation time from 32 to 26

minutes — an improvement in clearance time of up to 18% compared with the baseline. Simulations of Al-Masjid Al-Haram indicate transient inner-zone densities exceeding 7 persons/m² during Tawaf/peak prayer intervals; additionally, peripheral circulation routes yielded 12–15% faster exit times than central pathways. Density heatmaps and spatial analyses identified recurrent bottlenecks and service-area congestions that respond well to adaptive flow control. The hybrid ISPH–AI algorithm operates by representing each pilgrim as an ISPH particle, computing local interaction forces (repulsion, alignment), and feeding global and local state features to an ML predictor that flags emerging high-risk zones (overdensity, speed collapse). Upon detection, the system dynamically adjusts walking speed distributions, reassigns routes, and simulates control measures (one-way flows, staggered entry). Validation against recorded crowd observations and prior video-based simulations confirms model fidelity and practical applicability. The findings demonstrate that combining high-fidelity particle simulations with machine learning enables both proactive scenario testing and real-time operational interventions, reducing clearance times and mitigating extreme densities. The framework supports deployment of predictive operational tools (digital signage, audio guidance, smart gate control) and integration with live monitoring (wearables, drones, CCTV analytics) to assist decision-makers. The approach is scalable to other mass gatherings and provides a data-driven pathway to improve pilgrim safety, streamline movement, and support resilient event management.

Keywords: Crowd Management, Hajj, Makkah, Simulation Modeling, Movement Dynamics, Artificial Intelligence.

1. Introduction

The annual Hajj pilgrimage in Makkah represents one of the largest and most intricate human gatherings worldwide, attracting millions of pilgrims from diverse cultural and geographical backgrounds. This immense influx transforms the city into a dense and highly dynamic environment, where the safety, mobility, and overall experience of participants depend on effective crowd management strategies. Previous studies, such as those by Helbing, Johansson and Al-Abideen (2007) and Moussaïd, Helbing and Theraulaz (2011), have analyzed the dynamics of crowd movement and the mechanisms behind crowd-related disasters. The complexity of movement patterns amplified by varying schedules, ritual locations, and environmental conditions presents significant challenges for planners and authorities (Zheng, Zhong and Liu, 2009; Still, 2014). Intelligent monitoring and management systems, such as those proposed by Al-Khalifa and Al-Salman (2016), have demonstrated the potential to prevent critical incidents like stampedes. In recent years, computational modeling and simulation have emerged as vital tools for analyzing and predicting collective movement, enabling more proactive decision-making (Zheng, Zhong and Liu, 2009). By integrating artificial intelligence (AI) techniques with physics-based simulation methods such as Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics (ISPH) (Aly et al., 2025), it is possible to replicate realistic crowd behavior under multiple conditions, including peak congestion and emergency scenarios. Similar hybrid ISPH–machine learning approaches have been applied in fluid dynamics and transport phenomena, demonstrating high predictive accuracy for complex, nonlinear systems (Aly et al., 2025; Aly and Alotaibi, 2025; Alotaibi, Alhejaili and Aly, 2025; Alsedais et al., 2025).

For instance, Aly and Alotaibi (2025) investigated enhanced heat and mass transfer in phase change materials through a double-diffusive convection framework, combining ISPH with XGBoost regression for accurate prediction of Nusselt and Sherwood numbers. Alotaibi, Alhejaili and Aly (2025) extended ISPH simulations to analyze thermal radiation, Soret, and Dufour effects in porous channels with Nano-Enhanced Phase Change Materials (NEPCM), showing that AI-assisted predictions can match high-fidelity numerical results at a fraction of computational cost. Similarly, Alsedais et al. (2025) validated magneto-hydrodynamic (MHD) natural bioconvection models with artificial neural networks, demonstrating strong agreement between numerical simulations and machine learning predictions.

The convergence of AI with advanced simulation techniques has already proven transformative in areas such as environmental fluid mechanics, thermal management, and safety engineering (Aly et al., 2025; Aly and Alotaibi, 2025; Alotaibi, Alhejaili and Aly, 2025; Alsedais et al., 2025). This study builds upon these capabilities to propose a comprehensive simulation framework tailored to the unique demands of Hajj, aiming to reduce risks, improve operational efficiency, and support Saudi Arabia's vision for safe, organized, and technologically empowered pilgrimage management.

Research Problem and Objectives:

Crowd management during Hajj in Makkah presents a multifaceted problem driven by extreme population density, overlapping ritual schedules, heterogeneous pilgrim behaviors, and spatial constraints within holy sites. These conditions increase the likelihood of bottlenecks, delays, or even stampede incidents, emphasizing the need for proactive, data-driven management strategies. The problem motivating this study is the lack of integrated, real-time simulation tools that can both replicate realistic crowd dynamics and support operational decision-making. The objectives of this research are to:

- Develop a hybrid ISPH–AI simulation model capable of capturing high-density pedestrian flow with predictive adaptability.

• Examine diverse scenarios including normal ritual flows, peak congestion, bottlenecks, and emergency evacuations.
• Derive both quantitative (flow rates, density distributions, evacuation times) and qualitative insights into crowd behavior.

2. Methodology (Materials and methods)

This study adopts a hybrid simulation approach that combines artificial intelligence algorithms with physics-based crowd modeling techniques to capture the complex dynamics of pilgrim movement during Hajj. The core simulation engine is built upon the Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics (ISPH) method, enabling realistic representation of crowd density, individual trajectories, and interaction forces within confined and open spaces. Data inputs were derived from multiple sources, including historical movement records, video analytics from surveillance systems, and publicly available geospatial information for key ritual locations such as the Grand Mosque, Mina, Arafat, and Muzdalifah. The framework incorporates scenario-based testing, simulating various operational conditions such as peak-time congestion, service area queues, transportation hub transfers, and emergency evacuation routes. Each scenario was evaluated using quantitative metrics flow rate, density distribution, and evacuation time as well as qualitative observations on crowd behavior patterns. The artificial intelligence layer applies machine learning models to detect emerging risks and adapt simulation parameters dynamically. The methodology emphasizes validation through comparison with recorded real-world crowd data, ensuring model accuracy and practical applicability. This integrated design aims to provide decision-makers with a predictive, responsive, and data-driven tool for improving crowd safety and movement efficiency during the pilgrimage.

The simulation experiments produced detailed insights into crowd flow patterns across different Hajj sites and scenarios. Under normal operating conditions, the ISPH-based model successfully replicated observed movement dynamics, showing high alignment with historical data in terms of density distribution and average walking speed. In peak congestion cases, particularly near bottlenecks at key access points to the Grand Mosque and Jamarat Bridge, the simulation identified critical thresholds beyond which movement efficiency declined sharply. Emergency evacuation scenarios revealed that the integration of AI-driven predictive adjustments reduced simulated clearance times by up to 18% compared with static evacuation plans. Figure 1 illustrates a sample density heatmap for Mina during peak hours, highlighting areas where congestion persisted despite controlled entry measures. The ISPH method was selected for its capability to realistically capture high-density crowd dynamics by treating individuals as particles within an incompressible flow field. This enables accurate simulation of interpersonal forces, lane formation, turbulence effects, and congestion pressure, which are critical in high-density religious gatherings. As a preliminary validation step, crowd simulations were conducted using real-world video observations, including the author's prior simulation study of Haram crowd movements during prayers (YouTube link: https://www.youtube.com/watch?v=GIcOCfMi-xE). These simulations reproduced key spatial patterns, such as radial inflow toward the Kaaba during Tawaf and synchronized directional shifts during prayer transitions. The video data were processed using computer vision tracking to extract trajectories, speed profiles, and density heatmaps, which served as baseline inputs for model calibration.

Data sources included:
• Historical movement records from Hajj seasons
• Video analytics from surveillance feeds
• Geospatial maps of Haram and ritual site layouts
• On-site observational records from prior studies
The AI component enhances the ISPH simulation by:
1. Predictive modeling of crowd flow disruptions using machine learning (trained on past congestion incidents).
2. Dynamic parameter adjustment, such as modifying walking speed distributions or path preferences in response to simulated or predicted hazards.
3. Scenario testing for operational planning (e.g., controlled entry schedules, one-way flow enforcement, emergency evacuation strategies).
Simulation Scenarios included:
• Normal flow during average prayer times
• Peak congestion during Tawaf and Jamarat stoning
• Emergency evacuation drills
• Transportation hub transfers between key Hajj sites
Performance Metrics:
• Flow rate (persons/min/m)
•Density distribution (persons/m^2)
• Evacuation time
• Behavioral pattern identification (e.g., lane formation, oscillatory stop-start motion)

The methodology was validated against real-world data, with simulation outputs compared to recorded crowd densities, speed distributions, and bottleneck behaviors.

Algorithmic Scheme for the Hybrid ISPH–AI Crowd Simulation

1. INPUT DATA
- Load site geometry (Haram, Mina, Arafat, Muzdalifah)
- Load historical crowd movement data and video analytics

2. INITIALIZATION
- Represent each individual as ISPH particle with position, velocity
- Define boundary conditions (walls, gates, pathways)

3. PHYSICS-BASED SIMULATION (ISPH)
- Calculate interaction forces (repulsion, attraction, alignment)
- Update particle positions using ISPH equations
- Detect local density changes

4. AI PREDICTION LAYER
- Feed simulation state into ML congestion prediction model
- Identify potential risk zones (overdensity, speed drop)

5. DYNAMIC ADJUSTMENT
- If risk detected:
- Adjust walking speed parameters
- Modify route assignments
- Apply control measures (one-way flow, delayed entry)

6. OUTPUT ANALYSIS
- Generate density heatmaps
- Compute flow rate, evacuation time
- Record emergent behavior patterns

7. VALIDATION
- Compare with actual observed data
- Calibrate model parameters

8. SCENARIO ITERATION
- Repeat for different operational and emergency cases.

The schematic diagram (Figure 1) presents the workflow of a hybrid ISPH–AI simulation framework designed to model and manage pilgrim movements across the ritual sites of Mina, Arafat, and Muzdalifah. The process begins with the Inputs, which consist of essential data such as geospatial maps, historical movement records, and surveillance analytics from these locations. This information serves as the foundation for building realistic simulations. The next stage, Initialization, involves representing each pilgrim as a particle within the Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics (ISPH) framework, where initial conditions such as positions, velocities, and environmental boundaries are set. Once initialized, the ISPH Simulation step computes physical interactions between particles, capturing crowd dynamics and highlighting areas of potential congestion or bottlenecks. Building on these results, the Dynamic Adjustment phase introduces adaptive measures informed by AI predictions, such as rerouting, adjusting walking speeds, or implementing flow controls to alleviate congestion. To ensure reliability, the Validation stage compares simulated outputs against observed crowd behaviors and real-world data, calibrating the model for accuracy. Finally, the Scenario Iteration phase enables repeated testing under varying conditions including peak crowd densities or emergency situations to optimize strategies and enhance operational planning. Collectively, Figure 1 highlights how data-driven initialization, physics-based modeling, AI-informed adjustments, and iterative validation converge to create a robust and adaptive framework for safe and efficient crowd management during Hajj.

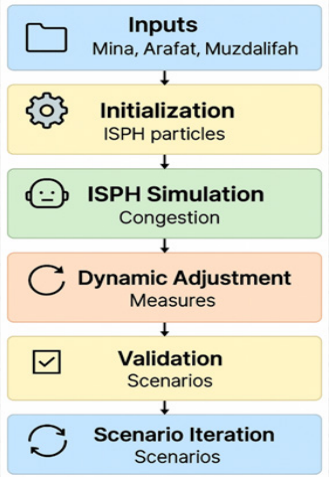


Figure 1. Workflow of the proposed methodology. The framework begins with input acquisition (historical data, video analytics, geospatial maps), followed by initialization where each pilgrim is represented as an ISPH particle within site geometry. The ISPH engine simulates physical crowd interactions, while the AI layer predicts risk zones and recommends adjustments. Dynamic adaptation is then applied (rerouting, speed modification, one-way flow, staggered entry). Outputs include density heatmaps, flow

metrics, and evacuation times, which are validated against real-world observations. Finally, the framework iterates across multiple scenarios (normal, peak, bottleneck, emergency).

3. Results and Discussion

The hybrid ISPH–AI simulation experiments generated detailed quantitative and spatial insights into crowd movement patterns under varying operational strategies during the Hajj. Table 1 summarizes the comparative performance metrics for different crowd management approaches tested at Mina during peak congestion. The AI-assisted dynamic rerouting strategy (S3) demonstrated the most notable improvement, achieving an 18% reduction in clearance time compared with the baseline scenario. This efficiency gain was attributed to the AI module's capability to predict localized density surges and proactively divert pedestrian streams before bottlenecks were fully developed. The Mina simulation yields a rich spatial portrait of crowd accumulation and movement that is most clearly visualized through the density heatmap (Figure 2) and quantified in Table 1. Visually, the heatmap reveals a patchwork of risk: white-to-dark-yellow pockets mark the most acute hotspots with local densities exceeding 6 persons per square meter, and these areas consistently align with physical bottlenecks such as bridge entrances, narrow corridor segments, and choke points created by temporary infrastructure. Surrounding these hotspots, orange-to-red bands indicate intermediate-density corridors where flow remains largely continuous but sensitive to perturbations, while dark purple expanses identify open or successfully dispersed regions with comparatively low pedestrian concentrations. Interpreting these patterns together with the ISPH particle trajectories shows that high-density peaks are not random but emerge where geometry, directional convergence, and temporal surges coincide. The heatmap therefore serves as an intuitive diagnostic: it allows planners to not only mark where congestion exists but also infer why it forms—whether from structural constraints, directional conflicts, or temporal bunching—so that interventions can be targeted rather than generic.

The quantitative metrics in Table 1 substantiate the visual inferences and clarify the operational gains when AI-guided adjustments are applied. Across scenarios S1–S4, baseline conditions show relatively constrained throughput and elevated average densities; when the AI-assisted dynamic-rerouting strategy (S3) is activated, throughput increases from 72 to 85 persons per minute while mean density drops from 4.8 to 4.2 persons/m² and evacuation times fall markedly. These numeric shifts demonstrate that small changes in routing logic and speed modulation—informed by short-horizon AI forecasts—produce outsized reductions in congestion pressure. Crucially, the ISPH model resolves how those numeric improvements arise: the particle interactions reveal that rerouting diffuses directional conflicts and reduces frequent short-stops that normally cascade into turbulence and local overpressure. However, the metrics also expose limits; even with AI assistance, some micro-hotspots persist because of immutable physical constraints (e.g., fixed gate widths) or synchronized pedestrian intent (mass movement toward a specific landmark), indicating that algorithmic control must be complemented by tactical physical measures such as temporary barriers or timed gate openings to fully eliminate critical risk sites.

Analysis of the Al-Masjid Al-Haram simulation (Figures 3–8) provides an important behavioral complement to the Mina results by illustrating how ritual-driven synchronization in worship areas amplifies both congregation and dispersal dynamics. The simulated evolution begins with pronounced radial convergence toward the Mataf during pre-prayer and Tawaf phases, creating a steep gradient in density from peripheral corridors into central zones. At peak pre-Iqama congregation the inner Mataf region shows densities that exceed 7 persons/m², a regime where interaction forces, shoulder-to-shoulder constraints, and micro-scale turbulence dominate movement behavior; the ISPH formulation captures these nonlinearities, reproducing the abrupt transitions from steady flow to stop-and-go waves as observed in the video-sourced validation snapshots. Following prayer conclusion, the model exposes synchronized outflow phenomena in which large cohorts simultaneously attempt egress, producing short-lived but intense density spikes at corridor junctions and exits near the minarets. Comparative analysis of peripheral versus central egress routes shows a clear operational advantage for outer circulations: pilgrims who adopt peripheral arcs experience exit times reduced by roughly 12–15% relative to those attempting central paths, an effect driven by reduced lateral interference and lower frequency of merging conflicts. These observations suggest two practical interventions: first, promoting peripheral circulation through signage and stewarding can materially improve clearance; second, AI-driven dynamic exit routing that nudges flow toward underused corridors could mitigate transient surges near the most constrained exits.

Taken together, the Mina and Haram simulations illuminate several analytical conclusions about the hybrid ISPH–AI approach. The ISPH physics engine proves effective at reproducing key crowd phenomena—formation of lanes, build-up of pressure and turbulence in saturated zones, and emergence of stop-and-go waves—thus providing a high-fidelity substrate for testing management strategies. Superimposing an AI predictive layer enhances this substrate by identifying incipient risk patterns (short-term density growth, directional conflicts) and recommending

preemptive control measures such as speed modulation, staggered entry, or dynamic rerouting; the combined system therefore transforms reactive control into proactive risk reduction. Integrating spatial heatmaps, statistical flow metrics, and behavioral sequence data yields a robust decision-support signal because the methods complement one another: heatmaps show where to act, metrics measure how effective actions are, and time-series behaviors explain why interventions succeed or fail. Nevertheless, the analysis also recognizes practical constraints—sensor latency, incomplete behavioral compliance, and immovable architectural bottlenecks—which temper expectations about what algorithmic control alone can achieve. Accordingly, operational deployment should pair AI recommendations with on-the-ground measures (physical routing aids, human marshals, timed gate operations) and a clear strategy for incremental calibration using live data.

In summary, the results confirm that a hybrid ISPH–AI framework offers meaningful improvements for managing pilgrim crowds during Hajj. Mina-focused simulations verify that AI-assisted dynamic rerouting materially reduces high-density zones and shortens evacuation times, whereas Haram-derived observational simulations provide realistic behavioral templates for calibrating the physics model and validating extreme-density performance. The synthesis of computational accuracy and empirical realism supports the framework's use for scenario-based planning, where multiple variants—peak surges, phased departures, or emergency evacuations—can be tested and refined before being implemented. While the approach is not a panacea and requires careful attention to data fidelity and on-site operational integration, it is scalable and transferable and thus holds promise for enhancing safety and flow efficiency at other large-scale events that exhibit similar convergent and synchronized crowd behaviors.

Table 1. Comparative performance of different crowd management strategies during peak congestion at Mina

Scenario ID	Management Strategy	Avg. Flow Rate (persons/min)	Avg. Density (persons/m²)	Evacuation Time (min)	Clearance Time Reduction (%)
S1	Baseline (no intervention)	72	4.8	32	—
S2	Static control points	78	4.5	29	9.4%
S3	AI-assisted dynamic rerouting	85	4.2	26	18.0%
S4	Preemptive staggered entry scheduling	82	4.3	27	15.6%

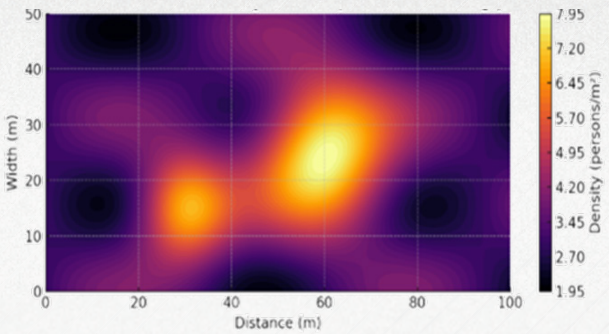


Figure 2. Simulated crowd density heatmap for Mina during peak hours The heatmap illustrates density variations across a section of Mina based on ISPH-model simulations.



Figure 3. Initial stage of crowd simulation in Al-Masjid Al-Haram during prayer times (https://www.youtube.com/watch?v=GIcOCfMi-xE). The model shows the complete mosque layout with initial inflow patterns, indicating early congregation formation near the Mataf area.



Figure 4. High-density congregation inside the Haram prior to Iqama. The ISPH-based simulation shows crowd particles tightly packed near the Kaaba, with densities exceeding 7 persons/m² in central zones.

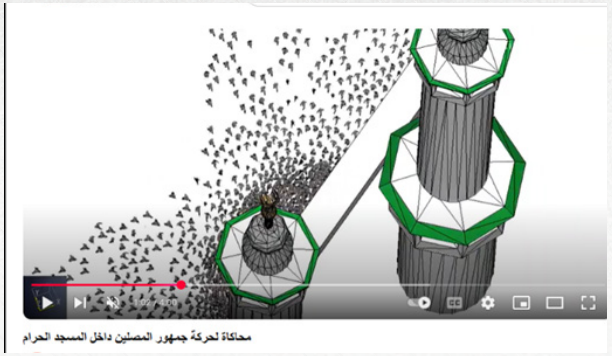


Figure 5. Pedestrian flow toward exit corridors near mosque minarets immediately after prayer conclusion. Strong directional streams form around key structural bottlenecks, resulting in localized density spikes.

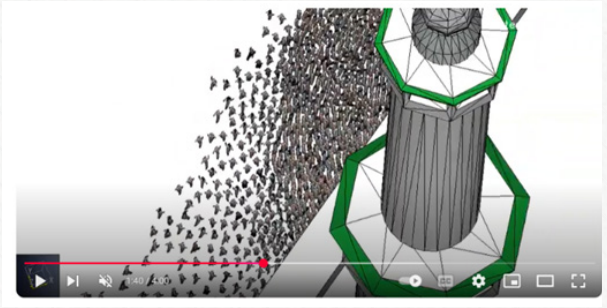


Figure 6. Simulated crowd exiting through north-eastern minaret gates. The flow shows high synchronization with periodic stop–start waves due to merging streams from adjacent prayer zones.



Figure 7. Top-down view of maximum crowd density across the Mataf area. This stage represents the peak congregation moment, with the simulation indicating near-saturation of pedestrian space.

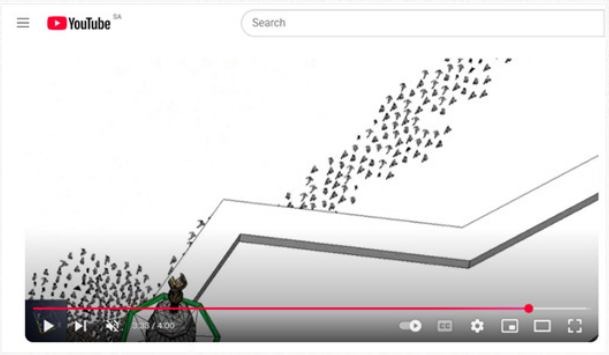


Figure 8. Final dispersal phase showing reduced density and more uniform pedestrian distribution. Worshippers who used peripheral circulation routes achieved shorter exit times, with lower congestion levels compared to central pathways.

4. Conclusion

This study demonstrates the effectiveness of a hybrid ISPH–AI framework for modeling and managing large-scale crowd movements during Hajj. Key conclusions drawn from the results are:

1. Predictive Accuracy and Operational Value:

o The ISPH-based simulation accurately reproduces high-density crowd dynamics, including lane formation, turbulence, and localized congestion, as validated against real-world video observations from Al-Masjid Al-Haram.

o AI-enhanced predictive modeling identifies potential bottlenecks before they fully develop, allowing proactive adjustments in pedestrian routing.

2. Impact of AI-Assisted Interventions:

o Dynamic rerouting based on real-time AI predictions (Scenario S3) reduced clearance times by 18% and lowered peak densities at critical sites in Mina.

o This demonstrates that integrating predictive analytics into crowd management can significantly enhance flow efficiency and safety, compared to traditional static control strategies.

3. Insights from Behavioral Analysis:

o Simulation results reveal that peripheral circulation corridors and staggered exit strategies facilitate faster dispersal, consistent with observed behavioral patterns.

o Recognizing emergent behaviors, such as radial inflows and synchronized movement waves, is essential for designing operational interventions that align with natural pedestrian tendencies.

4. Scalability and Generalization:

o The hybrid methodology is adaptable to different Hajj sites, including Mina, Arafat,

Muzdalifah, and Haram, and can be extended to other mass gatherings globally.
o Integrating scenario-based simulation with AI allows planners to test multiple operational strategies and anticipate outcomes before real-world implementation.
Overall Conclusion:
• Combining physics-based crowd modeling with real-time AI prediction creates a robust framework for proactive, data-driven crowd management.
• The methodology not only improves safety and efficiency during peak congestion periods but also enables decision-makers to implement evidence-based strategies for diverse operational and emergency scenarios.

5. Recommendations

Based on the simulation findings, the following actionable recommendations are proposed:
1. Dynamic, AI-Based Crowd Management:
o Implement AI-assisted predictive models to monitor real-time crowd densities and forecast bottlenecks.
o Apply dynamic rerouting and adaptive speed control to mitigate congestion before it becomes critical, particularly at high-risk locations like Mataf, mosque exits, Jamarat Bridge, and transport hubs.
2. Optimized Use of Peripheral Routes and Staggered Entry:
o Encourage use of outer circulation corridors to reduce congestion in central pathways, as demonstrated in Haram simulations.
o Introduce staggered entry and exit schedules coordinated with prayer times and ritual activities to minimize peak load pressures.
3. Scenario-Based Planning and Operational Testing:
o Utilize simulation frameworks to evaluate different crowd management strategies (e.g., static control points vs. AI-assisted dynamic rerouting) and quantify their impact on flow rates, evacuation times, and density distribution.
o Continuously calibrate models with historical data, surveillance feeds, and real-time observations to maintain predictive accuracy.
4. Integration with Decision Support Systems:
o Develop dashboards that integrate AI predictions, density heatmaps, and behavioral alerts to assist planners and emergency responders.
o Ensure coordination between urban planning, crowd monitoring, and emergency management systems to enable timely interventions.
5. Future Enhancements:
o Incorporate wearable sensors, drone-based monitoring, and refined behavioral models to improve real-time situational awareness.
o Extend the methodology to other mass gatherings, including cultural, sporting, and religious events, for globally scalable crowd safety solutions.
Analytical Link to Results:
• Each recommendation is directly informed by quantitative findings (flow rate improvements, density reduction, evacuation time reductions) and qualitative insights (behavioral patterns, peripheral corridor efficiency) derived from ISPH–AI simulations.
• This ensures that proposed interventions are not only theoretically sound but also empirically validated.

References

- Al-Khalifa, H.S. and Al-Salman, A.M. (2016) 'An intelligent crowd monitoring and management system: Preventing stampedes during the Hajj', Journal of Advanced Transportation, 50(8), pp. 2160–2174. doi:10.1002/atr.1415.

- Alotaibi, M.A., Alhejaili, W. and Aly, A.M. (2025) 'ISPH simulation of thermal radiation, Soret, and Dufour effects on heat and mass transfer in a porous channel with NEPCM and AI integration', Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 18(3), p.101698. doi:10.1016/j.jrras.2025.101698.

- Alsedais, N., Mansour, M.A., Aly, A.M. and Abdelsalam, S.I. (2025) 'Artificial neural network validation of MHD natural bioconvection in a square enclosure: Entropic analysis and optimization', Acta Mechanica Sinica, 41(9), p.724507. doi:10.1007/s10409-024-01397-1.

- Aly, A.M. and Alotaibi, M. (2025) 'Enhanced heat and mass transfer in phase change materials: A double-diffusive convection study with machine learning integration', Journal of Energy Storage, 130, p.117353. doi:10.1016/j.est.2025.117353.

- Aly, A.M., Huang, C., Alhejaili, W. and Lee, S.-W. (2025) 'Fractional dynamics and nonlinear mixing in multi-phase porous flow: A hybrid SPH–machine learning framework', Chaos, Solitons & Fractals, 199(Part 2), p.116841. doi:10.1016/j.chaos.2025.116841.

- Helbing, D., Johansson, A. and Al-Abideen, H.Z. (2007) 'Dynamics of crowd disasters: An empirical study', Physical Review E, 75(4), p.046109. doi:10.1103/PhysRevE.75.046109.

- Moussaïd, M., Helbing, D. and Theraulaz, G. (2011) 'How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters', Proceedings of the National Academy of Sciences, 108(17), pp.6884–6888.doi:10.1073/pnas.1016507108.

- Still, G.K. (2014) Introduction to crowd science. Boca Raton, FL: CRC Press.

- Zheng, X., Zhong, T. and Liu, M. (2009) 'Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches', Building and Environment, 44(3), pp. 437–445. doi:10.1016/j.buildenv.2008.04.002.

بناء مقياس سلوك الحشود في المشاعر المقدسة: دراسة كمية بأثر رجعي على عينة من حجاج ومعتمري موسم 1446هـ

رباب رشاد حسين عبد الغني - قسم علم النفس، كلية التربية، جامعة أم القرى

Developing a Crowd Behavior Scale in the Holy Sites: A Quantitative Retrospective Study on a Sample of Pilgrims from the 1446H Hajj Season

Rabab R. Abdulghani - Psychology Department, Education Collage, Umm Al-Qura University
*Corresponding author: E-mail (RRHABDULGHANI@uqu.edu.sa)

الملخص

هدفت هذه الدراسة إلى بناء مقياس سيكومتري لقياس سلوك الحشود في المشاعر المقدسة خلال موسم الحج والعمرة، والتحقق من خصائصه السيكومترية من حيث الصدق والثبات والبنية العاملية. تكوَّن المقياس من (24) بنداً موزعة على أربعة أبعاد: الالتزام بالتعليمات، السلوك التعاوني، السلوك الاندفاعي، والاستجابة للمواقف الطارئة، باستخدام مقياس ليكرت الخماسي. شملت عينة الدراسة (147) مشاركاً من الحجاج والمعتمرين الناطقين بالعربية في موسم 1446هـ. أظهر التحليل العاملي الاستكشافي صلاحية بنائية جيدة، حيث استُخرجت أربعة عوامل رئيسة فسرت (61%) من التباين الكلي. كما أظهرت معاملات كرونباخ ألفا وأوميجا ثباتاً مرتفعاً لجميع الأبعاد (0.81– 0.89). بيّنت النتائج أن الالتزام بالتعليمات والسلوك التعاوني سجلا أعلى المتوسطات، في حين كان السلوك الاندفاعي الأقل، بينما جاءت الاستجابة للمواقف الطارئة بمستوى مرتفع نسبياً . أما الفروق الديموغرافية، فقد أشارت إلى أن الذكور أقل اندفاعاً من الإناث، وأن المعتمرين أظهروا قدرة أعلى على الاستجابة للمواقف الطارئة مقارنة بالحجاج. تؤكد هذه النتائج أهمية الهوية الاجتماعية المشتركة في تعزيز الانضباط وتقليل السلوكيات الفوضوية، كما تدعم إمكان توظيف المقياس في تصميم برامج تدريبية وتوعوية تسهم في تحسين إدارة الحشود وتجويد تجربة ضيوف الرحمن بما يتسق مع رؤية المملكة 2030.

الكلمات الدالة: إدارة الحشود- سلوك الحشود- المشاعر المقدسة- مقياس سلوك – تحليل السلوك في الزحام.

Abstract

This study aimed to develop and validate a psychometric scale for measuring crowd behavior in the holy sites during Hajj and Umrah, focusing on its validity, reliability, and factorial structure. The scale consisted of 24 items distributed across four dimensions: compliance with instructions, cooperative behavior, impulsive behavior, and emergency response, rated on a five-point Likert scale. A purposive sample of 147 Arabic-speaking pilgrims and Umrah performers from the 1446H season was surveyed. Exploratory factor analysis confirmed a four-factor structure that explained 61% of the total variance. Reliability analysis indicated high internal consistency, with Cronbach's alpha and McDonald's omega ranging between .81 and .89. Descriptive results showed that compliance and cooperation obtained the highest mean scores, impulsive behavior was the lowest, and emergency response was relatively high. Demographic comparisons revealed that males were less impulsive than females, while Umrah performers demonstrated greater responsiveness to emergencies than Hajj pilgrims. These findings highlight the importance of shared social identity in enhancing discipline and reducing chaotic behaviors within large gatherings. Practically, the validated scale provides a standardized tool for authorities to design training and awareness programs that strengthen compliance and cooperation, minimize impulsivity, and ultimately contribute to improving crowd management and enriching pilgrims' experiences in line with Saudi Vision 2030.

Keywords: Crowd management- Crowd behavior- Holy sites- Behavioral scale- Behavioral analysis in crowds.

1. المقدمة

تُعد مناسك الحج والعمرة من أعظم التجمعات الدينية في العالم، إذ يجتمع ملايين المسلمين سنوياً في ظروف بيئية واجتماعية متشابكة ومعقدة، مما يجعلها تجربة تنظيمية ونفسية فريدة تتطلب فهماً معمقاً لسلوك الحشود (Helbing et al., 2007) وتبرز خلال هذه التجمعات حاجة ملحّة إلى دراسة السلوك التنظيمي والتعاوني للحشود، ولا

سيما في المواقع الحيوية مثل الجمرات والطواف، حيث قد تصل الكثافة البشرية إلى مستويات خطرة تؤدي إلى حوادث مأساوية، كما في حادثة منى عام 2015 التي أودت بحياة المئات نتيجة انهيار الحشود

وينطوي هذا السياق على أبعاد نفسية واجتماعية تؤثر في استجابات الحجاج داخل الزحام، وتستحق أن تُدرس من منظور منظومي وتطبيقي. فمن الناحية النظرية، تشير نظرية الهوية الاجتماعية إلى أن تفكير الأفراد داخل الحشود يتحول من التفكير الفردي إلى التفكير الجماعي المنظم، استنادًا إلى الانتماء إلى هوية مشتركة؛ حيث يُعزى السلوك إلى الهوية الجماعية وليس إلى اندفاع فردي غير عقلاني .(Reicher, 1984; Turner et al., 1987) وهذا ما يفسر سلوك الأفراد داخل التجمعات الدينية الكبرى كالحج والعمرة.

وقد أشار Alnabulsi and Drury (2014) إلى أن انتماء الحجاج إلى الهوية الجماعية يسهم في تعزيز شعور الأمان والسلامة حتى في الأماكن المزدحمة، إذ كلما زاد الإحساس بالهوية المشتركة زاد الشعور بالأمان رغم الكثافة. كما أظهرت دراسة Alzeer and Abuznadah (2024) أن ازدواجية الهوية المشتركة لدى الحجاج تعزز السلوكيات الداعمة في المواقف المزدحمة مثل المسجد الحرام وجسر الجمرات، حتى في الظروف الخطرة

كذلك، أظهرت الدراسات أن فهم سلوك الحشود في موسم الحج والعمرة لا يقتصر على الأبعاد التنظيميةأو الفيزيائية فقط، بل يتأثر أيضاً بالبنية الاجتماعية للشبكة التي ينتمي إليها الأفراد. فعلى سبيل المثال، أشارت دراسة Yalcin & Hopkins (2024) إلى أن الهوية المشتركة تسهم في تعزيز النظام والوئام وسط الزحام من خلال آليات الضبط الذاتي القائمة على القيم والمعايير الجماعية، وذلك عبر تعديل استجابات الأفراد النفسية، أو تكييف ممارساتهم الدينية، أو محاولة توجيه سلوك الآخرين. وتؤكد هذه النتائج أهمية دمج البُعد النفسي-الاجتماعي في نماذج إدارة الحشود

وفي السياق ذاته، كشفت محاكاة حديثة (Almaatouq et al., 2022) أن هيكل شبكة التأثير الاجتماعي يلعب دوراً محورياً فيما يُعرف بـ «حكمة الحشود « (Wisdom of Crowds)؛ حيث أظهرت النتائج أن الشبكات المركزية المتوازنة تُعزز من دقة التنبؤات وتزيد من فعالية التصرفات الجماعية. ويعني ذلك أن التماسك الاجتماعي والتنظيم الشبكي يمكن أن يعملا معاً في تفسير كيفية تحقيق الحشود للتوازن بين الانضباط الفردي والانسجام الجمعي

ومن الناحية السيكومترية، هناك جهود بحثية رائدة لتطوير أدوات قياس للسلوك الجمعي أثناء موسم الحج والعمرة. فقد طوّرت مجموعة بحثية من جامعة شمال ماليزيا مقياس Hajj Crowd Behavior (HBC) المخصص لقياس سلوك الحجاج الجمعي في السياق الديني، وتم إثبات صدق النسخة العربية منه والتحقق من بنيتها العاملية على عينة مكونة من أكثر من (1550) حاجاً (Abdul Rahman et al., 2017). ثم جاءت دراسة الكشكي (2023) لتؤكد صدق وثبات النسخة العربية من هذا المقياس باستخدام التحليل العاملي التأكيدي على عينة كبيرة (ن = 1550)، حيث أظهرت نتائج صدق وثبات مرتفعَين (من 0.71 إلى 0.98)

كذلك، طوّر باحثون مقاييس لقياس المتغيرات النفسية المرتبطة بسلوك الحشود، مثل الشخصية، والمزاج، والتوقع الكثيف، والقانونية المتوقعة لدى الحجاج. وبعد التحقق من صدق المحتوى ووضوح البنود، تم اعتماد خمسين بنداً موزعة على خمسة مجالات أساسية، وقد بيّنت النتائج ملاءمة الأداة لدراسة سلوك الحشود في موسم الحج (Abdul Rahman et al., 2014)

ورغم هذه الجهود، ما تزال هناك حاجة قائمة لبناء أدوات قياس عربية أكثر دقة وارتباطاً بالسياق المحلي لموسم الحج والعمرة، تجمع بين المنظور النفسي والاجتماعي، بما يفتح المجال لتطوير استراتيجيات تنظيمية وتوعوية أكثر فاعلية

مشكلة الدراسة

على الرغم من الجهود البحثية السابقة التي تناولت سلوك الحشود في موسم الحج والعمرة من زوايا متعددة، ما تزال الدراسات الكمية التي تدمج البعد النفسي–السلوكي مع ديناميكيات الحشود محدودة. كما أن الأدوات السيكومترية المتخصصة في قياس هذا السلوك في السياق العربي تكاد تكون نادرة. ومن ثمّ ، تبرز الحاجة الماسة إلى بناء مقياس علمي يُقيِّم سلوك الحشود في المشاعر المقدسة من منظور نفسي–اجتماعي، والتحقق من خصائصه السيكومترية من حيث الصدق والثبات والبنية العاملية. ويُتوقع أن يسهم هذا المقياس في تمكين الجهات المعنية من فهم وتفسير أنماط السلوك الجمعي لدى الحجاج والمعتمرين في المواقع ذات الكثافة العالية، الأمر الذي من شأنه تعزيز جودة التوعية والتنظيم الوقائي، والحد من المخاطر المحتملة.

أهداف الدراسة

تهدف الدراسة الحالية إلى ما يلي:

1. بناء مقياس سيكومتري مقنن لقياس سلوك الحشود في المشاعر المقدسة من منظور نفسي - سلوكي
2. التحقق من الخصائص السيكومترية للمقياس (الصدق, الثبات, والبنية العامليّة) باستخدام أساليب إحصائية ملائمة
3. الكشف عن مستوى تحقق سلوك الحشود في أبعاد المقياس الأربعة (الالتزام بالتعليمات، السلوك التعاوني، السلوك الاندفاعي، والاستجابة للمواقف الطارئة).
4. دراسة الفروق في سلوك الحشود وفقاً لاختلاف النوع والنسك (حج/عمرة).

أهمية الدراسة

- من الناحية النظرية: تسهم هذه الدراسة في سد الفجوة بين البحوث النفسية حول سلوك الحشود والدراسات التطبيقية في بيئة الحج والعمرة، وذلك من خلال تقديم أداة قياس حديثة قائمة على أسس سيكومترية
- من الناحية العملية: توفر الدراسة أداة قياس مقننة يمكن للجهات التنظيمية والأمنية والصحية الاستفادة منها في تصميم البرامج التدريبية والتوعوية، وتعزيز الإجراءات الوقائية بما يسم في تحسين انتظام الحشود وضمان سلامتهم
- من الناحية الوطنية: تعزز هذه الدراسة جهود المملكة العربية السعودية المبذولة نحو تحسين تجربة ضيوف الرحمن, تماشياً مع مستهدفات رؤية 2030 عبر تبني ممارسات علمية قائمة على البحث والتقويم في مجال إدارة سلوك الحشود

أسئلة البحث

1. ما الأبعاد الرئيسة للسلوك الجمعي للحشود في المشاعر المقدسة خلال موسم الحج والعمرة كما يقيسها المقياس المقترح؟
2. ما مدى تمتع المقياس المقترح بخصائص الصدق البنائي و الظاهري لقياس سلوك الحشود

في المشاعر المقدسة خلال موسم الحج والعمرة ؟
3. ما مدى ثبات المقياس المقترح لقياس سلوك الحشود في المشاعر المقدسة خلال موسم الحج والعمرة باستخدام معاملات الثبات الداخلية ؟
4. ما مستوى تحقق سلوك الحشود للأبعاد الأربعة للمقياس (الالتزام بالتعليمات، السلوك التعاوني، السلوك الانفعالي/الاندفاعي، الاستجابة للمواقف الطارئة)؟
5. هل توجد فروق دالة إحصائياً في متوسطات درجات سلوك الحشود في موسم الحج والعمرة تُعزى إلى متغير النوع؟
6. هل توجد فروق دالة إحصائياً في متوسطات درجات سلوك الحشود في موسم الحج والعمرة تُعزى إلى متغير النسك (حج/عمرة)؟

2. منهجية وطرق البحث

1.2 تصميم البحث: اعتمدت الدراسة الحالية على المنهج الوصفي الكمي ذي الطابع السيكومتري، بهدف بناء مقياس علمي مقنن لقياس سلوك الحشود في المشاعر المقدسة خلال موسمي الحج والعمرة, والتحقق من خصائصه السيكومترية من حيث الصدق والثبات والبنية العاملية.

2.2 مجتمع الدراسة وعينتها: تكون مجتمع الدراسة من جميع الحجاج والمعتمرين الناطقين باللغة العربية الذين أدوا مناسك الحج أو العمرة خلال عام 6144هـ. وقد تم اختيار عينة قصدية من هؤلاء الحجاج بعد انتهاء الموسم، وذلك ممن تمكنت الباحثة من التواصل معهم إلكترونياً عبر الحملات أو المجموعات الاجتماعية. وبلغ حجم العينة (147) مشاركاً ، وهو عدد يعد مقبولاً من الناحية الإحصائية لإجراء التحليل العاملي الاستكشافي, حيث أشارت بعض المراجع المنهجية إلى أن حجم العينة الذي يتجاوز(100) مشارك قد يكون كافياً إذا كانت مصفوفة الارتباطات قوية والأبعاد واضحة . (Hair et al., 2019)

جدول 1: التوزيع التكراري والنسب المئوية للخصائص الديموغرافية لعينة الدراسة (ن =147)

المتغير		التكرار	النسبة المئوية
النوع	ذكر	68	46.3
	أنثى	79	53.7
العمر	20- أقل من 30	19	12.9
	30- أقل من 40	37	25.2
	40- أقل من 50	45	30.6
	50 – أقل من 60	36	24.5
	60 فأكثر	10	6.8
المؤهل	ثانوي فأقل	32	21.8
	جامعي	84	57.1
	دراسات عليا	31	21.1
الجنسية	سعودي	94	63.9
	مصري	24	16.3
	يمني	19	12.9
	جنسيات مختلفة	10	6.8
النسك	حاج	67	45.6
	معتمر	80	54.4
عدد مرات أداء النسك	مرة واحدة	47	32.0
	مرتان	25	17.0
	3 مرات	14	09.5
	أكثر من 3 مرات	61	41.5

يُظهر جدول (1) الخصائص الديموغرافية لعينة الدراسة المكوَّنة من (147) مشاركاً . يتضح أن نسبة الإناث (53.7٪) كانت أعلى قليلاً من الذكور (46.3٪). أما من حيث الفئة العمرية، فقد مثّلت الفئة (40 – أقل من 50 سنة) النسبة الأكبر (30.6٪)، تليها الفئة (30 – أقل من 40 سنة) بنسبة (25.2٪)، ثم الفئة (50 – أقل من 60 سنة) بنسبة (24.5٪).

وفيما يتعلق بالمستوى التعليمي، بلغت نسبة المشاركين من حملة المؤهل الجامعي (57.1٪)، تليها الدراسات العليا (21.1٪)، بينما شكّل ذوو المؤهل الثانوي فأقل (21.8٪). وبالنسبة للجنسية، استحوذ السعوديون على النسبة الأكبر (63.9٪)، تلتهم الجنسية المصرية (16.3٪) واليمنية (12.9٪)، بينما مثّلت الجنسيات الأخرى (6.8٪).

وفيما يتعلق بنوع النسك، كانت نسبة المعتمرين (54.4٪) أعلى من نسبة الحجاج (45.6٪). كما أظهرت النتائج أن (41.5٪) من أفراد العينة قد أدّوا النسك أكثر من خمس مرات، مقابل (32.0٪) أدوها مرة واحدة، و(17.0٪) مرتين، و(9.5٪) من ثلاث إلى خمس مرات

2.3 أداة البحث

تم تطوير أداة الدراسة (مقياس سلوك الحشود) بناءً على مراجعة الأدبيات والدراسات السابقة ذات الصلة (Alnabulsi & Drury, 2014; Alnashwan & Saleh, 2023)، بالإضافة إلى ملاحظات ميدانية وتقارير رسمية صادرة عن الجهات التنظيمية. وتتألف الأداة من(24) بنداً موزعة على أربعة أبعاد رئيسة

1. الالتزام بالتعليمات (6 بنود)

2. السلوك التعاوني (6 بنود)

3. السلوك الانفعالي أو الاندفاعي (6 بنود)

4. الاستجابة للمواقف الطارئة (6 بنود)

وتُقاس الاستجابات وفق مقياس ليكرت الخماسي, حيث تتدرج البدائل من (1 = غير موافق بشدة إلى 5 = موافق بشدة)

2.4 إجراءات الصدق والثبات

• الصدق الظاهري والمحتوى: عرضت بنود المقياس على لجنة من المحكمين المتخصصين في القياس والتقويم, وعلم النفس الاجتماعي, وعلم الاجتماع؛ وذلك لتقويم مدى وضوح البنود وشموليتها، وصياغتها اللغوية, إضافة إلى مدى ارتباطها بالأبعاد النظرية للمقياس

• الصدق البنائي (العاملي): تم التحقق من البنية العاملية للمقياس من خلال التحليل العاملي الاستكشافي (EFA) باستخدام طريقة العوامل الكامنة، بهدف استخلاص الأبعاد الكامنة والتأكد من اتساقها مع البناء النظري

• الثبات: جرى التحقق من الثبات الداخلي للمقياس بحساب معامل ألفا كرونباخ لكل بُعد على حدة وللدرجة وللمقياس ككل، إلى جانب حساب معامل ماكدونالد أوميجا لزيادة دقة تقديرات الاتساق الداخلي.

• 2.5 إجراءات جمع البيانات

تـم إعـداد الاسـتبانة فـي صورتهـا النهائيـة بعـد التحكيـم، ثـم تحويلهـا إلـى نمـوذج إلكترونـي عبـر منصة Google Forms، مع إرفاق خطاب موافقة مستنيرة يوضح أهداف الدراسة, ويؤكد على سرية البيانـات وحـق المشـاركين فـي الانسـحاب فـي أي وقـت. بعـد ذلـك, جـرى توزيـع رابـط المقيـاس علـى الحجـاج والمعتمريـن المسـتهدفين مـن خلال قنـوات الاتصـال المتاحـة عبـر الحـملات والمجموعـات الاجتماعيـة

2.6 أساليب التحليل الإحصائي

• التحليل الوصفي: باستخدام المتوسطات و الانحرافات المعيارية لوصف استجابات أفراد العينة.

• التحليـل العاملـي الاستكشـافي: لتحديـد الأبعـاد الكامنـة للمقيـاس واختبـار مـدى مطابقتـا للبنـاء النظـري

• الثبـات الداخلـي: بحسـاب معامـل ألفـا كرونبـاخ ومعامـل ماكدونالـد أوميجـا للتحقـق مـن اتسـاق الأداة.

• اختبـارات الفـروق: تطبيـق اختبـار (t) لعينتيـن مسـتقلتين لدراسـة الفـروق وفقـاً لمتغيـري للنـوع والنسـك (حج/عمـرة)

3. النتائج والمناقشة

1.3 البنية العاملية للمقياس

للإجابة على السؤال الأول: ما أبعاد السلوك الجمعي للحشود في المشاعر المقدسة كما يقيسها المقيـاس المقترح؟

تـم التحقـق مـن الصلاحيـة البنائيـة للمقيـاس باسـتخدام التحليـل العاملـي الاستكشـافي بطريقـة المكونـات الرئيسـة (Principal Component Analysis) مـع التدويـر المائـل (oblimin) لافتـراض وجـود ارتبـاط بيـن الأبعـاد. وبلـغ حجـم العينـة (147) مشـاركاً

• بلغـت قيمـة Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) لمقيـاس كفايـة العينـة (0.851)، هـي قيمـة مرتفعـة تشـير إلـى ملاءمـة ممتـازة لإجـراء التحليـل العاملـي

• كمـا كان اختبـارBartlett's Test of Sphericity دالاً إحصائيـاً (χ^2 = 1850.88, df = 276, p < .001) مما يـدل علـى أن المصفوفـة الارتباطيـة مناسـبة للتحليـل العاملـي

أظهـرت نتائـج تحليـل القيـم الذاتيـة (Eigenvalues > 1) اسـتخراج أربعـة عوامـل رئيسـة، فسـرت مجتمعـة (60.99%) مـن التبايـن الكلـي، وهـي نسـبة جيـدة تبـرر اعتمـاد النمـوذج

وبتحليـل مصفوفـة النمـط (Pattern Matrix)، توزعـت االبنـود الأربـع والعشـرون علـى الأبعـاد الأربعـة علـى النحـو التالـي:

• البُعـد الأول (الالتـزام بالتعليمات): شمل 6 بنـود, بأوزان عاملية تراوحت بين (571 - 893).

• البُعـد الثانـي (السـلوك الانفعالـي أو الاندفاعـي): شـمل 6 بنـود, بـأوزان عاملية تراوحـت بيـن (608-832).

• البُعد الثالث (الاستجابة للمواقف الطارئة): شمل 6 بنود, بأوزان عاملية تراوحت بين (319-897).

• البُعـد الرابـع (السـلوك التعاونـي): شـمل 6 بنـود, ظهـرت بـأوزان سـالبة نتيجـة طبيعـة التدويـر المائـل، ممـا يشـير إلـى بعـد مسـتقل ذي دلالـة عكسـية.

جدول 2: ملاءمة العينة للتحليل العاملي وفق اختبار KMOو Bartlett's»

كايزر ميلر اولكين	مقياس كفاية العينة0.851
مربع كاي	1850.880
درجة الحرية	276
الدلالة	<0.001

جدول 3: القيم الذاتية ونسب التباين المفسَّرة للعوامل المستخرجة في المقياس

العامل	القيمة الذاتية	نسبة التباين	التباين التراكمي
1	7.462	31.09%	31.09%
2	3.654	15.22%	46.32%
3	2.118	8.83%	55.14%
4	1.405	5.86%	61.00%

2.3 الصدق والثبات

أولاً : حساب ثبات المقياس

للإجابة على السؤال الثاني: ما مدى ثبات المقياس المقترح لقياس سلوك الحشود في المشاعر المقدسة خلال موسم الحج والعمرة؟

1. الثبات باستخدام معامل ألفا كرونباخ: تم حساب معامل الاتساق الداخلي (ألفا كرونباخ) للأبعاد الأربعة للمقياس, وقد أشارت النتائج إلى أن جميع الأبعاد تمتع بمستوى مرتفع من الاتساق الداخلي, مما يشير إلى ثبات جيد للمقياس.

2. الثبات باستخدام معامل ماكدونالد أوميجا: جرى كذلك حساب معامل ماكدونالد أوميجا للتحقق من ثبات المقياس الكلي وأبعاده الفرعية, وقد جاءت النتائج داعمة لما توصلت إليه معاملات ألفا كرونباخ, حيث أشارت جميع القيم إلى مستويات مرتفعة من الثبات, بما يعزز الخصائص السيكومترية للمقياس

جدول 4: معاملات الثبات (كرونباخ ألفا وأوميجا) لأبعاد مقياس سلوك الحشود

البعد	عدد العبارات	معامل ألفا كرونباخ	معامل أوميجا
الالتزام بالتعليمات	6	0.89	0.89
السلوك التعاوني	6	0.83	0.83
السلوك الانفعالي	6	0.86	0.86
الاستجابة للمواقف الطارئة	6	0.81	0.82
المقياس الكلي	24	0.85	0.82

ثانياً : صدق المقياس

للإجابة على السؤال الثالث: ما مدى صدق المقياس المقترح لقياس سلوك الحشود في المشاعر المقدسة؟

1. الصدق الظاهري: تم عرض بنود المقياس في صورته الأولية المكونة من (24) بنداً موزعة على أربعة أبعاد على لجنة من الخبراء المتخصصين في القياس والتقويم, وعلم النفس الاجتماعي, وعلم الاجتماع, إضافة إلى بعض العاملين في خدمة ضيوف الرحمن (مرشدين, مسئولين, متطوعين). وقد تم تقويم البنود من حيث وضوح الصياغة, وارتباطها بالأبعاد النظرية, وشموليتها. وباستخدام معادلة كوبر, بلغت نسبة الاتفاق بين المحكمين (95٪) وهي نسبة عالية تشير إلى صدق محتوى ممتاز (هاشم وخليفة, 2027)

2. صدق البناء (الاتساق الداخلي): جرى التحقق من صدق بناء المقياس عبر حساب معاملات الارتباط بين درجات البنود والدرجة الكلية للأبعاد التي تنتمي إليها. و أظهرت النتائج أن جميع معاملات الارتباط كانت دالة احصائياً عند مستوى (0.05), مما يشير إلى اتساق البنود مع الأبعاد الخاصة بها

جدول 5: معاملات الارتباط بين عبارات بعد الالتزام بالتعليمات والدرجات الكلية

العبارة	معامل الارتباط بالبعد	معامل الارتباط بالمقياس الكلي
1	0.835	0.548
2	0.842	0.569
3	0.858	0.539
4	0.859	0.628
5	0.722	0.502
6	0.687	0.519

** مستوى دلالة أقل من 0.001

تشير نتائج الجدول رقم 5 معاملات الارتباط بين البنود وبعد «الالتزام بالتعليمات» تراوحت بين (0.678- 0.859). في حين تراوحت معاملات الارتباط بالدرجة الكلية للمقياس بين (0.519- 0.569). هذه النتائج تدعم قوة صدق البناء, وتؤكد أن جميع البنود ترتبط بدرجة دالة مع البعد الذي تقيسه, ومع المقياس الكلي كذلك.

جدول 6: معاملات الارتباط بين عبارات بعد السلوك التعاوني والدرجات الكلية

العبارة	معامل الارتباط بالبعد	معامل الارتباط بالمقياس الكلي
1	0.810	0.523
2	0.752	0.478
3	0.748	0.571
4	0.660	0.476
5	0.770	0.487
6	0.674	0.551

** مستوى دلالة أقل من 0.001

من خلال النتائج في الجدول رقم 6 يتضح أن معاملات الارتباط بين البنود وبعد «السوك التعاوني» تراوحت بين (0.674- 0.810). في حين تراوحت معاملات الارتباط بالدرجة الكلية للمقياس بين (0.476- 0.571). وهي قيم مرتفعة ذات دلالة إحصائية تعكس قوة الاتساق الداخلي, وتشير إلى أن جميع البنود مرتبطة بالبعد الذي تقيسه وبالمقياس الكلي بصورة متماسكة

7جدول: معاملات الارتباط بين عبارات بعد السلوك الاندفاعي والدرجات الكلية

العبارة	معامل الارتباط بالبعد	معامل الارتباط بالمقياس الكلي
1	0.627	0.442
2	0.797	0.545
3	0.731	0.567
4	0.832	0.563
5	0.817	0.521
6	0.768	0.492

** مستوى دلالة أقل من 0.001

من خلال النتائج في الجدول رقم 7 يتضح أن معاملات الارتباط بين البنود وبعد» السلوك الاندفاعي» تراوحت بين (0.627- 0.832). في حين تراوحت معاملات الارتباط بالدرجة الكلية للمقياس بين (0.442- 0.567). وجميعها قيم موجبة ودالة إحصائياً عند مستوى (001. > p). تشير هذه النتائج إلى أن جميع العبارات تقيس البعد بفاعلية، مما يعكس صدق بناء مرتفع لهذا البُعد

جدول 8: معاملات الارتباط بين عبارات بعد الاستجابة للمواقف الطارئة والدرجات الكلية

العبارة	معامل الارتباط بالبعد	معامل الارتباط بالمقياس الكلي
1	0.621	0.482
2	0.722	0.379
3	0.789	0.438
4	0.846	0.515
5	0.787	0.466
6	0.626	0.455

** مستوى دلالة أقل من 0.001

من خلال النتائج في الجدول رقم 8 يتضح أن معاملات الارتباط بين البنود وبعد «الاستجابة للمواقف الطارئة» تراوحت بين (0.621- 0.846). في حين تراوحت معاملات الارتباط بالدرجة الكلية للمقياس بين (0.379- 0.515). هذه النتائج تدعم قوة صدق البناء, وتؤكد أن جميع البنود ترتبط بدرجة دالة مع البعد الذي تقيسه, ومع المقياس الكلي كذلك.

3. صدق البناء الكلي: كما تم التحقق من ارتباط كل بعد مع المجموع الكلي للمقياس تم التحقق كذلك من معاملات الارتباط بين الأبعاد الأربعة والدرجة الكلية للمقياس، وكانت جميعها دالة عند (p < .001) كما في الجدول أدناه

جدول 9: معاملات الارتباط بين الأبعاد الأربعة والدرجة الكلية للمقياس

البعد	معامل الارتباط
الالتزام بالتعليمات	0.686
السلوك التعاوني	0.687
السلوك الانفعالي	0.685
الاستجابة للمواقف الطارئة	0.625

3.3 مؤشرات سلوك الحشود

للإجابة على السؤال الرابع: ما مستوى تحقق أبعاد سلوك الحشود (الالتزام، التعاون، الاندفاع، الاستجابة للطوارئ) لدى المشاركين في موسم الحج والعمرة؟

تم حساب المتوسطات والانحرافات المعيارية لأبعاد المقياس, وأظهرت النتائج أن أعلى متوسط تحقق في بعد الالتزام بالتعليمات (M = 4.72, SD = 0.44)، يليه بُعد السلوك التعاوني (M = 4.61, SD = 0.48)، مما يعكس التزام الحجاج والمعتمرين بدرجة عالية بالتعليمات التنظيمية وتعاونهم أثناء أداء المناسك

أما بُعد السلوك الاندفاعي/الانفعالي فقد جاء بمتوسط منخفض (M = 2.98, SD = 0.99)، وهو ما يشير إلى انخفاض شدة التصرفات الاندفاعية بين أفراد العينة. في المقابل, حقق بُعد الاستجابة للمواقف الطارئة فحقق متوسطاً مرتفعاً نسبياً (M = 4.42, S = 0.54), مما يدل على استعداد الحجاج والمعتمرين للتعامل مع المواقف الطارئة بكفاءة. كما تُظهر قيم معاملات الالتواء أن التوزيع في معظم الأبعاد مائل نحو القيم العليا، وهو ما يعكس نزعة إيجابية واضحة لدى أفراد العينة.

جدول 10: المؤشرات الإحصائية الوصفية (المتوسطات, الانحرافات المعيارية, معاملات الالتواء) لأبعاد مقياس سلوك الحشود (ن = 147)

البعد	عدد العبارات	أقل قيمة	أعلى قيمة	المتوسط	الانحراف المعياري	الالتواء
الالتزام بالتعليمات	6	1.83	5.00	4.721	0.438	2.68-
السلوك التعاوني	6	3.17	5.00	4.611	0.481	0.96-
السلوك الاندفاعي	6	1.00	5.00	2.983	0.989	12.-
الاستجابة للمواقف الطارئة	6	3.00	5.00	4.417	0.541	0.57-

4.3 الفروق بين المجموعات

أولاً : الفروق حسب النوع

للإجابة عن السؤال الخامس: هل توجد فروق دالة إحصائياً في درجات سلوك الحشود تُعزى إلى متغير النوع؟

أجري اختبار ت لعينتين مستقلتين (t-test) لفحص الفروق بين الذكور والإناث في أبعاد مقياس سلوك الحشود الأربعة (الالتزام بالتعليمات، السلوك التعاوني، السلوك الاندفاعي، والاستجابة للمواقف الطارئة). وقد أظهرت النتائج

• الالتزام بالتعليمات: لم تُظهر النتائج فروقاً دالة إحصائياً بين الذكور (M = 4.68) والإناث (M = 4.75)، حيث بلغت قيمة .(t = -0.957, p > .05) و يشير ذلك إلى أن كلا الجنسين أظهر مستوى مرتفعاً من الالتزام بالتعليمات دون فروق جوهرية

• السلوك التعاوني: لم تظهر فروق دالة احصائياً بين الذكور (M = 4.63) والإناث (M = 4.60)، حيث بلغت قيمة .(t = 0.393, p > .05) وهذا يشير إلى تقارب الجنسين في ممارسة السلوكيات التعاونية داخل الحشود

• السلوك الاندفاعي/ الانفعالي: ظهرت فروق دالة إحصائياً عند مستوى (p < .05) بين الجنسين, حيث سجّل الذكور متوسطاً أقل (M = 2.83) مقارنة بالإناث (M = 3.11) ، مع قيمة .(t = -1.714, p = .044) مما يشير إلى أن الذكور أقل اندفاعاً انفعالياً من الإناث في مواقف الحشود، وهو ما قد يُعزى إلى مستويات أعلى من التحكم الانفعالي لدى الذكور

• الاستجابة للمواقف الطارئة: رغم وجود فرق عددي بين الذكور (M = 4.50) والإناث (M = 4.35)، إلا أن الفروق لم تكن دالة إحصائياً .(t = 1.628, p > .05)مما يشير إلى أن النوع لا يؤثر بشكل جوهري في القدرة على الاستجابة الفورية في مواقف الطوارئ

جدول 11: نتائج اختبار (t) لعينتين مستقلتين بين الذكور والإناث في أبعاد مقياس سلوك الحشود

البعد		المتوسط	الانحراف المعياري	ت	درجات الحرية	مستوى الدلالة	
الالتزام بالتعليمات	ذكر	4.68	0.519	0.957	145	.170	غير دال
	أنثى	4.75	0.354				
السلوك التعاوني	ذكر	4.63	0.489	0.393	145	.348	غير دال
	أنثى	4.60	0.474				
السلوك الاندفاعي	ذكر	2.83	0.952	1.714-	145	.044	دال
	أنثى	3.11	1.007				
الاستجابة للمواقف الطارئة	ذكر	4.50	0.496	1.628	145	.053	غير دال
	أنثى	4.34	0.572				

ثانياً : الفروق حسب النسك

للإجابة عن السؤال السادس: هل توجد فروق دالة إحصائياً في درجات سلوك الحشود تُعزى إلى متغير النسك (الحج/العمرة)؟

أجري اختبار ت لعينتين مستقلتين (t) لفحص الفروق بين الحجاج والمعتمرين في أبعاد مقياس سلوك الحشود, وأظهرت النتائج ما يلي

• الالتزام بالتعليمات والسلوك التعاوني: لم تظهر النتائج فروقاً دالة إحصائياً بين الحجاج والمعتمرين في هذين البعدين.(p > .05) مما يعكس مستوى متقارباً من الالتزام والتعاون بين المجموعتين

• السلوك الاندفاعي/ الانفعالي: أظهرت النتائج فروقاً دالة إحصائياً بين الحجاج والمعتمرين, حيث سجل الحجاج متوسطاً أعلى (M = 3.15) مقارنة بالمعتمرين (M = 2.85)، وبلغت قيمة t = 1.853)، و033. = p). مما يشير إلى أن الحجاج أظهروا سلوكاً اندفاعياً أعلى مقارنة بالمعتمرين

• الاستجابة للمواقف الطارئة: أظهرت النتائج فروقاً دالة احصائياً بين الحجاج والمعتمرين لصالح المعتمرين، حيث سجل المعتمرين متوسطاً أعلى ((M = 4.50 مقارنة بالحجاج ((M = 4.31, وبلغت قيمة (t =2.155, p =.016). مما يدل على أن المعتمرين أظهروا استجابة أفضل للمواقف الطارئة من الحجاج.

جدول 12: نتائج اختبار (t) لعينتين مستقلتين بين الحجاج والمعتمرين في أبعاد مقياس سلوك الحشود

البعد		المتوسط	الانحراف المعياري	ت	درجات الحرية	مستوى الدلالة	
الالتزام بالتعليمات	حاج	4.75	0.335	0.700	145	243.	غير دال
	معتمر	4.69	0.509				
السلوك التعاوني	حاج	4.59	0.428	-0.510	145	305.	غير دال
	معتمر	4.63	0.521				
السلوك الاندفاعي	حاج	3.15	0.984	1.853	145	033.	دال
	معتمر	2.85	0.978				
الاستجابة للمواقف الطارئة	حاج	4.31	0.591	-2.155	145	016.	دال
	معتمر	4.50	0.482				

5. مناقشة النتائج

1.5 البنية العاملية للمقياس

أظهرت نتائج التحليل العاملي الاستكشافي أن المقياس يتكون من أربعة أبعاد رئيسة هي: الالتزام بالتعليمات، السلوك التعاوني، السلوك الاندفاعي، والاستجابة للمواقف الطارئة. وهو ما يتسق مع الدراسات السابقة التي أكدت الطابع متعدد الأبعاد لسلوك الحشود في موسم الحج والعمرة. فعلى سبيل المثال, أوضحت دراسة Abdul Rahman et al. (2017) أن السلوك الجمعي للحشود يتوزع على أبعاد مختلفة تعكس الطاعة للتعليمات الرسمية، التعاون بين الأفراد، أنماط الانفعال، والاستجابة للمواقف المفاجئة. كما دعمت نتائج دراسة الكشكي (2023) الصدق العاملي للنسخة العربية من مقياس سلوك الحشود, مؤكدة وجود مؤكدة وجود هذه الأبعاد المتمايزة

تؤكد هذه النتائج أن سلوك الحشود ليس ظاهرة أحادية البُعد، بل يتكون من مزيج معقد من العوامل السلوكية والانفعالية والتنظيمية، وهو ما يعزز صلاحية المقياس الحالي. كما أن استخراج أربعة أبعاد مترابطة يدعم الرؤية النظرية القائلة بأن التنظيم الذاتي للحشود في الحج والعمرة يتأثر بمحددات نفسية واجتماعية، بجانب المحددات الفيزيائية والتنظيمية. وهذا يتماشى مع ما أشار إليه Yalcin & Hopkins (2024) حول دور الهوية المشتركة والدعم المتبادل في ضبط سلوك الحشود وتحقيق الانسجام وسط الزحام

2.5 الصدق والثبات

أظهرت نتائج التحليل أن معاملات الثبات (كرونباخ ألفا وأوميجا) كانت مرتفعة لجميع الأبعاد، مما يعكس مستوى عالياً من الاتساق الداخلي ويؤكد إمكانية الاعتماد على المقياس في قياس سلوك الحشود بدقة. كذلك دعمت معاملات الارتباط بين البنود وأبعادها، وبين الأبعاد والدرجة الكلية للمقياس، صدق البناء؛ إذ أشارت جميع القيم إلى ارتباطات موجبة ودالة إحصائياً ، وهو ما يعزز من صلاحية المقياس على المستوى البنائي

وتتوافق هذه النتائج مع ما أشار إليه Helbing وزملاؤه (2007) حول أهمية امتلاك أدوات سيكومترية مقننة لدراسة السلوك الجمعي في البيئات ذات الكثافة البشرية العالية، مثل الحج، لما لذلك من دور أساسي في تعزيز سلامة الحشود وتحسين استراتيجيات التنظيم والإدارة

3.5 مستوى تحقق الأبعاد

أوضحت النتائج أن أعلى متوسطين كانا في بُعدي الالتزام بالتعليمات والسلوك التعاوني، مما يدل على أن الحجاج يلتزمون بدرجة عالية بالتعليمات التنظيمية ويُظهرون مستوى ملحوظًا من التعاون. وهذه النتيجة تتسق مع ما توصل إليه Alnabulsi and Drury (2014) من أن الهوية الجماعية المشتركة تعزز الانضباط والسلوكيات التعاونية داخل الحشود. كما تدعم ما أشار إليه Yalcin and Hopkins (2024) من أن الهوية المشتركة توفر إطاراً مرجعياً يساعد أعضاء المجموعة على التعرف على اهتمامات واحتياجات بعضهم البعض المرتبطة بالهوية، بما يسهم في تقديم أشكال متعددة من الدعم النفسي والمادي والمعلوماتي والسلوكي. ويُظهر التصرف وفق الهوية الاجتماعية في بيئات مليئة بالتحديات أنه إنجاز جماعي يعتمد بصورة أساسية على الدعم المتبادل بين الأفراد

في المقابل، جاء بُعد السلوك الاندفاعي بمتوسط منخفض، وهو ما يعكس انخفاض النزعات الفردية غير المنضبطة داخل الحشود، ويدعم ما ذكره Yalcin and Hopkins (2024) حول دور الهوية المشتركة في الحد من السلوكيات الفوضوية. كما تتفق هذه النتيجة مع ما توصلت

إليـه دراسـة الكشـكي ((,2023 حيـث أظهـر المشـاركون مسـتويات مرتفعـة مـن الالتـزام بالتعليمـات والتعـاون، مقابـل انخفـاض فـي السـلوك الاندفاعـي

أما بُعد الاستجابة للمواقف الطارئة فقد حقق متوسطاً مرتفعاً نسبياً ، ما يشير إلى ارتفاع مستوى وعي الحجاج بالإجراءات الوقائية وفعالية برامج التوعية المقدمة لهم من قبل الجهات المختصة

4.5 الفروق بين الذكور والإناث

لم تُسجّل فروق دالة احصائياً بين الذكور والإناث في معظم أبعاد المقاس (الالتزام بالتعليمات، السلوك التعاوني، والاستجابة للمواقف الطارئة)، مما يعكس تقارباً كبيراً في هذه الجوانب السلوكية بين الجنسين. ويتفق ذلك مع دراسات الهوية الاجتماعية في الحج, التي أشارت إلى أنّ تعزيز الهوية الجمعية يخفّف من أثر الكثافة على إدراك المخاطر ويحد من السلوك غير المنظّم، ما يفسّر تقارب الجنسين في أبعاد الالتزام والتعاون والاستجابة للطوارئ .(Alnabulsi & Drury, 2014)

غير أن النتائج كشفت عن وجود فروق دالة في بُعد السلوك الاندفاعي, حيث سجلت الإناث متوسطات أعلى من الذكور, وهو ما يشير إلى أن الإناث قد يكنّ أكثر تعبيراً عن انفعالاتهن في مواقف الازدحام، بينما يميل الذكور إلى إظهار مستويات أعلى من التحكم الانفعالي في مثل هذه السياقات

وتتفق هذه النتيجة مع ما كشفت عنه دراسات سابقة فيما يتعلق بفروق النوع في السلوك الانفعالي داخل الحشود. فعلى سبيل المثال، أظهرت دراسة(2015) .Bai et al أن الإناث أكثر حساسية للفوضى البصرية في الحشود وأكثر دقة في تقديرها، مما قد يعزز ميلهن للتعبير عن انفعال أو اندفاع أكبر في مواقف الزحام. كما أشارت دراسة (2018) .Alsolam et al إلى أن الإناث من الحجاج يشعرن بمستوى ازدحام أكبر, ويكون تأثير هذا الإحساس النفسي والعاطفي أشد مقارنة بالذكور, وهو ما قد يفسر الفروق الملاحَظة في بُعد السلوك الاندفاعي لصالح الإناث. اضافة إلى ذلك, أوضحت دراسة حديثة أنّ الخبرات والتحديات التي تواجهها الحاجّات تختلف عن نظرائهن الذكور (بدنياً وثقافياً وأمنياً)، ما قد ينعكس على شدة الاستثارة الانفعالية أو سرعة التعبير عنها في مواقف الضغط .(Rosana, 2025) وتدعم نتائج دراسة Gunlu & Okumus (2010) هذا الاتجاه, إذ أشارا إلى أن الحج قد يكون أشدّ مشقة على النساء بسبب الحرارة، الكثافة، وصعوبات الحركة في الأماكن المزدحمة, وهي عوامل تزيد من العبء الانفعالي وترفع احتمالات السلوك الاندفاعي عند التعرض لمثيرات حادة.

ورغم ذلك، يمكن القول إن هذه الفروق تبقى محدودة نسبياً ولا تؤثر على البنية العامة للسلوك الجمعي، إذ أظهر كلا الجنسين أمستويات عالية من الالتزام والتعاون، واستجابات إيجابية تجاه المواقف الطارئة، وهو ما يعزز الطابع المشترك للسلوك الجمعي في بيئة الحج والعمرة

5.5 الفروق بين الحجاج والمعتمرين

أظهرت النتائج تفوّ ق المعتمرين في بُعد الاستجابة للمواقف الطارئة مقارنة بالحجاج. ويُفسَّر ذلك بأن العمرة, بحكم انتظامها على مدار العام وانخفاض كثافتها في معظم الشهور, توفّر حيّز حركة أكبر وزمن استجابة أفضل، بخلاف موسم الحج الذي تبلغ فيه الكثافة ذروتها ويشتد فيه الضغط الزمني والتنظيمي، بما يحدّ من المناورة ويزيد عبء اتخاذ القرار تحت الإكراه. يتوافق هذا التفسير مع أدبيات طبّ الحشود التي تُبرز اختلاف طيف المخاطر بين الحج والعمرة, وأن العمرة بيئة "أقل تقييداً وأكثر قابلية للإدارة" مقارنة بالحج، من حيث النفاذ للمواقع والضغط التشغيلي والكثافة البشرية (Yezli et al., 2017). كما تُظهر الدراسات الحديثة في رؤية الحاسوب المطبقة على مشاهد الحج قدرة النماذج على تمييز مستويات الاكتظاظ وأنماط التدفق، وأن ارتفاع الكثافة يرتبط بتراجع السلامة التشغيلية وطول زمن الاستجابة.(Bhuiyan et al., 2022)

وبالمقابل، جاءت فروق السلوك الاندفاعي قريبةً من الدلالة (وباتجاه أعلى لدى الحجاج)، وهو اتجاهٌ منطقي في ضوء ما تُبيّنه دراسات ديناميات الحشود من أن الكثافة المرتفعة والضغط الزمني يرفعان احتمالية السلوكيات الاندفاعية والاضطرابات الموضعية في التدفق .(Helbing et al., 2007) وتظهر أدلة التشغيل والجدولة أن إدارة الطاقة الاستيعابية وتوزيع الحشود زمنياً تسم في خفض المخاطر عند الذروات, ما يفسر حساسية الحج لهذه العوامل مقارنة بالعمرة .(Haase et al., 2019)

كما أشارت النتائج إلى عدم وجود فروق دالة إحصائياً بين الحجاج والمعتمرين في بُعدي الالتزام بالتعليمات والسلوك التعاوني. وتتسق هذه النتيجة مع دراسات الهوية الاجتماعية في الحج, إذ تظهر أن تعزيز الهوية الجمعية يُخفف من أثر الكثافة ويقوي السلوك المنظم, بما يفسر المستويات المرتفعة والمتقاربة من الالتزام والتعاون في كلا المجموعتين.(Alnabulsi & Drury, 2014)

6.5 الدلالات النظرية والتطبيقية

تُبرز نتائج هذه الدراسة أهمية الدمج بين المنظور النفسي-السلوكي والدراسات التطبيقية في مجال إدارة الحشود

• من الناحية النظرية: تعزّ ز النتائج الفرضية التي تؤكد أن الهوية الاجتماعية المشتركة تسهم في تعزيز الانضباط والتعاون بين أفراد الحشود، بما يدعم الإطار النظري الذي يفسر السلوك الجمعي في البيئات الكثيفة

• من الناحية التطبيقية: توفّر هذه النتائج للجهات التنظيمية أداة قياس سيكومترية مقننة يمكن الاستفادة منها في تصميم برامج تدريبية وتوعوية تستهدف رفع مستوى الالتزام والتعاون، وتقليل السلوكيات الاندفاعية، بما يسهم في تحسين فاعلية إدارة الحشود وضمان سلامتهم. كما تدعم هذه النتائج جهود المملكة العربية السعودية في الارتقاء بخدمات الحج والعمرة، بما ينسجم مع مستهدفات رؤية 2030 الرامية إلى تحسين تجربة ضيوف الرحمن من خلال تبني حلول علمية ومنهجيات مبتكرة لإدارة الحشود

6. الخلاصة

هدفت هذه الدراسة إلى تطوير مقياس سيكومتري لقياس سلوك الحشود في المشاعر المقدسة والتحقق من خصائصه السيكومترية. وأسفرت التحليلات عن بنية عاملية رباعية تضم: الالتزام بالتعليمات، السلوك التعاوني، السلوك الاندفاعي/الانفعالي، والاستجابة للمواقف الطارئة، مع مؤشرات مرتفعة للصدق والثبات. وعلى مستوى المؤشرات الوصفية سجّل بعدا الالتزام والتعاون أعلى المتوسطات، فيما كان السلوك الاندفاعي/الانفعالي منخفضاً نسبياً ، وبلغت الاستجابة للطوارئ متوسطاً مرتفعاً .

كما كشفت الفروق الديموغرافية أن الذكور أقل اندفاعاً من الإناث، في حين أظهر المعتمرون استعداداً أعلى للاستجابة للطوارئ مقارنة بالحجاج، دون فروق دالة في الالتزام والتعاون بين المجموعتين. وتُعزِّ ز هذه النتائج فرضية الهوية الاجتماعية المشتركة بوصفها إطاراً مُنظِّماً يعزّ ز الانضباط والتعاون ويحدّ من السلوكيات الفوضوية في الحشود الدينية. وتضيف الدراسة بُعداً

تطبيقياً يتمثّل في إتاحة أداة مقنّنة قابلة للتوظيف في تصميم برامج تدريبية وتوعوية ترفع الالتزام والتعاون وتحدّ من الاندفاع، بما ينسجم مع مستهدفات رؤية السعودية 2030 لتحسين تجربة ضيوف الرحمن

7. التوصيات

استناداً إلى نتائج الدراسة، يمكن تقديم التوصيات الآتية:

1. تطوير البرامج التدريبية والتوعوية: اعداد برامج موجهة للحجاج والمعتمرين تركز على تعزيز الالتزام بالتعليمات التنظيمية, وتنمية السلوكيات التعاونية، والحد من السلوكيات الاندفاعية والانفعالية.
2. استخدام المقياس المطوَّر: استخدام المقياس المطور كأداة قياس سيكومترية مقننة من قِبل الجهات التنظيمية والبحثية لتشخيص أنماط السلوك الجمعي، والتنبؤ بالمواقف الحرجة في المشاعر المقدسة.
3. دمج البعد النفسي-السلوكي في الخطط التنظيمية: الاستفادة من نتائج الدراسة في تصميم استراتيجيات وقائية تستند إلى المعطيات النفسية-السلوكية، بجانب النماذج الحاسوبية لإدارة الحشود
4. توسيع نطاق الدراسات المستقبلية: اجراء دراسات مستقبلية تشمل عينات أكبر وأكثر تنوعاً من حيث الثقافات والجنسيات، بما يعكس التنوع الواسع للحشود في الحج.
5. إجراء دراسات طولية ومقارنة: اجراء دراسات طولية ومقارنة بين مواسم الحج المختلفة لرصد التغيرات في أنماط السلوك الجمعي، وتقييم فاعلية التدخلات التنظيمية على المدى البعيد

المراجع

- الكشكي, مجدة السيد (2023). البنية العاملية والخصائص السيكومترية للنسخة العربية لمقياس سلوك حشود الحجيج. مجلة البحث العلمي في الآداب. 24(4), 214-244 DOI: 10.21608/JSSA.2023.207183.1500
- هاشم, كمال الدين محمد, والخليفة, حسن جعفر (2017). التقويم التربوي: مفهومه, أساليبه, مجالاته, توجيهاته الحديثة. مكتبة الرشد.
- Abdul Rahman, S., Mohd Mahudin, N., Saad, Z., Sulong, J., Hatta, Z., Hashimah, I., & Abdul Ghani, N.(2014, August). Content validation of scales assessing psychological antecedents of crowds among Hajj pilgrims. In International Social Development Conference (ISDC) Proceedings (1–12). International University Malaysia.
- Abdul Rahman, S., Mohd Mahudin, N., Saad, Z., Sulong,J., Hatta, Z., Hashimah, I., Abdul Ghani, N.(2017). Item generation and content validation of the Hajj crowd behavior (HBC) scale. International Journal of Behavior Science. 12(2), 19-30.
- Almaatouq, A., Rahimian, M. A., Burton, J. W., & Alhajri, A. (2022). The distribution of initial estimates moderates the effect of social influence centralization on crowd wisdom. Scientific Reports, 12(2461). https://doi.org/10.1038/s41598-022-06181-2.
- Alnabulsi H, Drury J. (2014). Social identification moderates the effect of crowd density on safety at the Hajj. Proc Natl Acad Sci U S A. 111(25), 9091-9096. doi: 10.1073/pnas.14049-53111.
- Alsolami, B., Embi, M. R., Majrashi, A. A., & Karban, A. S. (2018). Assessing the effects of crowding perception and gender among Southeast Asia pilgrims in Mina, Saudi Arabia. International Journal of Engineering & Technology, 7(2.29), 1137-1141.
- Alzeer, A. & Abuznadah, J.(2024). Beyond borders: Exploring the mental, emotional, and spiritual significance of Hajj. Annals of Thoracic Medicine. 19(3),179-189. doi: 10.4103/atm.atm_72_24.
- Bai, Y., Siemann, O., Piatkowski, T., & Chelmins, C.(2015). Gender differences in crowd perception. Computers in Human Behavior, 50, 322-327. doi: 10.3389/fpsyg.2015.01300.
- Bhuiyan, M. R., Abdullah, J., Hashim, N., Al Farid, F., Haque, M. A., Uddin, J., Isa, W. N. M., Husen, M. N., & Abdullah, N.(2022). A deep crowd density classification model for Hajj pilgrimage using fully convolutional neural network. PeerJ Computer Science, 8: e895. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.895.
- Gunlu, E., & Okumus, F.(2010). The Hajj: Experience of Turkish female pilgrims. In N. Scott & J. Jafari (Eds.), Tourism in the Muslim world: Bridging tourism theory and practice, 2, 221-233. Emerald Group Publishing Limited. https://doi.org/10.1108/S2042-1443(2010)0000002017 .
- Haase, K., Kasper, M., Koch, M., & Müller, S.(2019). A pilgrim scheduling approach to increase safety during the Hajj. Operations Research, 67(2), 376-406. https://doi.org/10.1287/opre.2018.1798.
- Helbing, D., Johansson, A., & Al-Abideen, H. Z.(2007). Dynamics of crowd disasters: An empirical study. Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 75(4), 046-109.
- Rosana, S. S., Azizah, N., & Edayanti, E.(2025). Exploring gender dynamics in Hajj research: A bibliometric review. Journal of Islamic World and Politics, 9(1), 31–44. https://doi.org/10.18196/jiwp.v9i1.178.
- Yalcin, E., & Hopkins, N.(2024). The role of identity‐related beliefs in the appraisal and management of crowding: Insights from the hajj. British Journal of Social Psychology, 63(1), 362-377.
- Yalcin, E., & Hopkins, N.(2025). Identity enactment as a social accomplishment: Shared identity and the provision of mutual support amongst pilgrims undertaking the Hajj. British Journal of Social Psychology, 64(2), e12796.
- Yezli, S., Yassin, Y., Awam, A., Attar, A., Al-Jahdali, E., & Alotaibi, B.(2017). Umrah. An opportunity for mass gatherings health research. Saudi Medical Journal, 38(8), 868-871. https://doi.org/10.15537/smj.2017.8.20124.

إدارة الكفاءات واستدامة الأداء القيادي: دراسة تطبيقية على شركات مقدمي الخدمة في موسم الحج

عمار بن علي الوليدي - قسم القيادة والسياسات التربوية، جامعة الملك خالد

Competency Management and Sustainable Leadership Performance: An Applied Study on Service Providers during Hajj Season

Ammar Ali Alwaleedi - Department of Educational Leadership and Policies, King Khalid University
*Corresponding author: E-mail (ammar.alwaleedi@gmail.com)

الملخص

هدفت هذه الدراسة إلى الكشف عن مستوى توافر عمليات إدارة الكفاءات في تعزيز استدامة الأداء القيادي لخدمة ضيوف الرحمن لدى شركات مقدمي الخدمة للحجاج، باعتبارها بيئة موسمية تتسم بكثافة تشغيلية عالية، بالإضافة إلى اقتراح آليات عملية لتفعيل إدارة الكفاءات بما يضمن استمرارية الأداء القيادي. اعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي، واستخدمت الاستبانة أداةً لجمع البيانات، حيث جرى تطبيقها على هينة مكونة من (51) قائداً إدارياً يمثلون الرؤساء التنفيذيين ومديري التشغيل والعمليات والموارد البشرية والتخطيط في (25) شركة من شركات مقدمي خدمة حجاج الخارج

أظهرت نتائج الدراسة الميدانية تفاوت درجة توافر عمليات إدارة الكفاءات بين الأبعاد الأربعة. فقد سجل بُعد استقطاب الكفاءات أعلى متوسط عام (3.29)، حيث جاءت أعلى فقرة «تحدد الشركة احتياجاتها من الكفاءات البشرية لشغل الوظائف القيادية الشاغرة» بمتوسط (3.51)، وجاء بُعد تنمية الكفاءات في المرتبة الثانية بمتوسط عام (3.12)، وكانت أعلى فقرة «توضح الشركة الأهداف الأساسية للبرامج التدريبية» بمتوسط (3.22). أما بُعد الاحتفاظ بالكفاءات فقد سجل متوسطاً عاماً (2.97)، وكانت أعلى فقرة «تحتفظ الشركة بالقادة المتميزين لديها» بمتوسط (3.31)، في حين كان بُعد التعاقب الوظيفي الأدنى بمتوسط عام (2.87)، وكانت أعلى فقرة «تستثمر الشركة في إعداد كفاءاتها الداخلية لتولي أدوار مستقبلية» بمتوسط (2.96). كما أظهرت النتائج أنه لا توجد فروق معنوية في تقييم إدارة الكفاءات وفق طبيعة العمل أو سنوات الخبرة

وخلصت الدراسة إلى جملة من التوصيات أبرزها: إعداد دليل للكفاءات القيادية الموسمية يحدد بوضوح الجوانب الأساسية المطلوبة لشغل المناصب القيادية، وضع خطط استراتيجية للتعاقب الوظيفي تشمل: تحديد المناصب القيادية الحرجة، ترشيح بدائل داخلية وتدريبهم عبر برامج إعداد قيادي موسمية، تبني آليات نقل خبرة رسمية من القادة الحاليين (مثل الإرشاد والتوجيه المباشر).

الكلمات الدالة: إدارة الكفاءات، استدامة الأداء القيادي، شركات مقدمي الخدمة، برنامج خدمة ضيوف الرحمن، التعاقب الوظيفي

Abstract

This study aimed to investigate the availability of competency management processes in enhancing the sustainability of leadership performance in serving the Guests of Allah (Hajj pilgrims) within service-providing companies, which operate in a highly intensive seasonal environment. It also sought to propose practical mechanisms to activate competency management in order to ensure continuity of effective leadership. The study adopted a descriptive methodology and employed a questionnaire as the primary instrument for data collection, administered to 51 executive leaders, including chief executive officers, operations managers, human resources managers, and planning managers, across 25 companies providing services to international pilgrims.

The results of the field study showed a variation in the availability of competency management processes across the four dimensions. The talent attraction dimension recorded the highest overall mean of (3.29), with its highest item being "The Company determines its human competency needs to fill vacant leadership positions," which had a mean of (3.51). The competency development dimension ranked second with an overall mean of (3.12), and its highest item was "The Company clarifies the main objectives of training programs," with a mean of (3.22). The talent retention dimension had an overall mean of (2.97), with its highest item being "The Company retains its outstanding leaders," at a mean of (3.31). Meanwhile, the succession planning dimension recorded the lowest overall mean of (2.87), with its highest item being "The company invests in preparing its internal talents to take on future roles," at a mean of (2.96). The results also showed that there were no significant differences in the evaluation of competency management based on the type of work or years of experience.

The study concluded with key recommendations, including the development of a standardized seasonal leadership competency framework to guide recruitment and evaluation, the adoption of strategic succession plans to prepare qualified internal successors, and the implementation of formal knowledge transfer mechanisms such as mentoring and direct coaching to ensure leadership sustainability.

Keywords: Competency Management, Sustainable Leadership Performance, Service Provider Companies, Pilgrim Experience Program, Succession Planning.

1. مقدمة

يمثل موسم الحج أكبر تجمع بشري سنوي للمسلمين، ويستدعي حشد جهود القطاعات الحكومية والخاصة في المملكة لتقديم خدمات متكاملة لضيوف الرحمن. وفي إطار رؤية المملكة 2030، تم إطلاق برنامج خدمة ضيوف الرحمن بهدف توفير خدمات عالية الجودة للحجاج والمعتمرين، مع التركيز على تطوير الكفاءات البشرية كأحد المحركات الأساسية لضمان جودة الخدمة (برنامج خدمة ضيوف الرحمن، 2021، ص.16)

وقد شهدت شركات مقدمي خدمات الحجاج تحولاً جوهرياً بعد قرار مجلس الوزراء رقم (454) بتاريخ 1440/9/16هـ، الذي أعاد هيكلتها من مؤسسات أفراد إلى شركات لرفع كفاءتها التشغيلية وتطوير مستوى العاملين فيها (هيئة الخبراء بمجلس الوزراء، 1440). ويعكس هذا التوجه أهمية الاستثمار في رأس المال البشري، خاصة في القطاعات الموسمية ذات الكثافة التشغيلية العالية

كما برز خلال العقود الأخيرة توجه في إدارة الموارد البشرية للتحول من الأنظمة التقليدية القائمة على الوظائف إلى أنظمة قائمة على الكفاءات، لضمان استدامة الأداء المؤسسي وتعزيز الابتكار والكفاءة التشغيلية (Chine et al., 2023; Suksawas et al., 2023). ويكتسب هذا التحول أهمية خاصة في البيئات الموسمية مثل قطاع خدمات الحج، حيث قد يؤدي تغيّر القيادات أو تفاوت كفاءتها إلى تراجع الأداء واستقرار العمل المؤسسي (Samuel & Isa, 2024)

ورغم الجهود المبذولة لتطوير رأس المال البشري في هذا القطاع، لا تزال هناك تحديات في ضمان استدامة الأداء القيادي، إذ يؤدي تغيّر القيادات وتفاوت مستويات الكفاءة إلى صعوبة الحفاظ على الخبرة المؤسسية وتطويرها

وانطلاقاً مما سبق، تهدف هذه الورقة إلى استقصاء دور إدارة الكفاءات في استدامة الأداء القيادي بشركات مقدمي الخدمة خلال موسم الحج، من خلال تحليل إسهام المدخل القائم على الكفاءات في تطوير القيادات الموسمية والحفاظ على استمرارية أدائها الفعال، بما يتوافق مع أهداف برنامج خدمة ضيوف الرحمن ورؤية المملكة 2030.

مشكلة البحث:

تُعد القيادة جوهر العملية الإدارية وركيزة أساسية لنجاح المنظمات، وتبرز أهميتها بصورة أكبر في البيئات الموسمية عالية الكثافة مثل موسم الحج، حيث تصبح القيادة الفعّالة عنصراً حاسماً لضمان جودة الخدمات واستمراريتها. غير أن طبيعة العمل الموسمي في شركات مقدمي الخدمة تؤدي إلى تغيّر مستمر في القيادات العاملة بحكم ارتباط هذه الوظائف بإطار زمني محدود، الأمر الذي يترتب عليه فقدان الخبرات القيادية المتراكمة وصعوبة الحفاظ على استمرارية الأداء الفعّال من عام إلى آخر. ونتيجة لذلك تنشأ فجوة تنظيمية ومعرفية تحد من قدرة هذه الشركات على بناء قاعدة قيادية مستقرة وقادرة على تلبية متطلبات بيئة العمل المعقدة

وفي هذا الإطار يمثل تطوير الموارد البشرية القائم على الكفاءة استثماراً استراتيجياً في رأس المال البشري باعتباره الأصل الرئيس للمنظمة (Septiadi & Ramdani, 2024). ويُعد دمج الكفاءات في التخطيط الاستراتيجي للموارد البشرية عاملاً حاسماً في تحقيق التميز المؤسسي وتعزيز القدرة التنافسية في بيئة غير مستقرة وسريعة التغير (Fomenko, 2025)

كما تبرز إدارة الكفاءات البشرية كأداة استراتيجية تسهم في تعزيز الابتكار وتحقيق الاستدامة من خلال نشر ثقافة المعرفة وتطوير القدرات الجوهرية للمؤسسة، مما يمكنها من تقديم خدمات مبتكرة تدعم ميزتها التنافسية (Bessaid & Benyahia, 2023). وعلى الرغم من تزايد الاهتمام العالمي بتطبيق مدخل إدارة الكفاءات، فإن البحث في استراتيجيات تنمية الموارد البشرية القائمة على الكفاءة لا يزال بحاجة إلى مزيد من الدراسة والتطوير، ويرجع ذلك إلى محدودية الأبحاث التي تناولت هذا المجال بعمق (Bahri & Salsiati, 2025).

وتتصل هذه القضية بمفهوم الاستدامة الذي أصبح يمثل ضرورة استراتيجية لبقاء المؤسسات ونموها، حيث يمنحها ميزة تنافسية تتمثل في التفوق والقدرة تلبية احتياجات العملاء عبر إضافة القيمة إلى المنتجات والخدمات والعمليات. وعليه لم تعد الاستدامة خياراً ، بل تحولت إلى عنصر جوهري في استراتيجيات المؤسسات (Saxena et al., 2022).

وعلى المستوى الوطني أولت المملكة العربية السعودية ضمن رؤية 2030، اهتماماً كبيراً بالكفاءات البشرية باعتبارها أحد الممكنات الرئيسة لتمكين رحلة ضيوف الرحمن وتحقيق التميز في الخدمات المقدمة لهم. وقد أكد تقرير برنامج خدمة ضيوف الرحمن لعام 2023 على ثلاثة ممكنات أساسية، جاء من أبرزها «القدرات والكفاءات البشرية»، لدورها في «تعزيز روح الضيافة والحفاوة والاعتزاز بالواجب الديني والوطني» (برنامج خدمة ضيوف الرحمن، 2023). وبذلك يكتسب تطبيق مدخل إدارة الكفاءات أهمية خاصة في بيئات العمل الموسمية مثل شركات مقدمي الخدمة للحجاج، حيث تتطلب طبيعة العمل وجود كوادر مؤهلة قادرة على ضمان استدامة الأداء القيادي

وتشير الإحصاءات الرسمية لموسم حج عام 1446ه إلى أن إجمالي عدد الحجاج بلغ (1.673.230) حاجاً وحاجة، شكّل حجاج الخارج منهم ما نسبته (90%) بعدد (1.506.576) حاجاً يمثلون (171) جنسية مختلفة (الهيئة العامة للإحصاء، 2025، ص. 6). وقد تولت (25) شركة من شركات مقدمي الخدمة مسؤولية الإشراف على تقديم الخدمات لهؤلاء الحجاج (المجلس التنسيقي لشركات أرباب الطوائف ومقدمي خدمة حجاج الخارج، 1446)

وبناءً على ما سبق، تتحدد مشكلة البحث في دراسة دور مدخل إدارة الكفاءات في استدامة الأداء القيادي في بيئة العمل الموسمي لشركات مقدمي الخدمة للحجاج خلال موسم الحج، ويمكن صياغة مشكلة البحث في الأسئلة التالية

1- ما درجة توافر عمليات إدارة الكفاءات في تحقيق استدامة الأداء القيادي لخدمة ضيوف الرحمن بشركات مقدمي الخدمة للحجاج؟

2- مـا هـي الآليـات المقترحـة لتفعيـل إدارة الكفـاءات فـي تحقيـق اسـتدامة الأداء القيـادي لخدمـة ضيـوف الرحمـن بشـركات مقدمـي الخدمـة للحجـاج؟

أهداف البحث:

تمثلت أهداف البحث فيما يلي:

1- الكشـف عـن درجـة توافـر عمليـات إدارة الكفـاءات فـي تحقيـق اسـتدامة الأداء القيـادي لخدمـة ضيـوف الرحمـن بشـركات مقدمـي الخدمـة للحجـاج

2- اقتـراح آليـات تفعيـل إدارة الكفـاءات فـي تحقيـق اسـتدامة الأداء القيـادي لخدمـة ضيـوف الرحمـن بشـركات مقدمـي الخدمـة للحجـاج

أهمية البحث:

يستمد هذا البحث أهميته في كونه إحدى الدراسات الحديثة – على حد علم الباحث – التي تتناول الربـط بين إدارة الكفـاءات واسـتدامة الأداء القيـادي، خاصـة فـي البيئـات الموسـمية، وهـو مجـال لـم يحـظَ بالقـدر الكافـي مـن البحـث فـي الأدبيـات العربيـة. ممـا يمنحهـا إضافـة علميـة تسـهم فـي سـد فجـوة معرفيـة قائمـة

أمـا أهميتـه التطبيقيـة فتتمثـل فـي تقديـم آليـات وتوصيـات عمليـة يمكـن أن تدعـم صُنَّـاع القـرار فـي شـركات مقدمـي الخدمـة للحجـاج فـي تصميـم وتنفيـذ اسـتراتيجيات فاعلـة لإدارة الكفـاءات، بمـا يعـزز قـدرة هـذه الشـركات علـى الاحتفـاظ بالقيـادات المتميـزة وضمـان اسـتدامة أدائهـم مـن موسـم لآخـر.

منهج البحث وأداته:

فـي إطـار معالجـة مشـكلة البحـث ولتحقيـق الأهـداف السـابق عرضهـا، اسـتخدم البحـث المنهـج الوصفـي، كمـا اعتمـد علـى الاسـتبانة كأداة رئيسـة للكشـف عـن درجـة توافـر عمليـات إدارة الكفـاءات فـي تحقيـق اسـتدامة الأداء القيـادي لخدمـة ضيـوف الرحمـن بشـركات مقدمـي الخدمـة فـي موسـم الحـج.

مصطلحات الدراسة:

1. إدارة الكفـاءات: هـي نظـام إداري يهـدف إلـى الاسـتثمار الأمثـل للكفـاءات البشـرية فـي المنظمـة مـن خلال اسـتقطابها وتنميتهـا وتحفيزهـا والاحتفـاظ بهـا، وتوظيفهـا لتحقيـق الأهـداف الاسـتراتيجية للمنظمـة (الغامـدي، 2022).

وتعـرف إجرائيـاً فـي هـذا البحـث بأنهـا: مجموعـة العمليـات الرئيسـة التـي تنفذهـا شـركات مقدمـي الخدمـة للحجـاج خلال موسـم الحـج، وتشـمل الاسـتقطاب، وتنميـة الكفـاءات، والاحتفـاظ بهـا، والتعاقـب الوظيفـي، بمـا يضمـن المواءمـة بيـن متطلبـات العمـل الموسـمي وقـدرات القيـادات البشـرية، ويحقـق اسـتدامة الأداء القيـادي وجـودة الخدمـة المقدمـة لضيـوف الرحمـن

2. الاسـتدامة: هـي قـدرة المؤسسـة علـى تلبيـة احتياجاتهـا واحتياجـات أصحـاب المصلحـة فـي الحاضـر والمسـتقبل، مـن خلال تحقيـق التـوازن بيـن الأبعـاد الاقتصاديـة والاجتماعيـة والبيئيـة، مـع الحفـاظ علـى المـوارد وضمـان اسـتمرارية اسـتخدامها للأجيـال القادمـة (Al Shraah & Alnsour, 2025)

وتعـرف إجرائيـاً فـي هـذا البحـث بأنهـا: قـدرة شـركات مقدمـي الخدمـة لضيـوف الرحمـن علـى التـوازن بيـن المـوارد التشـغيلية والبشـرية والماليـة، بمـا يضمـن اسـتمرارية تقديـم خدماتهـا بجـودة عاليـة للحجـاج مـن موسـم إلـى آخـر

3. اسـتدامة الأداء القيـادي: تعـرف إجرائيـاً فـي هـذا البحـث بأنهـا قـدرة القيـادات الموسـمية فـي شـركات مقدمـي الخدمـة علـى الحفـاظ علـى فعاليـة أدائهـا وتطويـره باسـتمرار، مـع ضمـان اسـتمرارية جـودة القيـادة مـن موسـم إلـى آخـر، رغـم التغيـرات فـي الكـوادر والظـروف التشـغيلية، وذلـك مـن خلال اسـتثمار الكفـاءات البشـرية وتوظيفهـا بكفـاءة

4. شـركات مقدمـي الخدمـة: «هـي الشـركات المرخـص لهـا لتقديـم الخدمـات للحجـاج، وفقـاً لتصنيـف وتوصيـف ومسـتويات الخدمـة المعتمـدة مـن وزارة الحـج والعمـرة» (المجلـس التنسـيقي لشـركات أربـاب الطوائـف ومقدمـي خدمـة حجـاج الخـارج، 1445، ص.33)

حدود البحث:

اقتصـر نطـاق البحـث الحالـي علـى تحديـد دور إدارة الكفـاءات فـي تحقيـق اسـتدامة الأداء القيـادي لخدمـة ضيـوف الرحمـن بشـركات مقدمـة الخدمـة للحجـاج، وجـرى تطبيـق أداة البحـث فـي تلـك الشـركات علـى الرؤسـاء التنفيذييـن، ومديـري التشـغيل، والعمليـات، والمـوارد البشـرية، والتخطيـط، وغيرهـم مـن المـدراء العامليـن بشـركات مقدمـي خدمـات حجـاج الخـارج العاملـة خلال موسـم حـج عـام 1446هـ

الدراسات السابقة:

يسـتعرض البحـث الحالـي أبـرز الدراسـات العربيـة والأجنبيـة ذات الصلـة بموضـوع البحـث، والتـي تـم ترتيبهـا زمنيـاً مـن الأحـدث إلـى الأقـدم، وفيمـا يلـي بيـان ذلـك

دراسـة الزهرانـي (2025) هدفـت إلـى بنـاء إسـتراتيجية مقترحـة لتطويـر المـوارد البشـرية بجامعـة أم القـرى فـي ضـوء إدارة الكفـاءات، ولتحقيـق الأهـداف اسـتخدمت المنهـج الوصفـي، وتكـوّن مجتمـع الدراسـة مـن الموظفيـن والموظفـات بالجامعـة، واسـتخدمت الاسـتبانة كأداة لجمـع البيانـات، وقـد توصلـت الدراسـة إلـى أن: مسـتوى توافـر معاييـر اسـتقطاب وتعييـن الكفـاءات لتطويـر المـوارد البشـرية فـي الجامعـة كان مرتفعـاً ، كمـا أظهـرت النتائـج اسـتجابة عاليـة فيمـا يتعلـق بتوضيـح الأهـداف التدريبيـة للبرامـج التـي تنفذهـا الجامعـة فـي إطـار تطويـر مواردهـا البشـرية. فـي المقابـل بيّنـت النتائـج انخفـاض مسـتوى توافـر خطـط للتعاقـب الوظيفـي، ويُعـزى ذلـك جزئيـاً إلـى ضعـف التكامـل بيـن إدارات المـوارد البشـرية فـي الجامعـة

دراسـة الخنيـن والمشـعل (2024) والتـي هدفـت إلـى تعـرف واقـع إدارة الكفـاءات الأكاديميـة بجامعـة الأميـر سـطام بـن عبدالعزيـز والمعوقـات التـي تواجههـا، واتبعـت المنهـج الوصفـي بأسـلوبه المسـحي، وتكـوّن مجتمـع الدراسـة مـن القيـادات الأكاديميـة بالجامعـة، وتـم اسـتخدام الاسـتبانة كأداة لجمـع البيانـات، وتوصلـت الدراسـة إلـى جملـة مـن النتائـج، منهـا: أن درجـة ممارسـة التعاقـب الوظيفـي وإدارة الكفـاءات بشـكل عـام بجامعـة الأميـر سـطام جـاءت بدرجـة متوسـطة، وعـزت الدراسـة هـذه النتيجـة إلـى اهتمـام الجامعـة بتطويـر المـوارد البشـرية بشـكل عـام دون التركيـز علـى الكفـاءات.

دراسـة آل صليـع (2023) وهدفـت هـذه الدراسـة إلـى تعـرف دور إدارة الكفـاءات فـي تحقيـق الأداء المتميـز فـي مؤسسـات التعليـم بمنطقـة نجـران، واتبعـت المنهـج الوصفـي التحليلـي، وتكـوّن مجتمـع الدراسـة مـن قـادة مـدارس التعليـم الحكومـي، وتـم اعتمـاد الاسـتبانة أداة لجمـع البيانـات، وأظهـرت

النتائج أن الاهتمام بالاحتفاظ بالكفاءات يُعد عاملاً مهماً لتحقيق الأداء المتميز في المؤسسات التعليمية، غير أن درجة الاهتمام جاءت متوسطة.

دراسة Bessaid and Benyahia (2023) وهدفت إلى تحديد دور إدارة الكفاءات في تحسين الابتكار المؤسسي في بعض المؤسسات بولاية تلمسان بالجزائر، واستخدمت المنهج الوصفي التحليلي، وتكونت عينة الدراسة من العاملين في بعض المؤسسات الإنتاجية، وتم استخدام الاستبانة كأداة لجمع البيانات، وقد توصلت النتائج إلى: أهمية إدارة الكفاءات في تحسين الابتكار، غير أن مستوى إسهام المؤسسة في الحفاظ على كفاءاتها بما يدعم الابتكار المؤسسي لديها جاء بمستوى متوسط

دراسة Susilo and Winarto (2023) وهدفت إلى تحليل مدى تأثير التخطيط للتعاقب الوظيفي على استدامة المنظمة، من خلال دراسة الدور الوسيط لكل من القيادة التحويلية، وخفة التعلم، والمرونة في بنك XYZ بإندونيسيا، واتبعت الدراسة المنهج الكمي باستخدام نموذج المعادلات الهيكلية بأسلوب المربعات الصغرى الجزئي، وتكونت عينة الدراسة من 119 موظفاً من مواقع عمل مختلفة، وتم الاعتماد على الاستبانة في جمع البيانات، وأظهرت النتائج: أن استثمار المنظمة في إعداد كفاءاتها الداخلية لتولي أدوار مستقبلية حاز على درجة موافقة عالية، وهو ما يشير إلى أن تخطيط التعاقب الوظيفي يعد عاملاً مؤثراً في تعزيز استدامة المنظمة وضمان استمرارية أدائها المؤسسي

دراسة الغامدي (2022) هدفت إلى تعرف دور إدارة الكفاءات البشرية في تحقيق التميز المؤسسي بجامعة الملك عبدالعزيز، وتم اتباع المنهج الوصفي بأسلوبه المسحي، وتكوّ ن مجتمع الدراسة من أعضاء هيئة التدريس بكلية الاقتصاد والإدارة بالجامعة، واستخدمت الاستبانة أداةً لجمع البيانات، وتوصلت الدراسة إلى عدد من النتائج، أبرزها: أن تحديد الجامعة لاحتياجاتها من الكفاءات البشرية لشغل الوظائف الشاغرة بها قبل الشروع في عملية الاستقطاب يعد عاملاً ذو أهمية عالية. بالإضافة إلى الدور المحوري لنظام الحوافز الواضح في تحقيق التميز المؤسسي بالجامعة بدرجة كبيرة.

دراسة Boateng et al (2022) وهدفت إلى تعرف كيفية اسهام التخطيط للتعاقب الوظيفي للرؤساء التنفيذيين في ضمان استمرارية الأعمال وتحقيق ميزة تنافسية ونمو مؤسسي، واتبعت الدراسة المنهج النوعي بأسلوبه التحليل الموضوعي، وشملت عينة الدراسة 21 مديراً تنفيذياً من مؤسسات ذات نشاطات متنوعة تم اختيارهم بأسلوب العينة القصدية، وتم استخدام المقابلة كأداة لجمع البيانات، وتوصلت الدراسة إلى: أن وجود خطط تعاقب وظيفي قوية يسهم في نمو المنظمات، حيث يساعد على ضمان استمرارية القيادة، ويعزز النمو المؤسسي، ويحفز الموظفين عبر إتاحة مسارات وظيفية واضحة

تعقيب على الدراسات السابقة: باستقراء الدراسات السابقة يتضح ما يلي:

- استخدمت بعض الدراسات المنهج الوصفي لتحقيق أهدفها مثل دراسة الزهراني (2025)، والخنين والمشعل (2024)، ودراسة Bessaid and Benyahia (2023)، ويتشابه ذلك مع البحث الحالي في استخدامه للمنهج الوصفي لتحقيق أهدافه، بيد أن هناك دراسات استخدمت المنهج النوعي كدراسة Boateng et al (2022).

- يتشابه البحث الحالي مع الدراسات السابقة في استخدامه الاستبانة كأداة رئيسة لجمع البيانات كما في دراسة آل صليع (2023)، ودراسة Susilo and Winarto (2023)، في حين أن دراسات أخرى كدراسة Boateng et al (2022) اعتمدت المقابلة كأداة لجمع البيانات والمعلومات من عينة الدراسة

- ركزت معظم الدراسات على القطاعات التعليمية والإدارية، مع غياب الدراسات في القطاعات الموسمية عالية الكثافة مثل خدمات الحج، مما يستدعي بحوثاً لتقييم أثر إدارة الكفاءات على استدامة الأداء القيادي في هذه البيئات

- تشير نتائج الدراسات السابقة إلى أن إدارة الكفاءات تعد عاملاً أساسياً في تعزيز الأداء المؤسسي واستدامة القيادة من خلال استراتيجيات الاستقطاب والتدريب ونظم الحوافز، إلا أن ضعف خطط التعاقب الوظيفي والحفاظ على الكفاءات يشكل تحدياً مستمراً يحتاج إلى معالجة منهجية لتعزيز استدامة الأداء المؤسسي

- تمت الاستفادة من الدراسات السابقة في بناء صورة شاملة لموضوع البحث الحالي، بالإضافة إلى الاستفادة منها في تصميم أداة الدراسة الميدانية وصياغة عباراتها، إلى جانب الاستفادة من نتائج تلك الدراسات وربطها بالبحث الحالي بما يحقق الترابط والتسلسل في مجال البحث العلمي

القسم الثاني/ الإطار العام للبحث:

المحور الأول: إدارة الكفاءات:

1- مدخل إلى إدارة الكفاءات:

تُعد الكفاءة من المفاهيم المركزية في مجالات الإدارة والتنمية البشرية، وقد طُرح هذا المفهوم لأول مرة على يد عالم النفس الأمريكي ديفيد ماكليلاند (David McClelland) في مقالة عام 1973م بعنوان: Testing for Competence Rather Than Intelligence، والذي دعا فيه إلى تجاوز اختبارات الذكاء التقليدية والتركيز على الكفاءات الفعلية التي ترتبط سببياً بالأداء العملي، مؤكداً على أن النجاح في العمل يرتبط بامتلاك الكفاءات لا بالمؤهلات المعرفية فقط (Bai & Jiang, 2025; Castillo Arias, 2021; Shet et al., 2019).

وتمثل الكفاءة – وفق أدبيات متعددة (Spencer & Spencer, 1993; Trisliatanto et al., 2018) –قدرة مركبة تسهم في تحقيق نتائج ملموسة داخل بيئات العمل المعقدة. وتشمل هذه القدرة المعارف، المهارات، الاتجاهات، والسمات الشخصية التي يُمكن تطويرها بالتعلم والممارسة (Roy & Ray, 2025; Fomenko, 2025)

وتتعدد تصنيفات الكفاءات ما بين الفردية والجماعية والتنظيمية والاستراتيجية، مما يعكس تنوع السياقات التي تُمارَس فيها، ويُبرز دورها في دعم التميز المؤسسي (عسيري،2025)، (Chine et al., 2023). يُضاف إلى ذلك تصنيف بالغ الأهمية وهو الكفاءات الجوهرية التي تمثل القدرات المحورية والأصول المعرفية أو التقنية التي تُشكّل مصدراً مستداماً للميزة التنافسية (Bessaid & Benyahia, 2023). وبالنظر إلى هذا الزخم المفاهيمي، أصبحت الحاجة مُلحة إلى الانتقال من توصيف الكفاءات إلى إدارتها بصورة منهجية ومنظّمة، وهو ما يتطلب منظومة متكاملة تبدأ بالتخطيط وتنتهي بالاستخدام والتقييم. ويُشكّل هذا التحوّ ل جوهر ما يُعرف

اليوم بـ «إدارة الكفاءات»، والذي سيتم استعراضه في المحور التالي

2- مفهوم إدارة الكفاءات:

تُعد إدارة الكفاءات أحد المفاهيم الحديثة في إدارة الموارد البشرية، وتهدف إلى تطوير القدرات البشرية وضمان توافقها مع متطلبات العمل وتحقيق الأهداف التنظيمية. وقد عرّفها لوفان بيرندونك (Louvan Beirendonck) بأنها مجموعة من الأنشطة الموجهة نحو تنفيذ وتطوير كفاءات الأفراد والمجموعات، من أجل تنفيذ المهام وتحسين أداء المرؤوسين (Chine et al., 2023). كما تُعرف بأنها عملية مُنظَّمة تهدف إلى تنمية قدرات العاملين وتوظيفها بفعالية من خلال التدريب، والتحفيز، وتوفير بيئة عمل مناسبة، مع استقطاب الكفاءات المناسبة والاحتفاظ بها (الغامدي، 2022؛ الخنين والمشعل، 2024)

وترتكز إدارة الكفاءات على فلسفة مؤداها أن رأس المال البشري يُعد من أهم الأصول غير الملموسة التي يجب استثمارها وتوجيهها استراتيجياً ، إذ تسهم الكفاءات في تحقيق ميزة تنافسية مستدامة للمؤسسة من خلال تطوير الأداء والابتكار وتحسين عمليات اتخاذ القرار (عبدالتواب، 2023). كما تسهم في تعزيز التكامل بين ممارسات الموارد البشرية المختلفة، كتحليل الوظائف، والتخطيط الوظيفي، وتطوير المسار المهني، من خلال أنظمة تقييم مبنية على الكفاءة تتيح تحديد الفجوات والاحتياجات التدريبية بدقة (Saxena et al., 2022 Bahri & Salsiati, 2025;)

3- أهمية إدارة الكفاءات:

تُعد إدارة الكفاءات من الركائز الاستراتيجية لفعالية المؤسسات الحديثة، إذ تسهم في تحديد المهارات والمعارف الحرجة، وتحقيق المواءمة بين قدرات الأفراد ومتطلبات الوظيفة، مما يعزز من جودة الأداء، والاستجابة لمتطلبات التغيير والابتكار (Castillo Arias, 2021)

كما تبرز أهميتها من خلال دعمها لتطوير رأس المال البشري عبر التدريب والتحفيز وتهيئة بيئة عمل تمكينية، بالإضافة إلى مساهمتها في سد الفجوات المعرفية، وتحفيز السلوكيات الإيجابية، وتقليل التسرب والتغيب، بما يعزز من الاستقرار الوظيفي والانتماء المؤسسي (الخنين والمشعل، 2024؛ الغامدي، 2022). وتمكّن المؤسسات من الاستفادة المثلى من موظفيها عبر تأهيلهم لأداء وظائف متعددة، وتخفيض التكاليف التشغيلية، وتعزيز الكفاءة التنظيمية.

وفي هذا الإطار أشارت عسيري (2025) إلى أن إدارة الكفاءات تُساعد على مواجهة التحديات الإدارية، وتدعم الاحتفاظ بالمواهب، وتُسهِم في اتخاذ قرارات أكثر دقة تتعلق بالتطوير المهني والتعاقب الوظيفي. كما تمتد أهميتها إلى بناء ثقافة تنظيمية قوية تُرسخ الثقة في السياسات الداخلية، وتعزز من صورة المؤسسة وسمعتها التنافسية في سوق العمل (Castillo Arias, 2021)

وتتأكد أهمية هذا المدخل بشكل خاص في السياقات الموسمية كخدمات موسم الحج، حيث تتطلب طبيعة العمل كوادر بشرية متعددة المهارات تتمتع بمرونة تشغيلية عالية، لضمان استمرارية الأداء وجودة الخدمة في ظل ضغط الوقت وكثافة المستفيدين.

4- عمليات إدارة الكفاءات:

تتنوع عمليات إدارة الكفاءات باختلاف النماذج المتعددة في الأدبيات الإدارية، غير أن معظم الدراسات تتفق على أنها تشمل مجموعة من العمليات المترابطة التي تبدأ بتحليل العمل وتحديد متطلبات الوظائف، مروراً بعمليات الاستقطاب والتقييم والتطوير، وانتهاءً ببرامج التحفيز والاحتفاظ بالكفاءات. فقد أشارت العيدروس (2024) إلى أن العمليات الرئيسة تتضمن: التوظيف (ويتضمن الاستقطاب، الاختيار، والتعيين)، ثم التقييم، والتطوير. في حين ركّزت الغامدي (2022) على ثلاث عمليات رئيسة هي: الاستقطاب، الحوافز، والاحتفاظ بالكفاءات، معتبرةً أن هذه المكونات تشكّل جوهر إدارة الكفاءات الفعَّالة. أما الخنين والمشعل (2024) فقدمتا تصوراً رباعي العمليات يشمل: استقطاب الكفاءات، وتنميتها، والاحتفاظ بها، والتعاقب الوظيفي. من جانبها قدّمت الزهراني (2025) تصوراً أكثر شمولاً يضم: تحليل وتصميم العمل، الاستقطاب، الاختيار والتعيين، التدريب، تقييم الأداء، الحوافز، التعاقب الوظيفي، وأخيراً الاحتفاظ بالكفاءات

وتكشف هذه النماذج أن إدارة الكفاءات ليست مجرد نشاط وظيفي منفصل، بل هي نظام متكامل يهدف إلى المواءمة بين متطلبات الوظائف والقدرات البشرية، مما يسهم في تعزيز الأداء المؤسسي والاستدامة التنظيمية. وتؤكد الأدبيات الحديثة أن فاعلية إدارة الكفاءات تعتمد على ترابط هذه العمليات وتكاملها ضمن استراتيجية الموارد البشرية (Bai & Jiang, 2025)

في ضوء مراجعة الدراسات السابقة ذات الصلة، فقد تبنت الدراسة الحالية نموذج الخنين والمشعل (2024) القائم على أربع عمليات رئيسة تشمل: استقطاب الكفاءات من خلال وضع معايير دقيقة لجذب العناصر البشرية المناسبة، تنمية الكفاءات عبر برامج التدريب والتطوير، الاحتفاظ بالكفاءات من خلال تهيئة بيئة عمل جاذبة وحوافز ملائمة، والتعاقب الوظيفي لضمان استمرارية القيادة ونقل الخبرات التراكمية بين المواسم. ويُعد هذا النموذج الأكثر توافقاً مع طبيعة العمل الموسمي، لا سيما في شركات مقدمي الخدمة خلال موسم الحج، حيث تبرز الحاجة إلى استقطاب سريع، وتنمية فعّالة، وآليات استدامة تضمن جودة الأداء ومرونة القيادة. وفيما يلي توضيح لمكونات هذا النموذج

أ- استقطاب الكفاءات: ويُعدّ من الركائز الأساسية في إدارة الكفاءات. إذ يمثل الخطوة الأولى في التوظيف، ويعبر عن مجموعة من الأنشطة التي تهدف من خلالها المنظمة إلى جذب الأفراد المؤهلين بما يحقق مصلحة الطرفين (العيدروس، 2024). فهو لا يقتصر على استقطاب الموارد البشرية فحسب، بل يُمثل كذلك فرصة لتجديد المعرفة داخل المنظمة، عبر إجراءات دقيقة تتسم بالبحث المتعمق، والفحص، والمقابلات المركَّزة لاختيار الأكثر تأهيلاً لطبيعة العمل الموسمي (Hamzah & Tanai, 2024). وبالتالي فإن جودة الاستقطاب تمثل نقطة الانطلاق نحو استدامة الأداء القيادي، إذ تضمن اختيار الكفاءات القادرة على الاسهام في جودة المخرجات منذ بداية الموسم

ب- تنمية الكفاءات: تبرز الحاجة إلى تطوير الكفاءات القيادية وتدريبها لضمان أدائها الفعَّال خلال الموسم. حيث يُسهم التدريب في تنمية المعارف والمهارات والسلوكيات بما يتماشى مع أهداف المنظمة، ويتطلب ذلك تصميم برامج تدريبية متخصصة تلائم الاحتياجات الدقيقة لكل وظيفة (Bahri & Salsiati, 2025). كما يقصد بتطوير الكفاءات كل عملية تؤدي إلى التعلم، الذي يُعرَّف بأنه سلسلة من العمليات التي تُحدث تغييرات في المعرفة النظرية، والعملية، والسلوكية (Chine et al., 2023). تجدر الإشارة إلى أن توفر برامج التطوير المرتبطة بالمسار المهني تمثل عامل جذب رئيس للموظفين الجدد والمتميزين. إذ يبحث الموظفون عن بيئات عمل تتيح لهم فرصاً للنمو

المهني والتعلم المستمر (Septiadi & Ramdani, 2024). وبذلك تمثل هذه العملية الضمانة لفعالية الأداء القيادي واستدامته في بيئة العمل الموسمي في الحج

ج- الاحتفاظ بالكفاءات: ويهدف هذا المحور إلى الحفاظ على الكفاءات المتميزة لضمان استمرارية الأداء القيادي. ويُقصد بالاحتفاظ بالكفاءات قدرة المنظمة على الإبقاء على مواردها البشرية الموهوبة ومنع تسربها من خلال توفير بيئة عمل محفّزة وداعمة تمكّنهم من تحقيق الإنجازات على المستويين الشخصي والوظيفي (الخنين والمشعل، 2024). وتُعد الحوافز عنصراً أساسياً في تعزيز رضا العاملين ودفعهم للبقاء داخل المنظمة. بما ينعكس في معدلات إنتاجية أعلى من الكفاءات المؤهلة، الأمر الذي يعزز القدرة التنافسية للمنظمات (الغامدي، 2022). ومن ثم فإن توفير آليات فاعلة للاحتفاظ بالكفاءات يسهم في تعزيز جاهزية القادة وضمان استمرارية الأداء الفعّال طوال الموسم، بما يمثل ركيزة محورية في استدامة الأداء القيادي.

د- التعاقب الوظيفي: ويتضمن هذا البُعد تحديد الأدوار الحرجة داخل المنظمة، وإعداد بدلاء محتملين لشغلها عبر تزويدهم بالخبرات والمهارات اللازمة للفرص الحالية والمستقبلية (الزهراني، 2025). ويسهم التخطيط للتعاقب الوظيفي في وضع خطة تعاقب واضحة لكل منصب قيادي، وتحديد الكفاءات المطلوبة على كافة المستويات، بما يضمن توفر بدائل جاهزة لشغل الوظائف الحيوية (Bahri & Salsiati, 2025; Roy & Ray, 2025). ويتجاوز مفهوم التميّز في التعاقب الوظيفي مجرد التخطيط للاستبدال، ليصبح نهجاً إستراتيجياً واستباقياً يركز على تنمية المواهب القيادية لتحقيق نجاح مؤسسي مستدام (Yarangga et al., 2023)

في ضوء ما سبق، يتضح أن إدارة الكفاءات تمثل منظومة استراتيجية متكاملة تسعى إلى المواءمة بين متطلبات الوظائف والقدرات البشرية، من خلال عمليات مترابطة تبدأ بالاستقطاب، مروراً بتنمية الكفاءات والاحتفاظ بها، وانتهاءً بالتعاقب الوظيفي. ويؤكد العرض السابق على أن هذا المدخل الإداري لا يقتصر على تحسين الأداء الحالي، بل يتجاوز ذلك إلى بناء قاعدة مستدامة من القدرات التي تدعم الابتكار، وتعزز الميزة التنافسية، وتضمن استمرارية القيادة الفاعلة. كما تزداد أهميتها في موسم الحج بوصفها أداة لانتقاء الكوادر المؤهلة، وتأهيلها، والاحتفاظ بها، وضمان جاهزيتها لمواجهة متطلبات العمل المكثف وضغوط الزمن، بما يسهم في تحقيق استدامة الأداء القيادي وضمان جودة الخدمة المقدمة لضيوف الرحمن

المحور الثاني: استدامة الأداء القيادي:

تُعد القيادة جوهر العملية الإدارية وركيزة أساسية لنجاح المنظمات، فهي ترسم الاتجاه وتوحّد الجهود وتترجم الموارد إلى إنجازات ملموسة (Al Shraah & Alnsour, 2025). وفي عالم اليوم حيث تتسارع التغيرات التقنية، وتتزايد حدة المنافسة، وتتنامى التحديات التنظيمية، يواجه القادة ضغوطاً مستمرة للحفاظ على كفاءتهم وقدرتهم على التكيف مع البيئات المعقدة وغير المستقرة (Syamsir et al., 2025). وتتضاعف هذه التحديات في البيئات الموسمية عالية الكثافة كقطاع خدمات الحج، الذي يتسم بتغيّر فرق العمل وتنوع خلفياتهم، وضيق الإطار الزمني لإنجاز المهام بكفاءة. وقد أظهرت الدراسات أن غياب القائد أو ضعف أدائه ينعكس سلباً على استقرار المؤسسات وأدائها، بل قد يهدد استمراريتها (Samuel & Isa, 2024). ومن هنا برزت فكرة استدامة الأداء القيادي كاتجاه معاصر يدمج بين متطلبات القيادة الفعَّالة ومبادئ الاستدامة، لضمان قدرة القادة على مواصلة تحقيق النتائج المتميزة على المدى الطويل، حتى في البيئات الموسمية ذات المتطلبات الاستثنائية، بوصفها استجابة استراتيجية لهذه التحديات وأحد متطلبات الحفاظ على الميزة التنافسية واستمرارية النجاح المؤسسي (Mohammed, 2024). وانطلاقاً من هذه الرؤية، تتناول الفقرات التالية مفهوم استدامة الأداء القيادي وأبرز مرتكزاته وعلاقته بسياق العمل الموسمي في قطاع خدمات الحج

1- مفهوم استدامة الأداء القيادي:

أصبحت الاستدامة اليوم ضرورة استراتيجية لتحقيق بقاء المؤسسات ونموها، إذ توفر ميزة تنافسية من خلال تعظيم القيم الاقتصادية والاجتماعية والبيئية على المدى الطويل (Saxena et al., 2022; Samuel & Isa, 2024). وتُعرف الاستدامة بأنها «تحسين نوعية الحياة البشرية وضمان استمرارية هذه الحياة في ضوء البيئة المحيطة وضمن الطاقة الاستيعابية لهذه النظم البيئية» (أحمد، 2024، ص.240)

وفي الإطار المؤسسي، تعني الاستدامة إدارة متوازنة للقضايا الاقتصادية والاجتماعية والبيئية بما يضمن استمرارية الأعمال والقدرة على مواجهة التحديات (Al Shraah & Alnsour, 2025). وتُعد القيادة المحرك الرئيس لترسيخ ممارسات الاستدامة ودمجها في الاستراتيجيات والسياسات (Armani et al., 2020)، وهو ما يقود إلى مفهوم القيادة المستدامة بوصفها ممارسة إدارية أخلاقية تستند إلى القيم وتدمج أبعاد الاستدامة الثلاثة في القرارات والممارسات، مع القدرة على التكيف مع المتغيرات (Daversa & Farias, 2024; Raticová et al., 2024).

وانطلاقاً من هذا المفهوم، تُعرَّف استدامة الأداء القيادي بأنها قدرة القادة على الحفاظ على فعالية أدائهم وتطويره باستمرار، مع ضمان استمرارية تحقيق الأهداف التنظيمية عبر قيادة مرنة تستثمر الكفاءات وتخطط للتعاقب الوظيفي، حتى في البيئات المعقدة وغير المستقرة. وهو ما يمثل ضرورة قصوى في البيئات الموسمية عالية الكثافة كقطاع خدمات الحج.

2- أبعاد استدامة الأداء القيادي:

تشمل أبعاد استدامة الأداء القيادي مجموعة من المكونات المترابطة ويمكن تصنيف هذه الأبعاد إلى فئتين رئيسيتين

أ- الأبعاد الثلاثية التقليدية (Triple Bottom Line) وتتمثل في: (Boeske, 2023; Iqbal & Ahmed, 2021)

- البُعد الاقتصادي: يرتبط بالاستخدام الأمثل للموارد المالية والمادية والبشرية، وتقليل الهدر، وتحقيق الكفاءة التشغيلية والنمو المربح طويل الأجل، بما يحافظ على القدرة التنافسية للمؤسسة

- البُعد الاجتماعي: ويتجسد في تعزيز رفاه الأفراد داخل المنظمة وخارجها، من خلال بيئة عمل عادلة ومُحفّزة، وتنمية رأس المال البشري، وتعزيز المشاركة والعدالة الاجتماعية، مما يسهم في الاستقرار والرضا الوظيفي.

- البُعد البيئي: يركز على دمج الممارسات الصديقة للبيئة في السياسات والعمليات، والحفاظ

على الموارد الطبيعية، وتقليل الأثر البيئي عبر الابتكار الأخضر والمبادرات البيئية المستدامة

ب- الأبعاد الإدارية والقيادية المساندة: وقد أبرزتها دراسات متعددة منها (Boateng et al., 2022; Samuel & Isa, 2024; Yarangga et al., 2023) على النحو التالي

- بُعد المرونة القيادية: يشير إلى قدرة القادة على التكيُّف السريع مع المتغيرات وإدارة الأزمات بفاعلية في بيئات عمل تتسم بالتقلب (Volatility)، وعدم اليقين (Uncertainty)، والتعقيد (Complexity)، والغموض (Ambiguity) والمعروفة اختصاراً بـ (VUCA). ويتضمن هذا البُعد امتلاك المرونة المعرفية، وسرعة الاستجابة للمستجدات، واستباق التحديات بما يعزز قدرة المؤسسة على الصمود والاستمرار

- بُعد الحوكمة والقيم الأخلاقية: يركز على الشفافية والمساءلة في اتخاذ القرار، وتعزيز الثقة مع أصحاب المصلحة، وتبني ممارسات قيادية مسؤولة تراعي الأبعاد الاقتصادية والاجتماعية والبيئية.

إن تكامل هذه الأبعاد يتيح للقادة إدارة الحاضر بكفاءة وتأمين مستقبل المؤسسة، من خلال تحقيق توازن مستدام بين متطلبات السوق ورفاه الأفراد والحفاظ على البيئة، وهو ما يشكل جوهر استدامة الأداء القيادي

3- تحديات استدامة الأداء القيادي:

تناولت الأدبيات عدداً من التحديات التي تؤثر على استدامة الأداء القيادي في البيئات التنظيمية المتنوعة، من أبرزها

1) غياب أو ضعف ممارسات التخطيط للتعاقب الوظيفي: ويقصد بالتخطيط للتعاقب الوظيفي العملية المنهجية والمقصودة التي تهدف إلى ضمان الاحتفاظ بالمعرفة المؤسسية القيّمة الضرورية لاستمرار الأعمال، من خلال تحديد وتطوير القادة المحتملين ليحلوا محل القادة الحاليين عند وفاتهم أو تقاعدهم أو مغادرتهم للمنظمة (Boateng et al., 2022). ولذلك فإن قدرة المؤسسة على الحفاظ على مزيج مناسب من الأفراد ذو المعرفة والخبرة والمناسبة يعتمد على جودة وفعالية نظامها في تخطيط التعاقب الوظيفي (Samuel & Isa, 2024)

2) نقص الجاهزية البنيوية لتنفيذ إدارة المواهب: ويشمل ذلك برامج التدريب المنتظمة للمواهب، وحزم المكافآت التنافسية، وتوفر المناصب (Agustian et al., 2023). كما أن توفير ثقافة تنظيمية إيجابية يعد عاملاً حاسماً في تعزيز فاعلية هذه البيئة (Azmi et al., 2025)

3) ضعف كفاءات القيادة لدى المواهب المُرشحة: ويتمثل ذلك في نقص الشفافية والمسؤولية القيادية والتواصل الفعال (Raticová et al., 2024)، وبالتالي فإن كفاءات القيادة، مثل الذكاء العاطفي، والرؤية الإستراتيجية، وإدارة التغيير، عناصر أساسية في تحقيق الفاعلية القيادية ورفع الأداء المؤسسي (Yarangga et al., 2023).

4) بيئة العمل المعقدة والمتغيرة (VUCA): تشكل بيئات العمل التي تتسم بالتقلب وعدم اليقين والتعقيد والغموض تحدياً جوهرياً أمام استدامة الأداء القيادي. حيث تتطلب من القادة تبني أساليب أكثر مرونة واستباقية للتكيّف مع التحولات المستمرة. ولم يعد مفهوم المرونة القيادية مجرد توجهاً حديث، بل أصبح ضرورة ملحّة ينبغي أن تشكل محوراً رئيساً في تطوير الكفاءات القيادية المستقبلية (Syamsir et al., 2025). كما يعد كل من التخطيط الاستراتيجي، والوعي السياقي، والتطوير التنظيمي من المحركات الأساسية لتمكين القادة من الاستجابة بفاعلية لهذه البيئات المتغيرة والمعقدة (Snippe & Kara, 2023)

وانطلاقاً مما سبق يمكن القول بأن استدامة الأداء القيادي في شركات مقدمي الخدمة تمثل ركيزة لضمان جودة القيادة واستمراريتها في ظل بيئة موسمية عالية المتطلبات. وتؤدي إدارة الكفاءات دوراً محورياً في هذا الإطار عبر استقطاب الكوادر المؤهلة، وتطويرها، وتحفيزها، والاحتفاظ بها، بما يعزز جاهزية القادة وكفاءتهم. وبالتالي فإن هذا التكامل بين المُدخلين يسهم في رفع جودة الخدمات، وتحقيق رضا ضيوف الرحمن، وترسيخ الميزة التنافسية على نحو مستدام

القسم الثالث/ الدراسة الميدانية:

أ- مجتمع البحث وعينته: تكون مجتمع البحث من الرؤساء التنفيذيين ومديري التشغيل والعمليات والموارد البشرية والتخطيط، إضافة إلى بعض القيادات الأخرى ذات الصلة المباشرة بعمليات إدارة الكفاءات، مثل مديري الجودة، والتدريب، والخدمات المساندة. وذلك في شركات مقدمي الخدمة لحجاج الخارج المشاركة في موسم الحج لعام 1446هـ. وقد بلغ عدد هذه الشركات (25) شركة وفقاً لبيان المجلس التنسيقي لشركات أرباب الطوائف ومقدمي خدمة حجاج الخارج

ب- خصائص عينة البحث: تكونت عينة الدراسة من (51) قائداً إدارياً يعملون في شركات مقدمي الخدمة لضيوف الرحمن. وقد تنوعت خصائص المشاركين من حيث المسمى الوظيفي، وطبيعة العمل، وسنوات الخبرة. وعلى الرغم من أن حجم العينة صغير نسبياً ، إلا أن اختيارها تم بعناية لضمان تمثيل مباشر للقيادات المسؤولة عن الأداء القيادي الموسمي. يوضح الجدول (1) توزيع العينة وفق هذه الخصائص

الجدول (1): توزيع أفراد العينة حسب المتغيرات الديموغرافية

المتغير	الفئة	التكرار	النسبة المئوية
المسمى الوظيفي	رئيس تنفيذي	8	15.7
	مدير عمليات	5	9.8
	مدير تشغيل	3	5.9
	مدير موارد بشرية	3	5.9
	مدير تخطيط	3	5.9
	أخرى	29	56.9
طبيعة العمل	موسمي	17	33.3
	دائم	34	66.7
سنوات الخبرة	أقل من 5 سنوات	9	17.6
	من 5–10 سنوات	12	23.5
	أكثر من 10 سنوات	30	58.8

تشير هذه البيانات إلى أن غالبية أفراد العينة يعملون في وظائف دائمة (66.7%)، وأكثر من نصفهم يمتلك خبرة تزيد عن عشر سنوات (58.8%)، مما يعكس خبرة واسعة لدى المشاركين في مجال العمل الموسمي المرتبط بخدمة الحجاج

ج- أداة البحث: للتحقق من صدق أداة البحث تم استخدام معاملات الارتباط بين كل فقرة والدرجة الكلية للبُعد. وقد بيّنت النتائج أن جميع الفقرات ارتبطت بدرجة دالة إحصائياً (عند مستوى 0.01) مع الدرجة الكلية لكل بُعد، وهو ما يعكس اتساقها الداخلي. وتراوحت معاملات الارتباط بين (0.724–0.910) لبُعد استقطاب الكفاءات، وبين (0.815–0.894) لبُعد تنمية الكفاءات، وبين (0.807–0.933) لبُعد الاحتفاظ بالكفاءات، وبين (0.902–0.950) لبُعد التعاقب الوظيفي. وهذه القيم المرتفعة تؤكد أن الفقرات تعكس البناء المفترض للمقياس. أما فيما يتعلق بـ الثبات، فقد تم الاعتماد على معامل كرونباخ ألفا، وجاءت النتائج كما يوضحها الجدول (2)

الجدول (2): معاملات الثبات (كرونباخ ألفا) لأبعاد المقياس

البُعد	عدد الفقرات	كرونباخ ألفا
استقطاب الكفاءات	6	0.874
تنمية الكفاءات	5	0.897
الاحتفاظ بالكفاءات	8	0.950
التعاقب الوظيفي	5	0.958
المقياس ككل	24	0.972

تشير هذه النتائج إلى أن جميع معاملات الثبات مرتفعة وتفوق الحد الأدنى المقبول (0.70)، مما يؤكد أن المقياس يتمتع بدرجة عالية من الثبات والاتساق الداخلي، وبالتالي فهو صالح للاستخدام في الدراسة الميدانية

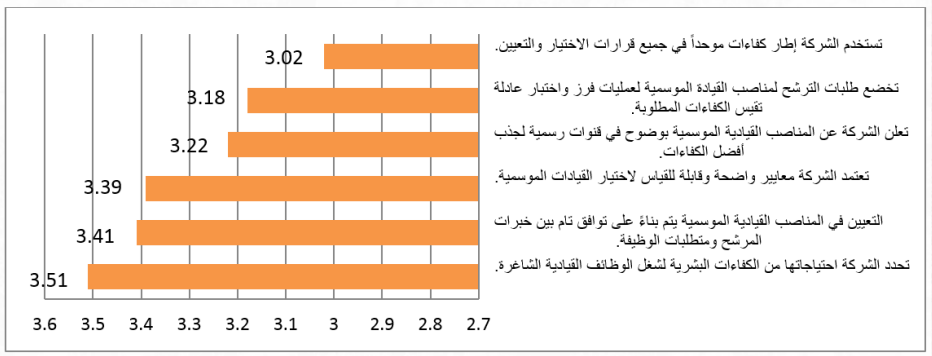
د- نتائج الدراسة:

إجابة السؤال الثاني والذي ينص على: ما درجة توافر عمليات إدارة الكفاءات في تحقيق استدامة الأداء القيادي لخدمة ضيوف الرحمن بشركات مقدمي الخدمة للحجاج؟

وللإجابة على هذا السؤال فقد تم حساب المتوسط الحسابي والانحراف المعياري ودرجة توافر عمليات إدارة الكفاءات في شركات مقدمي الخدمة للحجاج

جدول (3): نتائج التحليل الوصفي لبُعد استقطاب الكفاءات

رقم العبارة	العبارة	المتوسط الحسابي	الانحراف المعياري	الدرجة
1	تحدد الشركة احتياجاتها من الكفاءات البشرية لشغل الوظائف القيادية الشاغرة.	3.51	0.61	عالية
6	التعيين في المناصب القيادية الموسمية يتم بناءً على توافق تام بين خبرات المرشح ومتطلبات الوظيفة.	3.41	0.64	عالية
2	تعتمد الشركة معايير واضحة وقابلة للقياس لاختيار القيادات الموسمية.	3.39	0.67	عالية
4	تعلن الشركة عن المناصب القيادية الموسمية بوضوح في قنوات رسمية لجذب أفضل الكفاءات.	3.22	0.83	عالية
5	تخضع طلبات الترشح لمناصب القيادة الموسمية لعمليات فرز واختبار عادلة تقيس الكفاءات المطلوبة.	3.18	0.82	عالية
3	تستخدم الشركة إطار كفاءات موحداً في جميع قرارات الاختيار والتعيين.	3.02	0.79	عالية
	المتوسط العام للبعد	**3.29**	0.57	عالية



شكل (1): نتائج التحليل الوصفي لبُعد استقطاب الكفاءات

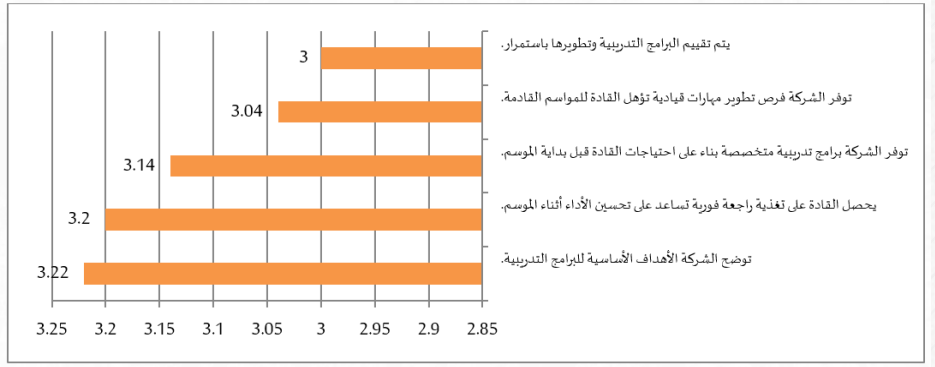
حقق بُعد استقطاب الكفاءات أعلى متوسط عام (3.29) مقارنة ببقية الأبعاد، مما يشير إلى أن الشركات تولي اهتماماً واضحاً بعمليات الاستقطاب والاختيار، وهو ما يعكس إدراكها لأهمية استقطاب القيادات المؤهلة في نجاح العمل الموسمي. وقد جاءت الفقرة «تحدد الشركة احتياجاتها من الكفاءات البشرية لشغل الوظائف القيادية الشاغرة» الأعلى بمتوسط (3.51)، مما يعكس وجود توجه منهجي نحو التخطيط المسبق لاحتياجات الموارد البشرية.

وتتفق نتيجة هذه العبارة مع دراسة الغامدي (2022) التي كشفت نتائجها عن أهمية تحديد الجامعة لاحتياجاتها من الكفاءات البشرية لشغل الوظائف الشاغرة بها قبل الشروع بعملية الاستقطاب بدرجة كبيرة. في المقابل حصلت الفقرة « تستخدم الشركة إطار كفاءات موحداً في جميع قرارات الاختيار والتعيين» على أقل متوسط قدره (3.02)، ما يدل على أن عملية الاستقطاب ما زالت تفتقر إلى توحيد المعايير والاعتماد على إطار كفاءات معياري شامل. وهذا يشير إلى أن هناك مجالاً لتحسين ممارسات التوظيف وجعلها أكثر اتساقاً مع المعايير العالمية في اختيار القيادات الموسمية. وتختلف نتيجة هذه العبارة مع دراسة الزهراني (2025) التي أكدت توافر معايير لاستقطاب وتعيين الكفاءات لتطوير الموارد البشرية في الجامعة بدرجة عالية

ويمكن تفسير النتيجة السابقة على ضوء ما أشارت إليه العيدروس (2024) بأن الاستقطاب يُعدّ من الركائز الأساسية في إدارة الكفاءات، إذ يمثل الخطوة الأولى في عملية التوظيف. ولا يقتصر الاستقطاب على جذب الموارد البشرية فحسب، بل يُمثل كذلك فرصة لتجديد المعرفة داخل المنظمة، من خلال إجراءات دقيقة تتسم بالبحث المتعمق، والفحص، والمقابلات المركزة لاختيار الأكثر تأهيلاً لطبيعة العمل الموسمي (Hamzah & Tanai, 2024). ومن هذا المنطلق، فإن جودة الاستقطاب تمثل نقطة الانطلاق نحو استدامة الأداء القيادي، إذ تضمن اختيار الكفاءات القادرة على الإسهام في جودة المخرجات منذ بداية الموسم، وتدعم قدرة الشركات على مواجهة التحديات التشغيلية بكفاءة ومرونة.

جدول (4): نتائج التحليل الوصفي لبُعد تنمية الكفاءات

رقم العبارة	العبارة	المتوسط الحسابي	الانحراف المعياري	الدرجة
1	توضح الشركة الأهداف الأساسية للبرامج التدريبية.	3.22	0.70	عالية
4	يحصل القادة على تغذية راجعة فورية تساعد على تحسين الأداء أثناء الموسم.	3.20	0.85	عالية
2	توفر الشركة برامج تدريبية متخصصة بناء على احتياجات القادة قبل بداية الموسم.	3.14	0.69	عالية
5	توفر الشركة فرص تطوير مهارات قيادية تؤهل القادة للمواسم القادمة.	3.04	0.98	عالية
3	يتم تقييم البرامج التدريبية وتطويرها باستمرار.	3.00	0.92	عالية
	المتوسط العام للبعد	**3.12**	0.70	عالية



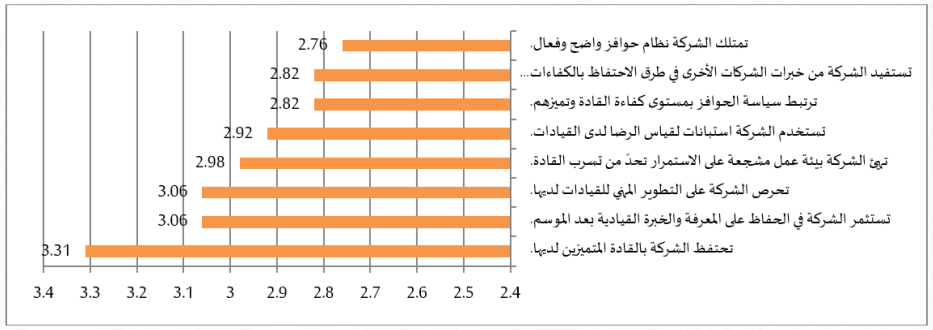
شكل (2): نتائج التحليل الوصفي لبُعد تنمية الكفاءات

جاء بُعد تنمية الكفاءات في المرتبة الثانية بمتوسط عام (3.12)، وهو مؤشر إيجابي على أن المؤسسات تقدم برامج تدريبية وتركز على تطوير مهارات القيادات، لكنه أقل قوة مقارنة بالاستقطاب. أظهرت النتائج أن الفقرة «توضح الشركة الأهداف الأساسية للبرامج التدريبية» سجلت أعلى متوسط (3.22)، مما يدل على وضوح نسبي في تحديد أهداف البرامج التدريبية. وتتفق نتيجة هذه العبارة مع دراسة الزهراني (2025) التي كشفت عن استجابة عالية حول توضيح الأهداف التدريبية للبرامج التي تنفذها الجامعة لتطوير الموارد البشرية فيها. بينما جاءت الفقرة «يتم تقييم البرامج التدريبية وتطويرها باستمرار » في المرتبة الأخيرة بمتوسط (3.00)، مما يعكس قصوراً في عمليات المراجعة والتطوير المستمر لهذه البرامج. وهذا قد يشير إلى أن الجهود تنصب أكثر على إعداد برامج التدريب وتنفيذها، دون التركيز الكافي على عمليات التقييم الدوري لضمان فاعليتها واستدامتها

ويمكن عزو النتائج السابقة إلى حرص الشركات على تحديد الأهداف التدريبية بوضوح قبل التنفيذ، لما لذلك من دور في رفع مستوى الالتزام وتوجيه المتدربين نحو مخرجات محددة دون الحاجة إلى موارد إضافية كبيرة، كما يمكن عزوها إلى طبيعة العمل الموسمي التي تفرض تقديم ملاحظات مباشرة وفورية لمعالجة المشكلات وتحسين الأداء في الوقت المناسب، بدلاً من الاعتماد على تقييمات مؤجلة، بالإضافة الى إدراك الشركات لأهمية الاعداد المسبق للقيادات عبر برامج قصيرة أو ورش عمل مركزة لتفادي ارتباك الأداء عند انطلاق الموسم. وبشكل عام، فإن هذه النتائج توضح أن العوامل المرتبطة بتوضيح الأهداف التدريبية، والتغذية الراجعة الفورية، والتجهيز المسبق تمثل ممارسات عملية وذات مردود سريع، مما يجعلها أكثر حضوراً في بيئة العمل الموسمية

جدول (5): نتائج التحليل الوصفي لبُعد الاحتفاظ بالكفاءات

رقم العبارة	العبارة	المتوسط الحسابي	الانحراف المعياري	الدرجة
1	تحتفظ الشركة بالقادة المتميزين لديها.	3.31	0.84	عالية
7	تستثمر الشركة في الحفاظ على المعرفة والخبرة القيادية بعد الموسم.	3.06	0.81	عالية
3	تحرص الشركة على التطوير المهني للقيادات لديها.	3.06	0.86	عالية
6	تهيئ الشركة بيئة عمل مشجعة على الاستمرار تحدّ من تسرب القادة.	2.98	0.86	متوسطة
2	تستخدم الشركة استبانات لقياس الرضا لدى القيادات.	2.92	0.93	متوسطة
5	ترتبط سياسة الحوافز بمستوى كفاءة القادة وتميزهم.	2.82	0.99	متوسطة
8	تستفيد الشركة من خبرات الشركات الأخرى في طرق الاحتفاظ بالكفاءات البشرية.	2.82	1.01	متوسطة
4	تمتلك الشركة نظام حوافز واضح وفعال.	2.76	0.97	متوسطة
	المتوسط العام للبعد	**2.97**	0.79	متوسطة



شكل (3): التحليل الوصفي لبُعد الاحتفاظ بالكفاءات

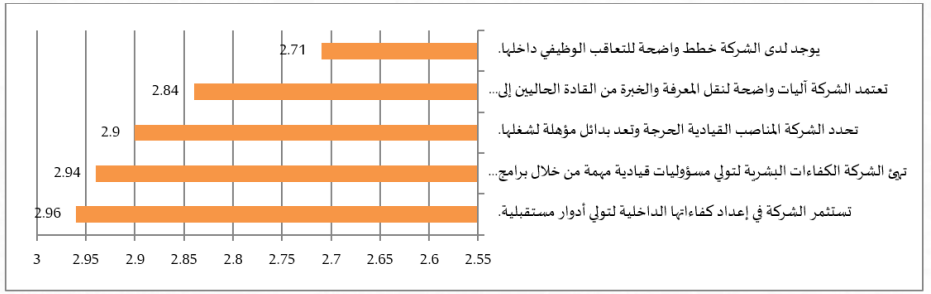
أظهر بُعد الاحتفاظ بالكفاءات متوسطاً عاماً (2.97) وهو أقل من المتوسطات المسجلة في بُعدي الاستقطاب والتنمية، مما يكشف عن تحديات تواجه المؤسسات في مجال استدامة القوى البشرية المتميزة. فقد جاءت الفقرة «تحتفظ الشركة بالقادة المتميزين لديها» كأعلى الفقرات بمتوسط (3.31)، مما يؤكد وجود بعض الجهود المبذولة للحفاظ على الكفاءات. وتختلف نتيجة هذه العبارة مع دراسة آل صليع (2023) التي كشفت عن درجة استجابة متوسطة لدور المؤسسة في الاحتفاظ بالكفاءات لتحقيق الأداء المتميز في المؤسسات التعليمية، ودراسة (Bessaid & Benyahia, 2023) التي أظهرت درجة استجابة متوسطة في إسهام المؤسسة في

الحفاظ على كفاءاتها بما يدعم الابتكار المؤسسي لديها. إلا أن الفقرة «تمتلك الشركة نظام حوافز واضح وفعال» كانت الأدنى (2.76)، ما يشير إلى أن نظام الحوافز لا يزال يشكل نقطة ضعف جوهرية في هذه الشركات. وتختلف نتيجة هذه العبارة مع دراسة الغامدي (2022) التي أظهرت نتائجها استجابة كبيرة لأهمية نظام الحوافز الذي يتسم بالوضوح في تحقيق التميز المؤسسي بالجامعة. وبالنظر إلى أن الحوافز والرضا الوظيفي من أهم عوامل الاستقرار الوظيفي، فإن هذه النتائج تؤكد الحاجة الملحة إلى تعزيز سياسات المكافآت وتحسين بيئة العمل لضمان استبقاء الكفاءات

ويمكن عزو النتائج السابقة إلى أن بعض الشركات تبذل بالفعل جهوداً فردية أو محدودة للحفاظ على قادتها ذوي الكفاءة العالية، إما من خلال الثقة المتبادلة أو توفير بعض الامتيازات غير الرسمية التي تشجعهم على الاستمرار. إلا أن هذه الجهود تبدو غير كافية. ويمكن تفسير ضعف سياسات الحوافز إلى وجود قصور في وضع نظام حوافز مؤسسي ومعياري يربط بين الأداء والتميز وبين المكافآت الممنوحة، والاعتماد في بعض الحالات على حوافز معنوية أو وقتية لا تلبي تطلعات القادة ولا تكفي لضمان استقرارهم الوظيفي. بالإضافة إلى ضعف ثقافة الربط بين الأداء التحفيزي والاحتفاظ بالكفاءات، كما يمكن عزو النتائج السابقة إلى أن الشركات تفتقر إلى آليات مؤسسية ممنهجة لتقييم رضا القادة أو تطوير سياسات مستدامة للاحتفاظ بالكفاءات

جدول (6): نتائج التحليل الوصفي لبُعد التعاقب الوظيفي

رقم العبارة	العبارة	المتوسط الحسابي	الانحراف المعياري	الدرجة
2	تستثمر الشركة في إعداد كفاءاتها الداخلية لتولي أدوار مستقبلية.	2.96	0.96	متوسطة
4	تهيئ الشركة الكفاءات البشرية لتولي مسؤوليات قيادية مهمة من خلال برامج التدريب المستمرة.	2.94	0.88	متوسطة
3	تحدد الشركة المناصب القيادية الحرجة وتعد بدائل مؤهلة لشغلها.	2.90	0.94	متوسطة
5	تعتمد الشركة آليات واضحة لنقل المعرفة والخبرة من القادة الحاليين إلى المرشحين كخلفاء في المناصب القيادية.	2.84	1.05	متوسطة
1	يوجد لدى الشركة خطط واضحة للتعاقب الوظيفي داخلها.	2.71	0.99	متوسطة
	المتوسط العام للبعد	**2.87**	0.89	متوسطة



شكل (4): التحليل الوصفي لبُعد التعاقب الوظيفي

يُظهر بُعد التعاقب الوظيفي أدنى متوسط عام بين الأبعاد الأربعة (2.87)، مما يعكس ضعف اهتمام المؤسسات بتبني خطط واضحة للتعاقب وإعداد قيادات بديلة. حيث سجلت الفقرة «تستثمر الشركة في إعداد كفاءاتها الداخلية لتولي أدوار مستقبلية» أعلى متوسط (2.96)، وتختلف نتيجة هذه العبارة مع دراسة (Susilo & Winarto, 2023) الذي أظهرت درجة موافقة عالية على استثمار المنظمة في إعداد كفاءاتها الداخلية، مما يدل على وجود ثقة عالية في قدرات المنظمة على إعداد بدائل قيادية. في المقابل حصلت الفقرة «يوجد لدى الشركة خطط واضحة للتعاقب الوظيفي داخلها» على أدنى متوسط (2.71)، وهو ما يبرز غياب استراتيجيات منهجية واضحة في هذا الجانب. هذه النتيجة تؤكد أن الشركات تركز على الجوانب التشغيلية الآنية أكثر من تركيزها على بناء قيادة بديلة مستدامة، مما قد يشكل خطراً على استمرارية الأداء القيادي مستقبلاً إذا لم يتم تداركه بخطط استراتيجية للتعاقب. وتتسق هذه النتيجة مع دراسة الزهراني (2025) التي كشفت عن انخفاض توافر خطط التعاقب الوظيفي في الجامعة، وعزت ذلك إلى غياب منهج واضح لتخطيط التعاقب، وضعف مستوى التكامل بين إدارات الموارد البشرية. كما تدعمها دراسة (Boateng et al., 2022) التي بيّنت أن معظم المنظمات لا تمتلك ممارسات واضحة للتخطيط للتعاقب الوظيفي، وأن من يطبقها فإنها غالبًا ما تكون ضعيفة

وبالمثل تتفق هذه النتائج مع دراسة الخنين والمشعل (2024) التي خلصت إلى أن درجة ممارسة التعاقب الوظيفي وإدارة الكفاءات بشكل عام بجامعة الأمير سطام جاءت بدرجة متوسطة، وأرجعت ذلك إلى اهتمام الجامعة بتطوير الموارد البشرية بشكل عام دون التركيز على الكفاءات. وتُعزى هذه النتيجة إلى جملة من الأسباب تتمثل في غياب الرؤية الاستراتيجية طويلة المدى التي تضمن استدامة القيادة، إضافة إلى تركيز الشركات على تلبية الاحتياجات التشغيلية الفورية خلال الموسم أكثر من الاستثمار في بناء صف قيادي بديل. كما أن ضعف آليات نقل الخبرة والمعرفة من القادة الحاليين إلى المرشحين الجدد، وعدم وضوح سياسات التعاقب، يعكس قصوراً في دمج التعاقب ضمن إدارة الكفاءات كعملية مستدامة. بالتالي فإن هذه النتائج تشير إلى أن التعاقب الوظيفي لا يزال يمثل تحدياً أساسياً للشركات الموسمية، ما يستدعي تفعيل استراتيجيات أكثر وضوحاً وفاعلية في هذا الجانب

جدول (7): نتائج اختبار T-test حسب طبيعة العمل (موسمي - دائم)

طبيعة العمل	العدد	المتوسط	الانحراف المعياري	قيمةT	(df)	مستوى الدلالة(Sig)
موسمي	17	3.056	0.704	-0.018	49	0.986
دائم	34	3.060	0.671			

يتضح أن الفروق بين العاملين في الوظائف الموسمية (3.056) والدائمة (3.060) تكاد تكون معدومة. كما أن قيمة الدلالة (Sig = 0.986) أكبر من 0.05، مما يشير إلى أن طبيعة العمل لا تؤثر بشكل معنوي على تصورات أفراد العينة حول دور إدارة الكفاءات في تحقيق استدامة الأداء القيادي لخدمة ضيوف الرحمن

جدول (8): نتائج تحليل التباين الأحادي (ANOVA)لمتغير سنوات الخبرة

مصدر التباين	مجموع المربعات	درجات الحرية	متوسط المربعات	قيمةF	مستوى الدلالة(Sig)
بين المجموعات	1.685	2	0.843	1.914	0.159
داخل المجموعات	21.138	48	0.440		
المجموع الكلي	22.824	50			

أظهرت نتائج تحليل التباين الأحادي أن قيمة (F = 1.914) غير دالة إحصائيًا عند مستوى (= Sig 0.05 < 0.159)، مما يعني عدم وجود فروق معنوية بين متوسطات المجموعات وفق سنوات الخبرة

القسم الرابع/ الآليات المقترحة لتفعيل مدخل إدارة الكفاءات في تحقيق استدامة الأداء القيادي

إجابة السؤال الثالث والذي ينص على: ما هي الآليات المقترحة لتفعيل إدارة الكفاءات في تحقيق استدامة الأداء القيادي لخدمة ضيوف الرحمن بشركات مقدمي الخدمة للحجاج؟

يتناول هذا القسم الآليات المقترحة لتفعيل مدخل إدارة الكفاءات في شركات مقدمي الخدمة، وتتمثل أبرز هذه الآليات فيما يلي

أ- استقطاب الكفاءات:

1. اعتماد إطار كفاءات مؤسسي موحّد يحدد المعارف والمهارات والسلوكيات المطلوبة لشغل المناصب القيادية في شركات مقدمي الخدمة، واستخدامه كمرجع أساسي في جميع قرارات الاختيار والتعيين لضمان الشفافية.

2. تطوير أدوات تقييم مبنية على الكفاءات، بما يتيح قياس التوافق بين المرشحين والمعايير القيادية المحددة

3. الإعلان الوظائف القيادية الموسمية عبر القنوات الرسمية، بما في ذلك المنصات الإعلامية للشركة، والحسابات الرسمية على مواقع التواصل الاجتماعي؛ لضمان وصولها إلى أوسع شريحة ممكنة من الكفاءات المؤهلة

ب- تنمية الكفاءات:

1. إجراء تقييم دوري لجودة ونوعية البرامج التدريبية عبر وسائل متنوعة، مما يسهم في الكشف عن مدى ملاءمتها وفاعليتها في تطوير الكفاءات القيادية.

2. عقد شراكات تعاون بين شركات مقدمي الخدمة للحجاج ومنصة تأهيل وترخيص العاملين التابعة لوزارة الحج والعمرة، بما يضمن تصميم برامج تدريبية معتمدة، ومتوافقة مع المعايير الوطنية

3. تصميم برامج تدريبية متخصصة في مجال القيادة بعد كل موسم، تركز على الدروس المستفادة والتحديات التي واجهت القادة، بهدف رفع جاهزيتهم للمواسم المقبلة

ج- الاحتفاظ بالكفاءات:

1. تطبيق نظام حوافز قائم على الكفاءة ويتسم بالوضوح والفاعلية، يشمل المكافآت المالية الموسمية، والحوافز المعنوية مثل شهادات التقدير وخطابات الشكر، بما يعزز الرضا الوظيفي

2. تفعيل التعاون وتبادل الخبرات مع الشركات الأخرى من خلال ورش عمل أو اتفاقيات شراكة للاطلاع على التجارب الناجحة في تقليل تسرب الكفاءات القيادية والاحتفاظ بها.

3. استخدام استبانات دورية لقياس الرضا الوظيفي لدى القيادات، وتحليل الاستجابات لاستخلاص مؤشرات عملية تساعد الشركات على اتخاذ الإجراءات الصحيحة في الاحتفاظ بالكفاءات لديها.

د- التعاقب الوظيفي:

1. إعداد خطط شاملة للتعاقب الوظيفي تتضمن وضع آليات محددة لتحديد الاحتياجات المستقبلية من القياديات، مع مراعاة توافق تلك الخطط مع أهداف الشركة واستراتيجياتها المستقبلية

2. تأهيل القيادات من الصف الثاني من خلال المتابعة والاشراف المباشر، لإكسابهم الخبرات والمهارات القيادية اللازمة، بما يضمن جاهزيتهم لتولي المناصب القيادية في المستقبل

3. تفعيل آليات منظمة لنقل الخبرات والمعارف من القادة الحاليين إلى المرشحين المحتملين عبر برامج متنوعة كالتدريب أثناء العمل، أو مجموعات العمل الداخلية، أو التظليل الوظيفي، لضمان استدامة الأداء القيادي دون فجوات

4. تحديد المناصب القيادية الحرجة داخل الشركة، وتأهيل قادة بدلاء محتملين لشغلها عند الحاجة، من خلال برامج عملية وتكليفات ميدانية، بما يضمن استمرارية الأداء القيادي ودون فجوات.

التوصيات:

بناء على ما توصل إليه البحث من نتائج، فإنه يوصي بما يلي:

- تصميم إطار كفاءات معياري موحَّد يتمثل في إعداد دليل للكفاءات القيادية الموسمية يحدد بوضوح الجوانب الأساسية المطلوبة لشغل المناصب القيادية ويُعتمد هذا الدليل كإطار معياري موحد يُستخدم في إعلانات التوظيف، وإجراءات المقابلات، وعمليات التقييم، بما يضمن توحيد المعايير وتحقيق أعلى مستويات الكفاءة في اختيار القيادات الموسمية، بحيث يشمل

أ- المهارات الفنية: مثل إدارة الحشود وإدارة المخاطر.

ب- المعارف التنظيمية: مثل اللوائح والقوانين ذات العلاقة.

ت- السلوكيات القيادية: مثل المرونة وسرعة اتخاذ القرار.

- تطوير سياسات فعّالة للاحتفاظ بالكفاءات عن طريق تصميم نظام حوافز مرن يرتبط بالأداء، يتضمن مكافآت مالية، وحوافز غير مالية (شهادات تقدير، فرص تدريب إضافي، أولوية في التعاقد لمواسم لاحقة).

- الاستثمار في استدامة المعرفة المؤسسية من خلال إنشاء منصة رقمية أو قاعدة بيانات مؤسسية لتوثيق الدروس المستفادة، والتقارير التشغيلية، وخطط الطوارئ. وتكليف وحدة الموارد البشرية

بمتابعة تحديثها بعد كل موسم، بما يضمن تكوين ذاكرة تنظيمية مشتركة

- وضع خطط إستراتيجية للتعاقب الوظيفي تشمل تحديد المناصب القيادية الحرجة، ترشيح بدائل داخلية وتدريبهم عبر برامج إعداد قيادي موسمية، وتبني آليات نقل خبرة رسمية من القادة الحاليين (مثل الإرشاد والتوجيه المباشر)

قيود البحث ومقترحات لأبحاث مستقبلية:

تجدر الإشارة إلى أن هذا البحث اقتصر في نطاقه على شركات مقدمي الخدمة لحجاج الخارج خلال موسم حج عام 1446هـ، مما قد يحدّ من تعميم نتائجه على مواسم أو بيئات تنظيمية أخرى. كما اعتمد البحث على المنهج الوصفي التحليلي، وهو ما يوفّر فهماً عميقاً للواقع الحالي، لكنه لا يكشف عن العلاقات السببية بشكل كامل

وفي ضوء ذلك، يقترح البحث إجراء أبحاث مستقبلية تشمل:

- تطبيق النموذج البحثي في مواسم حج مختلفة أو في قطاعات خدمية أخرى؛ للمقارنة وتعزيز التعميم

- توظيف مناهج بحثية كمية وكيفية متقدمة (مثل النمذجة بالمعادلات البنائية أو دراسات الحالة) لاختبار العلاقات السببية بين أبعاد إدارة الكفاءات واستدامة الأداء القيادي

المراجع:

- أحمد، عبد الناصر محمد سيد. (2024). الاستدامة التنظيمية: التعريف والأهداف والأهمية والأنواع والمبادئ والأبعاد. المجلة العربية للآداب والدراسات الإنسانية، 8(30)، 237-248.

- آل صليع، جابر ناصر. (2023). دور إدارة الكفاءات في تحقيق الأداء المتميز في مؤسسات التعليم منطقة نجران- تصور مقترح. المجلة الدولية لأنظمة إدارة التعلم، 11(1)، 33-49.

- برنامج خدمة ضيوف الرحمن. (2021). خطة تنفيذ برنامج خدمة ضيوف الرحمن (2021-2025). https://nz.sa/nxZcM

- برنامج خدمة ضيوف الرحمن. (2023). برنامج خدمة ضيوف الرحمن التقرير السنوي لعام 2023. https://nz.sa/CpoEK.

- الخنين، حصة محمد، والمشعل، نورة حمد. (2024). واقع إدارة الكفاءات الأكاديمية بجامعة الأمير سطام بن عبد العزيز. مجلة العلوم الاقتصادية والإدارية والقانونية، 8(7)، 80-98.

- الزهراني، نسرين بنت علي. (2025). إستراتيجية مقترحة لتطوير الموارد البشرية بجامعة أم القرى في ضوء إدارة الكفاءات. مجلة العلوم التربوية والنفسية، 18(1)، 343-384.

- عبدالتواب، فاطمة عمر. (2023). تطوير منظومة التعليم الثانوي الفني الصناعي بمصر في ضوء مدخل إدارة الكفاءات: آليات مقترحة. مجلة كلية التربية بجامعة بني سويف، 20(118)، 487- 517.

- عسيري، زهرة محمد. (2025). استقطاب الكفاءات القيادية والاحتفاظ بها في الإدارات التعليمية من مدخل إدارة الكفاءات. المجلة العلمية لكلية التربية جامعة الوادي الجديد، 17(53)، 204-224.

- العيدروس، أغادير ينت سالم. (2024). أثر إدارة الكفاءات على الإدارة بالمسؤولية في جامعة أم القرى. المجلة التربوية الشاملة، 2(3)، 1-39.

- الغامدي، فوزية علي. (2022). دور إدارة الكفاءات البشرية في تحقيق التميز المؤسسي بجامعة الملك عبد العزيز من وجهة نظر أعضاء هيئة التدريس. مجلة كلية التربية بجامعة طنطا، 88(4)، 1169-1208.

- المجلس التنسيقي لشركات أرباب الطوائف ومقدمي خدمة حجاج الخارج. (1446ه). بيان شركات مقدمي الخدمة لموسم حج عام 1446ه. (وثيقة داخلية غير منشورة)

- المجلس التنسيقي لشركات أرباب الطوائف ومقدمي خدمة حجاج الخارج. (1445ه). التقرير السنوي لعام 1445ه. https://tinyurl.com/y39ej3dn

- مجلس الوزراء. (1440). قرار رقم 454 بتاريخ 1440/9/16هـ بشأن نظام مقدمي خدمة حجاج الخارج. موقع هيئة الخبراء بمجلس الوزراء. https://laws.boe.gov.sa

- الهيئة العامة للإحصاء. (2025). الملخص التنفيذي لإحصاءات الحج 2025 (1446ه). https:// www.stats.gov.sa/w/news/49

- Agustian, B., Absah, Y., & Sadalia, I. (2023). Influence of talent management on succession planning through leadership skills. In W. R. Murhadi et al. (Eds.), Proceedings of the 19th International Symposium on Management (INSYMA 2022), Advances in Economics, Business and Management Research (AEBMR), Vol. 660 (pp. 618–625). Atlantis Press.

- Al Shraah, A., & Alnsour, J. (2025). The impact of leadership styles on business continuity through the mediation of corporate sustainability. Journal of Posthumanism, 5(7), 750–770.

- Armani, A. B., Petrini, M., & Santos, A. C. (2020). What are the attributes of sustainable leadership? Revista Brasileira de Gestão de Negócios, 22(4), 820–835.

- Azmi, M. A. S. M., Ibrahim, M. A. A., Shukor, M. S. H. M., Rahim, A. A. I. A., Puteh, F., & Kamal, A. N. A. (2025). Succession planning for organisational survival: Challenges and recommendations. Journal of Business Management and Accounting, 15(1), 1–13.

- Bahri, E. S., & Salsiati. (2025). Competency-based Human Resource Development Strategy. International Journal of Strategic Studies, 2(1), May 2025.

- Bai, Y., & Jiang, D. (2025). Research on optimizing management courses based on the competency model. Journal of Higher Education Teaching, 2(2), 277–282.

- Bessaid, O. N., & Benyahia, C. (2023). The role of competency management in improving enterprise innovation: The case of some productive enterprises in the state of Tlemcen, Algeria. Journal of Advanced Economic Research, 8(1), 27–39.

- Boateng, R., Odikro, D., & Turkson, J. K. (2022). A thematic approach to succession planning, leadership continuity, and organizational growth: Spotlight on chief executive

Performance Management, 68(4), 797–816.

- Snippe, L., & Kara, A. (2023). Strategic risk leadership and sustainability in an ever-changing environment. Studies in Risk and Sustainable Development, 397, 1–18.

- Suksawas, W., Keawkhongdee, S., Sukhummek, C., & Boonrawd, N. (2023). Designing strategic career pathways: A competency-based approach to progression management in the educational context of a corporate university in Thailand. Journal of Educational Issues, 9(1), 424–437.

- Syamsir, S., Saputra, N., & Mulia, R. A. (2025). Leadership agility in a VUCA world: A systematic review, conceptual insights, and research directions. Cogent Business & Management, 12(1), 2482022.

- Yarangga, R. E., Ibrahim, M. B. H., Irawan, A., Akbar, M. A., & Rasyid, A. (2023). Succession excellence: Nurturing leadership talent for sustainable organizational success. Advances: Journal Ekonomi & Bisnis, 1(6), 317–331.

officers in Ghanaian industry. African Journal of Applied Research, 8(2), 83–100.

- Boeske, J. (2023). Leadership towards sustainability: A review of sustainable, sustainability, and environmental leadership. Sustainability, 15(16), 12626.

- Castillo Arias, L. F. P. (2021). Competency-based management for organizational development at Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Industrial Data, 24(1), 97–120.

- Chine, F., Chine, N., Taferguennit, Z., Chine, S., & Mohamed, T. (2023). Competency approach: concepts, types, and management of competencies. Indian Journal of Economics and Business, 22(3), 33–50.

- Daversa, M. C. A., & Farias, A. (2024). Sustainability and public management: Focusing on leadership and on the development of competences. Revista de Gestão Social e Ambiental, 18(12), 1–16.

- Fomenko, N. (2025). The competency-based approach to the management of human resource development. Economies' Horizons, 1(30), 71–81.

- Hamzah, M. F., & Tanai, G. D. (2024). The impact of competency-based human resources management and the resource-based approach on creative performance by mediating the knowledge economy: Analytical research in the Central Bank of Iraq. Journal of Economics and Administrative Sciences, 30(142), 51–68.

- Iqbal, Q., & Ahmad, N. H. (2021). Sustainable development: The colors of sustainable leadership in learning organization. Sustainable Development, 29(1), 108–119.

- Mohammed, R. Y. M. (2024). Sustainability leadership in Saudi non-profit organizations: A qualitative insight governance. Public Administration Research, 13(1), 13–27.

- Roy, A. B., & Ray, S. (2025). Competency-based human resource management: A practitioner's handbook. Taylor & Francis.

- Samuel, I., & Isa, M. Y. M. (2024). The mediating role of talent management in succession planning and private organization sustainability: A conceptual article. Journal of Current Social and Political Issues, 2(1), 22–33.

- Saxena, S., Gujral, H. K., & Pathak, S. (2022). A study of competency-based approach to identify high performers among disaster management professionals. Studies of Applied Economics, 40(S1).

- Septiadi, M. A., & Ramdani, Z. (2024). Competency-Based Human Resources (HR) Development in the Digital Era. Journal of Current Social and Political Issues, 2(2), 113–124.

- Shet, S. V., Patil, S. V., & Chandawarkar, M. R. (2019). Competency based superior performance and organizational effectiveness. International Journal of Productivity and

الرصد اللحظي عن السلوكيات غير الطبيعية أثناء الحشود في موسم الحج

ألفت معراج مرزا - قسم علم البيانات، كلية الحاسبات، جامعة أم القرى، معهد خادم الحرمين الشريفين لأبحاث الحج والعمرة

Real-Time Detection of Anomalous Behavior in Hajj Crowdsfrom the 1446H Hajj Season

Olfat M. Mirza - Data Science Department, Computing College, Umm Al Qura University, The Custodian of Two Holy Mosques Institute for Hajj and Umrah Research
*Corresponding author: E-mail (ommirza@uqu.edu.sa)

الملخص

هذه الدراسة تبحث تحدي من خلال صياغة مهمة الكشف عن السلوك غير الطبيعي باعتبارها مهمة كشف عينات متعددة الفئات، باستخدام قاعدة البيانات المتخصصة HAJJv2، والتي تحتوي على أكثر من 255,000 حالة معنونة موزعة على سبع عينات مختلفة من السلوكيات غير الطبيعية. وللتقليل من الانحياز المرتبط بالمشاهد، تم اعتماد استراتيجية تقسيم على مستوى الإطارات بنسبة 20/80 لكل فيديو. تم إجراء تحليل شامل لعائلة نماذج YOLO، مع التركيز على أحدث بنية وهي YOLOv12 بمستوياتها المختلفة (Nano, Small, Medium, Large)، ومقارنتها بالإصدارات السابقة. وقد استند التدريب إلى التعلم بالنقل باستخدام أوزان مُدرّبة مسبقاً على COCO، بالإضافة إلى تطبيق واسع لتقنيات زيادة البيانات الهندسية والفوتومترية، بما في ذلك تقنية mosaic augmentation لتعزيز قدرة النموذج على التعميم. نُفذت التجارب باستخدام PyTorch مع ضبط موحد للمعاملات الفائقة، وتم تقييم الأداء عبر معايير: متوسط الدقة (mAP)، والدقة (Precision)، والاستدعاء (Recall)، وسرعة الاستدلال (FPS).

أظهرت النتائج تقدماً واضحاً في قدرات الكشف عبر أجيال YOLO، حيث حقق نموذج YOLOv12-Medium التوازن الأمثل بين الدقة (mAP@0.5 = 98.1%) والكفاءة، بينما حقق نموذج YOLOv12-Large أعلى مستويات الدقة (0.982) والاستدعاء (0.993). أما نموذج YOLOv12-Nano، فعلى الرغم من كونه أخف، فقد حافظ على دقة تنافسية مع سرعة استدلال أقل من جزء من الألف من الثانية، مما يجعله مناسباً للنشر على الحواسيب الطرفية (Edge Deployment). تُرسّخ هذه النتائج مكانة YOLOv12-Medium كحل متقدّم (state-of-the-art) للكشف الفوري عن السلوكيات غير الطبيعية في البيئات ذات الكثافة البشرية العالية، مما يوفر معياراً عملياً لتعزيز السلامة خلال موسم الحج وغيره من التجمعات الجماهيرية الكبرى

الكلمات الدالة: اكتشاف السلوك غير الطبيعي في الحشود، YOLOv12، قاعدة بيانات HAJJv2، المراقبة في الوقت الحقيقي، متوسط الدقة (mAP).

Abstract

The annual Hajj pilgrimage presents one of the most significant challenges in global crowd management, where extreme participant density amplifies the risks posed by abnormal behaviors such as sudden immobility, running, or movement against the crowd flow. Automated surveillance systems capable of real-time detection and intervention are therefore essential to ensuring public safety. This study addresses this challenge by framing abnormal behavior detection as a multi-class object detection task using the specialized HAJJv2 dataset, which includes over 255,000 annotated instances across seven distinct abnormal categories. To mitigate scene-specific bias, a rigorous per-video 80/20 frame-level partitioning strategy was applied. We conduct a comprehensive comparative analysis of the YOLO family of models, focusing on the latest YOLOv12 architecture and its scalable variants (Nano, Small, Medium, Large), and benchmarking them against earlier YOLO versions. Training leveraged transfer learning with COCO-pretrained weights and extensive geometric and photometric data augmentation, including mosaic augmentation, to maximize generalization. Experiments were implemented in PyTorch with standardized hyperparameters and performance measured by mean Average Precision (mAP), precision, recall, and inference speed (FPS).

Results demonstrate a clear progression in detection capability across YOLO generations, with YOLOv12-Medium achieving the optimal balance of accuracy (mAP@0.5 = 98.1%) and efficiency, while YOLOv12-Large attained the highest precision (0.982) and recall (0.993). YOLOv12-Nano, though lighter, maintained competitive accuracy with sub-millisecond inference, highlighting its suitability for edge deployment. Collectively, these findings establish YOLOv12-Medium as a state-of-the-art solution for real-time abnormal behavior detection in dense crowd environments, offering a practical benchmark for enhancing safety during Hajj and other mass gatherings.

Keywords: Abnormal Crowd Behavior Detection, YOLOv12, HAJJv2 Dataset, Real-Time Surveillance, Mean Average Precision (mAP).

1. Introduction

The Hajj, an annual pilgrimage to Makkah, Saudi Arabia, represents one of the world's largest religious gatherings, drawing more than two million individuals from diverse cultural and national backgrounds. This vast heterogeneity creates unique challenges in identifying and interpreting abnormal behavioral patterns among pilgrims. To effectively address these behavioral complexities, continuous monitoring through large-scale surveillance becomes indispensable, thereby creating a pressing need for computational techniques capable of processing the immense volume of video data produced during Hajj. However, the vast volumes of surveillance video generated during Hajj necessitate sophisticated computational approaches(Al-Salhie, Al-Zuhair, & Al-Wabil, 2014) capable of classifying and detecting crowd density in real time, thereby enabling rapid intervention in potentially hazardous circumstances (Felemban, Rehman, Biabani, Ahmad, Naseer, Majid, et al., 2020). Traditional manual monitoring methods are inadequate for such large-scale gatherings, as they are labor-intensive, time-consuming, and unable to cope with the complexity of the event (Gazzawe & Albahar, 2024). In contrast, machine learning techniques have emerged as a dependable means of automating crowd analysis, allowing direct estimation of density levels from video frames (Bhuiyan, 2022).

Despite these advances, regulating crowd density at Hajj remains inherently challenging (Al-Shaery, Ahmed, Aljassmi, Al-Hawsawi, Maksoud, Tridane, et al., 2024). Issues such as noisy or low-quality video input (Albattah, Khel, Habib, Islam, Khan, & Abdul Kadir, 2020), environmental limitations including poor visibility, and the presence of non-pedestrian objects (Halboob, Altaheri, Derhab, & Almuhtadi, 2024), for example, circulating fans or vehicles in proximity to the Kaaba, complicate accurate detection. These factors frequently contribute to false alarms or missed events (Salih & Simsim, 2014), which may in turn delay responses and escalate safety risks. Moreover, behaviors intrinsic to the pilgrimage, such as large groups moving together (Jabbari, 2023) or ritual congregations, can be misclassified as abnormal or dangerous under conventional detection paradigms.

To address this, the present study undertakes a systematic process of defining, annotating, and labeling such abnormal behaviors specifically within the context of Hajj. The investigation is firmly rooted in an extensive review of prior work, linking abnormal actions to potential risks that may disrupt the controlled movement of dense crowds. Building on the foundation established by Alafif, Hadi, Allahyani, Alzahrani, Alhothali, Alotaibi, et al. (2022), the core objective of this study is to develop automated methods for detecting, tracking, and recognizing these behaviors through surveillance systems, thereby supporting both pilgrim safety and uninterrupted crowd flow. Additionally, the proposed framework provides critical insights to law enforcement and policy makers, enabling them to forecast and mitigate threats tied to crowd dynamics.

This paper introduces a detection system tailored for the Hajj environment that employs the HAJJv2 dataset in combination with the YOLOv9 model. A comprehensive description of the architecture is provided, and experimental findings demonstrate the system's capacity to identify abnormal behaviors accurately, ultimately promoting safer and more orderly pilgrim movements. The central contributions of this research can be summarized as follows:

- Enhanced anomaly detection in hajj scenarios: Development of a refined YOLOv10,11 and 12-based abnormal behavior detection system trained on the HAJJv2 dataset, with a complete architectural description and empirical validation proving its effectiveness.
- Improved accuracy via YOLOv12-Medium: Leveraging YOLOv12's strengths in deep learning to achieve superior detection accuracy, particularly for subtle behavioral anomalies that traditional image processing fails to capture.
- Real-time capabilities for dynamic environments: Exploiting YOLOv12's ability to process detections in real time, which is essential for the crowded and constantly shifting conditions of the Hajj, ensuring prompt intervention when irregularities occur.
- Flexible application across hajj data: Demonstrating adaptability of the framework beyond abnormal behavior detection by extending YOLOv12's utility to other objects of interest within the dataset, creating a versatile tool for broader crowd monitoring tasks.
- Reduction of false alarms: Employing the discriminative power of deep learning to lower the rate of false alerts during detection, minimizing unnecessary emergency actions and resource expenditure.
- Cost-conscious implementation: Designing the system to operate efficiently with low-cost cameras and hardware, providing a financially sustainable solution for large-scale deployment in the Hajj context.
- Use of large-scale and diverse data: Applying YOLOv12 to a rich dataset containing varied and realistic imagery of Hajj behaviors, thereby improving generalization, boosting detection precision, and reducing risks of overfitting to context-specific noise.

2. Related Work

Historically, many systems for crowd analysis relied on manually designed descriptors that fed expert rules or neural models. Texture-based cues, in particular, have proven effective for recognizing regular or near-regular image patterns (Ardizzone, Bruno, & Mazzola, 2013), and subsequent work used texture descriptors to estimate crowd density, underscoring

the flexibility of texture-driven pipelines (Saqib, Khan, & Blumenstein, 2016). A separate line of inquiry drew from physics and fluid dynamics to model collective motion (Dogbe, 2012), though real-world video nonlinearities complicate their use and demand robust handling strategies for reliable inference (Tripathi, Singh, & Vishwakarma, 2019).

Methodological sophistication has grown in recent years. Solmaz, Moore, and Shah (2012) proposed a large-scale anomaly detector that leverages linear estimation with Jacobians, optical flow, and particle advection. Other studies extracted features via clustering (C. Wang, Zhao, Wu, & Liu, 2013) or fused motion history images with segmented optical flow to flag abnormal activity (Alqaysi & Sasi, 2013). Further advances mapped wide-area flows and pathways via trackless association (Zou, Zhao, & Liu, 2015). Building on this, Bera et al. explored irregular patterns through Bayesian learning (Bera, Kim, & Manocha, 2016), while Pennisi, Bloisi, and Iocchi (2016) improved detection by segmenting derived features. More recently, Fradi, Luvison, and Pham (2016) and Shuang Wu, Yang, Zheng, Su, Fan, and Yang (2017) emphasized descriptors of large-scale crowd characteristics to push recognition forward. In the Hajj context, Alafif, et al. (2022) introduced two CNN–Random Forest hybrids and released the carefully annotated HAJJv2 dataset to benchmark diverse large-crowd anomalies.

To mitigate nonlinearity challenges, several computer-vision approaches examine groups exhibiting coherent motion (Shandong Wu, Moore, & Shah, 2010). Others perform path modeling, and psychology-informed analyses contribute insights for emergencies and situational awareness (Rodriguez, Laptev, Sivic, & Audibert, 2011). Across these threads runs a common imperative: stronger security and monitoring in dense environments, enabling tasks such as tracking, anomaly detection, behavior pattern mining, and context-aware counting. Even with deep learning's accuracy gains, the field continues to wrestle with density variation, irregular spatial distributions, occlusions, and pose-estimation difficulties(Alsabei, Alsubait, & Alhakami, 2025; Khan, Ali Shah, Kadir, Albattah, & Khan, 2020). Deep models also impose heavy data demands for training/validation/testing, can suffer from spurious (false) regressions, and often incur high compute costs due to dataset scale. To address data limitations, a comprehensive and publicly shareable corpus is being assembled. Unlike prior studies that primarily focused on abnormal behavior detection using CNN-based methods, the work of Shah (2025) introduces a machine learning framework that specifically addresses real-time crowd density classification in Hajj video frames by integrating Local Binary Pattern (LBP) texture analysis with edge and area-based features, thereby offering a practical early-warning mechanism for hazardous crowd conditions. Nasir, Jalil, Nasir, Alsubait, Ashraf, and Saleem (2025) introduces CADF, a YOLOv8-based anomaly-detection framework augmented with Soft-NMS to better handle occlusions and appearance uniformity in dense Hajj crowds, achieving state-of-the-art performance on Hajjv2 (AUC = 88.27, Accuracy = 91.6%) with clear gains over YOLOv2/YOLOv5 and demonstrating cross-dataset generalizability (UCSD, ShanghaiTech) for real-time deployment. Alsabei, Alsubait, and Alhakami (2025) operationalizes YOLOv9 for real-time abnormal-behavior detection in dense Hajj crowds and via a few-shot sampling plus targeted augmentations to address occlusion and viewpoint shifts achieves superior mAP@0.5, precision, and recall over YOLOv4/5/7/8 on the HAJJv2 benchmark. Alzahrani and Algethami (2025) advances Hajj crowd management by combining unsupervised anomaly detection (Isolation Forest) with time-series forecasting (LSTM) on the Hajjv2 dataset, providing a dual real-time alert and predictive mechanism that surpasses traditional monitoring systems through proactive risk identification and crowd behavior forecasting.

Regarding model families:

CNNs. Convolutional networks suit image-centric anomaly detection in Hajj settings by capturing appearance cues (e.g., color, texture). They are straightforward and can deliver strong accuracy with abundant data and real-time throughput, but struggle in cluttered scenes or low light and typically require substantial training sets.

RNNs. Recurrent models capture temporal dependencies in videos and thus enhance anomaly detection, yet they tend to be computationally heavy, may fail on long-range dependencies, and also need large datasets.

YOLOv2. A single-network detector that predicts boxes and classes jointly enables high-accuracy, real-time operation; nevertheless, complex backgrounds, dim lighting, and data hunger remain hurdles.

YOLOv3. With a more advanced architecture than YOLOv2, it better handles challenging scenes and low light but at increased computational cost while still achieving accurate real-time detection.

YOLOv4. Adds architectural and training enhancements, typically improving robustness to difficult backgrounds and lighting, again trading off for greater resource use.

YOLOv5. Introduces a lighter-weight design and features such as auto anchor optimization; it is faster and often more accurate than YOLOv4 across benchmarks, yet still data-hungry and not always reliable for small or complex-shaped objects.

YOLOv8. Ultralytics' successor to YOLOv5 brings architectural refinements and further improvements relative to YOLOv5.

YOLOv9. Introduces Programmable Gradient Information (PGI) with an auxiliary reversible branch (used only at training) plus the GELAN backbone, boosting accuracy/

parameter-efficiency, especially for smaller models without adding inference cost; still relies on single-frame cues and standard NMS, so performance in severe occlusion/low light remains dataset- and augmentation-dependent

YOLOv10. Pushes real-time, end-to-end/NMS-free deployment via consistent dual assignments and a holistic efficiency–accuracy–driven redesign of heads/necks/backbones, delivering state-of-the-art speed–AP tradeoffs (e.g., ~46% lower latency than YOLOv9-C at similar AP for the "B" size) while keeping compute modest; as with prior YOLOs, strong results still hinge on high-quality data and careful training under challenging lighting/clutter (A. Wang, Chen, Liu, Chen, Lin, & Han, 2024).

These models exhibit distinct strengths alongside practical trade-offs that must be matched to the application. Open issues include: CNN sensitivity to cluttered or poorly lit scenes; RNNs' computational burden and difficulty with long-term dependencies; YOLOv2's challenges under complex backgrounds/low light and its data needs; YOLOv3's higher compute demand than YOLOv2; YOLOv4's still-higher requirements; and YOLOv5's continuing dependence on large datasets and its difficulties with tiny or intricate targets. Beyond modeling, progress also hinges on broader, richer datasets and resilience to low-quality cameras and adverse illumination. Building on these points, later YOLO variants also have caveats. YOLOv8, despite strong accuracy and speed, still relies on NMS (Liu & Han, 2025), so dense occlusions can trigger duplicate/missed boxes, and very small or distant targets remain challenging. YOLOv9 improves training signals via PGI and the GELAN backbone (Anand & Dwivedi, 2025) but adds extra training-time machinery (the PGI/reversible branch) and, like earlier YOLOs, still depends on NMS and single-frame cues (Peng, Cui, & Wu, 2025), which are limitations that can surface in crowded, low-light Hajj footage. YOLOv10 removes NMS through consistent dual assignments and a redesigned, efficiency–accuracy–balanced architecture, yielding lower latency at similar AP on COCO (A. Wang, Chen, Liu, Chen, Lin, & Han, 2024); however, benefiting from its end-to-end design typically requires retraining and pipeline changes, and published ence remains COCO-centric rather than domain-specific.

The present work adopts YOLOv10, 11 and 12 for anomaly detection in Hajj scenarios on HAjjv2 dataset (Alafif, et al., 2022) and, to the best of our knowledge, constitutes the first application of these last models in this domain. The goal is to improve accuracy, real-time responsiveness, adaptability, and cost efficiency for large-crowd surveillance.

3. Methodology

This section details the comprehensive methodological framework employed in this study. We begin by defining our problem formulation, framing abnormal behavior identification as a real-time object detection task. We then provide a thorough description of the HAJJv2 dataset (Alafif, et al., 2022) and the meticulous preprocessing and partitioning strategies applied. Subsequently, we present an in-depth overview of the YOLOv12 architecture and its scaled variants. Finally, we elaborate on the critical training strategies, including transfer learning and data augmentation, that were leveraged to maximize model performance and generalization. Figure 1 illustrates the overall workflow of our proposed approach, summarizing the progression from input video frames through preprocessing, augmentation, and YOLOv12-based feature extraction to the final detection of abnormal crowd behaviors.

3.1. Abnormal behavior detection

The complex and often subtle task of identifying abnormal crowd behavior is, in this work, framed as a concrete and solvable multi-class object detection problem. This paradigm shifts the focus from analyzing holistic scene dynamics to localizing and classifying specific, predefined anomalous behaviors exhibited by individuals or entities within the crowd. Each of the seven identified abnormal behaviors, such as ‹sitting› or ‹running›, is treated as a distinct object class.

The core objective of our system is to process each frame from a surveillance video feed and output a set of bounding boxes, where each box precisely localizes an instance of an abnormal behavior. Each bounding box is accompanied by a corresponding class label and a confidence score, indicating the model›s certainty in its prediction. This frame-by-frame detection approach was deliberately chosen for its inherent suitability for real-time applications. Unlike more computationally intensive spatial-temporal methods that analyze sequences of frames, a highly optimized single-stage detector can provide the low-latency feedback essential for a live security monitoring system, enabling rapid intervention when a potential risk is identified.

3.2. Dataset and preprocessing

This study utilizes the HAJJv2 dataset, a challenging and highly relevant public benchmark for abnormal crowd behavior analysis introduced by (Alafif, et al., 2022). The dataset is composed of 18 high-resolution videos in mp4 format, which were manually captured during the annual Hajj pilgrimage. These videos provide a realistic depiction of crowd dynamics across various significant locations of the Hajj, including the densely populated 'Massaa,' 'Jamarat,' 'Arafat,' and 'Tawaf' areas.

The dataset has been manually annotated to identify seven distinct categories of abnormal behaviors. These categories include individuals who are stationary for extended periods amidst a moving crowd (standing), those seated in areas designated for walking (sitting), individuals lying down due to exhaustion or fainting (sleeping), abrupt running that could

signify panic or emergency (running), movement directly against the main flow of the crowd (moving_in_opposite), irregular movement that deviates from the general crowd direction (different_crowd_direction), and the presence of non-pedestrian entities such as wheelchairs or service vehicles (moving_non_human_object). Figure 2 provides visual examples of each of these seven annotated classes, illustrating the visual complexity and intra-class variation present in the dataset.

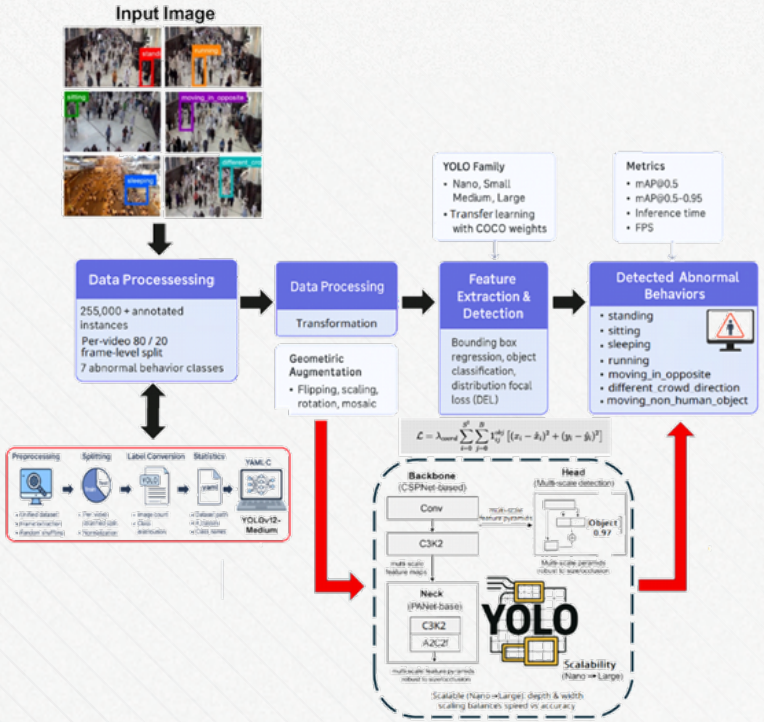


Figure 1. YOLO-based pipeline for abnormal crowed behavior detection. Input images are preprocessed and augmented, then passed through the YOLOv 12 architecture (CSPNet backbone, PANet neck, multi-scale head) for feature extraction and detection.

To establish a rigorous foundation for model training and evaluation, we implemented a custom data partitioning strategy. Standard approaches that split videos into training and testing sets can inadvertently introduce bias if certain scenes or environmental conditions are unique to one set. To mitigate this, the original Training and Testing divisions of the dataset were consolidated into a single pool of 18 videos. Subsequently, each video was processed individually by extracting all its constituent frames. The collection of frames from each video was then randomly shuffled and partitioned, allocating a substantial 80% to the training set and the remaining 20% to the validation and testing set. This per-video, frame-level splitting strategy is critical for ensuring that the unique visual characteristics of every scene (e.g., lighting, crowd density, camera angle) are represented in both the training and testing data. This process prevents the model from merely memorizing specific scenes and instead promotes the learning of generalizable features, leading to a more reliable assessment of its real-world performance. The final, detailed statistics of the dataset following this partitioning process are presented in Table 1.



Figure 2. Examples of annotated crowd behaviors in Hajj surveillance scenarios. Seven representative activity categories are illustrated: (i) standing, (ii) sitting, (iii) sleeping, (iv) running, (v) moving in opposite direction, (vi) different crowd direction, and (vii) moving non-human objects.

Table 1: Statistical distribution of crowd behavior annotations in the proposed dataset with an 80/20 train–test split

Class Name	Training Set (80%)	Testing Set (20%)	Total
Standing	17,638	6,052	23,690
Sitting	132,995	41,948	174,943
Sleeping	3,425	1,087	4,512
Running	151	54	205
Moving In Opposite	29,198	9,998	39,196
Different Crowd Direction	7,385	2,429	9,814
Moving Non-Human Object	2,357	919	3,276
Total	**193,149**	**62,487**	**255,636**

3.3. YOLOv12 architecture overview

The architectural foundation of our study is the YOLOv12 family, which represents the latest evolution in real-time, single-stage object detection. The architecture is masterfully designed with three integral components that work in concert: the Backbone, Neck, and Head. The data processing pipeline begins with the Backbone, a deep and efficient convolutional neural network based on the principles of CSPNet (Cross Stage Partial Network). Its primary function is to act as a powerful feature extractor, processing the input image and generating a hierarchy of feature maps at multiple scales. The deeper layers of the backbone capture high-level semantic information (the «what»), while the shallower layers preserve fine-grained spatial details (the «where»). These multi-scale features are then passed to the Neck, a sophisticated feature fusion module.

In YOLOv12, this is typically a Path Aggregation Network (PANet) structure, which enhances the feature hierarchy by creating both a top-down and a bottom-up path. This allows for the effective combination of semantic and spatial information across all scales, producing a final set of feature pyramids that are exceptionally robust to variations in object size and occlusion, a critical capability for dense crowd scenes. Finally, these enriched feature maps are fed into the detection Head. The head is responsible for the final stage of prediction, concurrently performing class prediction (classifying the object) and bounding box regression (localizing the object) for each potential detection.

A significant advantage of the YOLOv12 architecture is its inherent scalability. It is released as a family of models (e.g., Nano, Small, Medium, Large) where each variant is created by uniformly scaling the depth and width of the network. This provides a spectrum of models that allows for a direct and systematic exploration of the trade-off between computational complexity, which dictates inference speed, and model capacity, which influences detection accuracy.

This scalability is essential for identifying the optimal model for a given deployment scenario, whether it requires maximum accuracy on a powerful server or real-time speed on a resource-constrained edge device.

Figure 3 illustrates the YOLOv12 architecture, consisting of three components: Backbone, Neck, and Head. The Backbone employs convolutional, C3K2, and A2C2f modules for feature extraction, while the Neck fuses multi-scale features through concatenation and up-sampling. The Head performs detection at multiple scales to ensure robust predictions. The design is inherently scalable, with Nano to X-Large variants created by uniformly scaling depth and width to balance accuracy and efficiency across deployment scenarios.

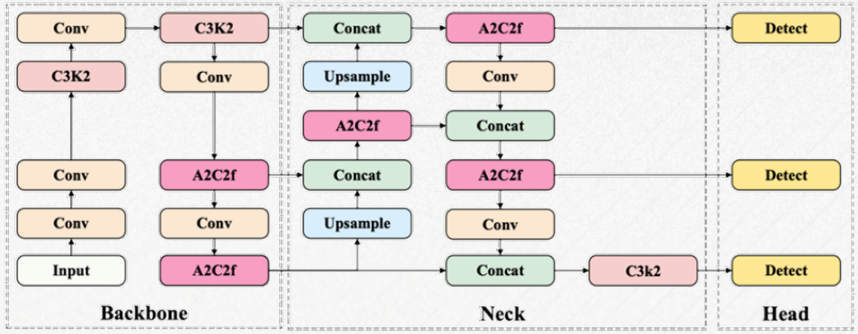


Figure 3. Overall architecture of the YOLOv12 network (Ge, Ning, & Xie, 2025).

3.4. Transfer learning and data augmentation

To achieve state-of-the-art performance and ensure the development of a highly robust and generalizable detection model, our training methodology was strategically built upon the synergistic combination of transfer learning and a comprehensive data augmentation pipeline. These two techniques are fundamental for overcoming the challenges of training deep neural networks on the specialized, limited-size datasets like HAJJv2.

3.4.1. Transfer learning

Instead of training the YOLOv12 models from a state of random weight initialization, which would necessitate a significantly larger dataset and prolonged training time to learn foundational visual concepts, we employed a transfer learning approach. Each model in our experimental lineup was initialized with weights pre-trained on the large-scale, general-purpose COCO (Common Objects in Context) dataset. This strategy allows the network to inherit a powerful and well-generalized «visual vocabulary» of low-level and mid-level features, such as edges, textures, shapes, and rudimentary object parts. This pre-existing knowledge provides an exceptional starting point, enabling the model to pivot its learning process towards the specific, high-level features relevant to abnormal behaviors in the HAJJv2 dataset. This approach not only dramatically accelerates training convergence but has been empirically shown to lead to superior final model performance by preventing the network from getting stuck in poor local minima during optimization.

3.4.2. Data augmentation

Complementing transfer learning, we utilized an extensive suite of online data augmentation techniques to artificially expand the diversity and variability of the training

data. The primary objective of data augmentation is to expose the model to a wide spectrum of visual conditions it might encounter in a real-world deployment, thereby enhancing its robustness and mitigating the risk of overfitting. Our augmentation pipeline was carefully configured with a variety of methods, as detailed in our training hyperparameters. To systematically strengthen generalization, our augmentation strategy was divided into two complementary categories: geometric transformations to address spatial variability and photometric adjustments to account for illumination changes.

Geometric augmentations were applied to ensure the model›s invariance to changes in object scale, position, and orientation. These included random horizontal flipping (fliplr probability of 0.5), translation by a factor of ±0.1, and scaling by a factor of ±0.5. These transformations simulate variations in camera perspective and subject distance. Photometric augmentations were employed to make the model resilient to different and often challenging lighting conditions. We applied random adjustments to the image›s Hue, Saturation, and Value (HSV) channels with factors of 0.015, 0.7, and 0.4, respectively. This simulates the visual effects of different times of day, shadows, and camera sensor variations. Furthermore, we leveraged advanced composite augmentation techniques. Mosaic augmentation, a powerful method in the YOLO training regimen, was enabled for the majority of the training process. This technique stitches four different training images into a single composite canvas, forcing the model to learn to detect objects in a variety of new contexts, at different scales, and even when partially occluded. This is particularly effective for improving the detection of smaller-scale objects within the dense crowd scenes of the HAJJv2 dataset. To allow the model to fine-tune on non-augmented, realistic images, the Mosaic augmentation was automatically disabled for the final 10 epochs of training. This combination of powerful pre-trained weights and a rich, dynamically augmented data stream was instrumental in training models that can identify the target abnormal behaviors with high accuracy and reliability.

3.5. Implementation details and training hyperparameters

All experiments were conducted on a high-performance laptop workstation, providing the necessary computational power for training multiple large-scale object detection models. The system was equipped with a 14th generation Intel Core i9 processor, 64 GB of RAM, and a high-end NVIDIA RTX 5090 Laptop GPU. The software environment was built on the PyTorch deep learning framework (version 2.8), with GPU acceleration provided by the CUDA 13 toolkit. This robust hardware and software stack ensured efficient and stable training sessions for our comprehensive comparative analysis. To maintain consistency and ensure a fair, reproducible comparison across all evaluated model architectures, a standardized set of training hyperparameters was utilized. The models were trained for a total of 300 epochs, with an early stopping mechanism configured with a patience of 100 epochs to prevent overfitting and terminate training if no improvement in validation performance was observed. A batch size of 16 was used, and all input images were uniformly resized to a resolution of 640x640 pixels. The optimizer was set to ‹auto›, allowing the YOLO framework to select the most suitable optimizer, which is typically a variant of AdamW. The training process was initiated with a learning rate of 0.01 and included a warm-up phase for the first 3.0 epochs to stabilize gradients. Advanced training features such as Automatic Mixed Precision (AMP) were enabled to accelerate computation. Furthermore, the powerful Mosaic data augmentation was active for the majority of the training, and was deactivated for the final 10 epochs, allowing the model to fine-tune on standard, un-augmented images.

3.6. Performance metrics

The performance of each model was quantitatively evaluated using standard metrics for object detection. Precision measures the accuracy of the positive predictions, while Recall measures the model›s ability to find all relevant instances. The F1-Score provides a balanced measure as the harmonic mean of Precision and Recall. The primary evaluation metric for this study is the mean Average Precision (mAP), which is the standard for ranking object detection models. We report mAP calculated at an Intersection over Union (IoU) threshold of 0.5 (mAP@0.5), which rewards good localization, and the official COCO metric, mAP@.5:.95, which averages mAP across multiple IoU thresholds from 0.5 to 0.95. Inference speed was measured in Frames Per Second (FPS) on the specified hardware.

4. Results and Discussion

The performance results of all evaluated models on the HAJJv2 test set are summarized in Table 2, which compares YOLOv10, YOLOv11, and YOLOv12 variants against prior YOLO generations (YOLOv4–YOLOv9) as reported by (Alsabei, Alsubait, & Alhakami, 2025). For fair comparison, YOLOv10, YOLOv11, and YOLOv12 were tested under the same conditions, using identical hyperparameters on the test dataset, and the results are presented in Table 2. A clear upward trajectory in performance is observed from earlier YOLO versions to the most recent YOLOv12 series. YOLOv4–YOLOv7 demonstrated limited detection accuracy, with YOLOv4 achieving only mAP50 of 0.786, while YOLOv7 improved to 0.899.

YOLOv8 marked a notable improvement with mAP50 of 0.912, and YOLOv9 further advanced performance to 0.964, establishing a strong benchmark prior to

YOLOv10–12. These results highlight the architectural gains achieved across successive YOLO generations. Within the latest generation, the YOLOv12 models consistently surpassed earlier versions. YOLOv12-Medium achieved the best mAP50 (0.981), while YOLOv11-Large maintained the strongest mAP50–95 (0.915) among all evaluated models, reflecting superior robustness across stricter IoU thresholds. Meanwhile, YOLOv12-Large demonstrated state-of-the-art recall (0.993) and precision (0.982) with a competitive mAP50 of 0.966 and mAP50–95 of 0.904, empirically validating the architectural refinements introduced in YOLOv12.

As expected, efficiency–accuracy trade-offs were observed. YOLOv12-Nano, with only 2.56M parameters, achieved mAP50 of 0.924 while running at 0.9 ms per inference, making it highly suitable for edge or real-time deployments. In contrast, YOLOv12-Large, while offering higher recall and precision, required 8.2 ms per inference, illustrating the computational overhead of deeper architectures. In summary, the YOLOv12 family clearly outperforms earlier YOLO generations (YOLOv4–YOLOv9) reported by Alsabei, Alsubait, and Alhakami (2025). Among them, YOLOv12-Medium provides the best balance between accuracy and efficiency, YOLOv12-Large delivers maximum detection performance in resource-rich environments, and YOLOv12-Nano is optimal for real-time deployment. These findings establish YOLOv12 as the most effective framework for abnormal crowd behavior detection in the HAJJv2 dataset.

Table 2. Comparative performance of YOLOv10, YOLOv11, and YOLOv12 variants against prior YOLO versions: YOLOv4–YOLOv9 (Alsabei, Alsubait, & Alhakami, 2025) on the HAJJv2 dataset

Models/Metrics	Precision	Recall	mAP50	mAP50-95	Params (M)	Inference (ms)
YOLOv12-Large	0.982	0.993	0.966	0.904	26.34	8.2
YOLOv12-Medium	0.980	0.954	0.981	0.909	20.11	5.2
YOLOv12-Small	0.969	0.930	0.968	0.854	9.24	2.5
YOLOv12-Nano	0.931	0.849	0.924	0.747	2.56	0.9
YOLOv11-Large	0.986	0.944	0.974	0.915	25.28	5.2
YOLOv10-Large	0.974	0.973	0.980	0.916	24.31	6.4
YOLOv9	0.939	0.948	0.964	**Alsabei, Alsubait, and Alhakami (2025)**		
YOLOv8	0.899	0.868	0.912	**Alsabei, Alsubait, and Alhakami (2025)**		
YOLOv7	0.853	0.863	0.899	**Alsabei, Alsubait, and Alhakami (2025)**		
YOLOv5	0.784	0.756	0.807	**Alsabei, Alsubait, and Alhakami (2025)**		
YOLOv4	0.536	0.875	0.786	**Alsabei, Alsubait, and Alhakami (2025)**		

Building on these comparative results, Figure 4 illustrates the training dynamics of YOLOv12-Medium for abnormal behavior detection in Hajj, providing deeper insights into its convergence behavior and detection performance. The model converged rapidly, with training and validation box losses dropping below 0.3, classification loss decreasing from ~1.7 to 0.25, and distribution focal loss (DFL) steadily declining, all without signs of overfitting. Evaluation metrics confirm strong detection performance. Precision stabilized above 0.95, indicating very few false positives, while recall reached ~0.92, showing most abnormal events were captured.

The mAP@0.5 metric approached ~1.0 after 150 epochs, and the stricter mAP@0.5–0.95 reached ~0.88–0.90, demonstrating excellent detection and competitive localization accuracy even under challenging conditions. These results highlight YOLOv12-Medium's suitability for real-time deployment in dense Hajj crowds.

High precision ensures minimal false alarms, while strong recall confirms effective detection coverage. The slight gap between precision and recall suggests room for improving sensitivity through further data augmentation or ensembling. To the best of our knowledge, this is the first application of YOLOv12-Medium to Hajj abnormal behavior detection, and the findings demonstrate its promise as a robust and efficient solution for safety-critical crowd monitoring.

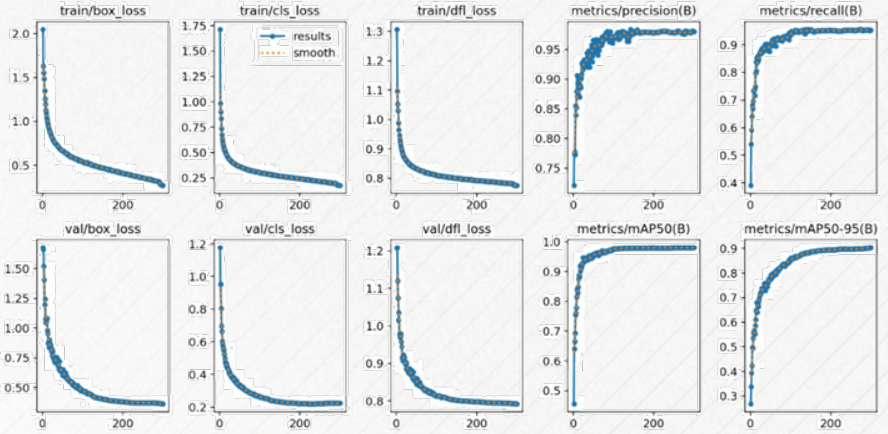


Figure 4. Training and validation loss curves alongside precision, recall, and mean Average Precision (mAP) metrics illustrating the performance trends of the YOLOv12-Medium model for abnormal behavior detection during Hajj

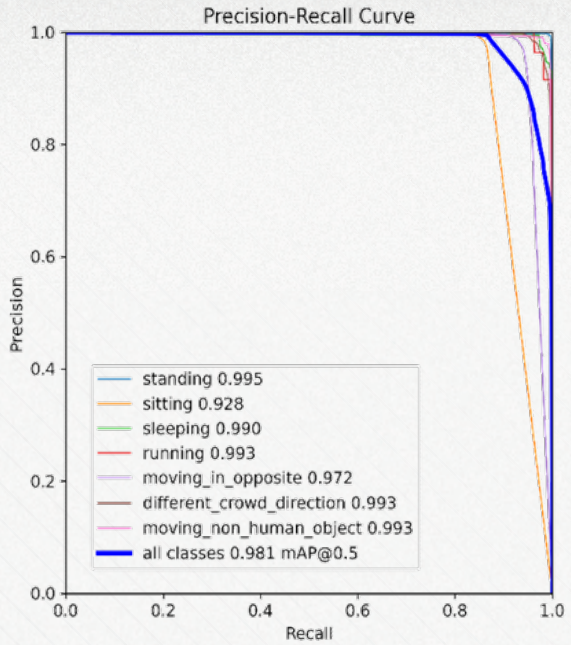


Figure 5. Precision-Recall (PR) curves of YOLOv12-Medium across different abnormal behavior classes in HAJJv2 dataset.

Following the convergence analysis in Figure 4, Figure 5 provides a class-wise Precision–Recall evaluation of YOLOv12-Medium, offering deeper insight into its detection reliability across different abnormal behaviors. The model achieved a strong overall performance with 0.981 mAP@0.5, reflecting high reliability across abnormal behavior classes. Most categories demonstrated near-perfect precision, including standing (0.995), running (0.993), different crowd direction (0.993), and moving non-human object (0.993). Sleeping (0.990) and moving in opposite direction (0.972) also performed well, confirming robustness across both static and dynamic behaviors. The lowest precision was observed for sitting (0.928), suggesting challenges in distinguishing it from visually similar states such as standing or sleeping. Nonetheless, recall remained competitive, ensuring that most true instances were still captured. Overall, YOLOv12-Medium delivers highly accurate detection across diverse behaviors, excelling particularly in dynamic and safety-critical classes, while minor limitations in static, low-motion categories may be addressed with additional data or complementary modeling approaches. Figure 6 presents the confusion matrix of YOLOv12-Medium on the HAJJv2 dataset. The model achieved near-perfect classification for most behaviors, with accuracy values of 1.00 for 'standing', 0.98 for 'sleeping' and 'running', 0.96 for different crowd direction, and 0.99 for 'moving non-human object'. These results demonstrate the model's strong ability to distinguish dynamic and safety-critical behaviors with minimal misclassification. The primary weakness appeared in the 'sitting' class, which achieved 0.86 accuracy and showed frequent confusion with the 'background' category (0.56).

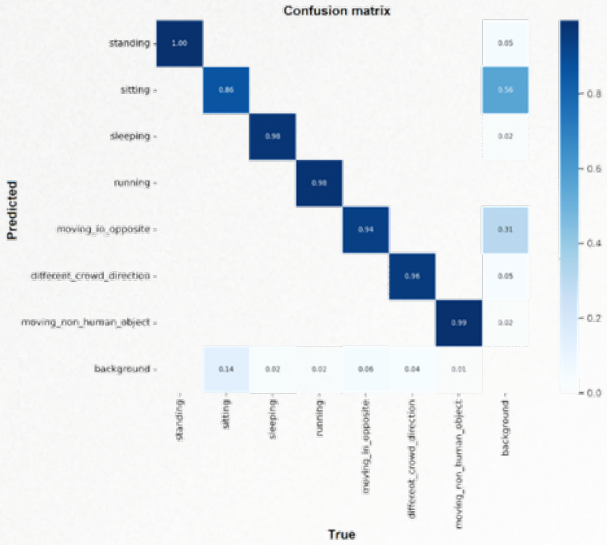


Figure 6. Confusion matrix of YOLOv12-Medium on the HAJJv2 dataset, illustrating class-wise predication accuracy for abnormal behaviors.

This suggests that low-motion behaviors such as sitting are more difficult to separate from background noise or visually similar states (e.g., standing still). Moving in 'opposite direction' also showed slightly lower accuracy (0.94) with some misclassifications as background (0.31), likely due to occlusions or crowded movement patterns. Overall, the confusion matrix confirms that YOLOv12-Medium performs robustly across both static and dynamic behaviors, excelling particularly in high-risk abnormal activities (running, opposite movement, non-human object movement). The few remaining misclassifications are concentrated in subtle, low-motion categories, highlighting an avenue for future improvement through enhanced data augmentation or the integration of temporal modeling (e.g., trajectory analysis). Figure 7 displays sample frames from the HAJJv2 dataset, illustrating how the proposed model detects and classifies diverse actions within dense crowd scenes. Each frame is annotated with

bounding boxes highlighting behaviors such as sitting, standing, running, sleeping, moving in opposite directions, and changes in crowd movement patterns. These examples emphasize the model's ability to accurately recognize and differentiate between multiple behaviors in highly congested environments. Such capability is crucial for strengthening crowd monitoring and enhancing safety protocols during large-scale gatherings, particularly in the context of the Hajj pilgrimage.



Figure 7. Example detection outputs of YOLOv12-Medium on the HAJJv2 dataset, showing real-time identification of abnormal crowd behaviors

5. Conclusion: In this paper, we conducted a rigorous and comprehensive comparative study of the state-of-the-art YOLOvX family of object detection models for the critical task of abnormal behavior detection in massive crowds, using the specialized HAJJv2 dataset. By implementing a robust data preparation pipeline that ensures an unbiased distribution of diverse scenes across the training and testing sets, we provided a definitive benchmark of model performance. Our results quantitatively map the trade-off between detection accuracy and inference speed, demonstrating that the YOLOv12-Medium model achieves the highest accuracy with an mAP@.5 of 98.1%, while it provides an excellent solution for real-time deployment. This research validates the capability of modern YOLOv12 architectures to serve as the core technology in automated surveillance systems, offering a practical and effective tool to significantly enhance the safety and security of millions of pilgrims during the Hajj and other large-scale events.

6. Recommendations: Based on the comparative analysis, several practical recommendations emerge for deploying YOLOv12 in real-world Hajj surveillance systems. First, YOLOv12-Medium can be prioritized as the default deployment model due to its optimal balance between accuracy and inference speed, ensuring reliable detection in dense and dynamic crowd settings. Second, YOLOv12-Nano is recommended for edge and resource-constrained deployments, such as mobile cameras or IoT-based crowd monitoring units, where low latency is critical. Third, YOLOv12-Large should be reserved for centralized, resource-rich environments (e.g., control centers) where maximizing precision and recall is paramount for high-risk event monitoring. To further enhance sensitivity, particularly for low-motion categories such as sitting, targeted data augmentation and the integration of temporal modeling (e.g., trajectory-based or sequence-aware approaches) are recommended. Finally, future work should explore ensemble frameworks combining YOLOv12 and future variants and cross-modal fusion (e.g., integrating visual detection with sensor data) to build more resilient and adaptive surveillance systems capable of addressing the evolving safety challenges of large-scale gatherings.

References

- Al-Salhie, L., Al-Zuhair, M., & Al-Wabil, A. (2014). Multimedia surveillance in event detection: crowd analytics in Hajj. In International Conference of Design, User Experience, and Usability, (pp. 383-392): Springer.

- Al-Shaery, A. M., Ahmed, S. G., Aljassmi, H., Al-Hawsawi, A. N., Maksoud, N., Tridane, A., & Farooqi, N. S. (2024). Open dataset for predicting pilgrim activities for crowd management during Hajj using wearable sensors. IEEE Access, 12, 72828-72846.

- Alafif, T., Hadi, A., Allahyani, M., Alzahrani, B., Alhothali, A., Alotaibi, R., & Barnawi, A. (2022). Hybrid classifiers for spatio-temporal real-time abnormal behaviors detection, tracking, and recognition in massive hajj crowds. arXiv preprint arXiv:2207.11931.

- Albattah, W., Khel, M. H. K., Habib, S., Islam, M., Khan, S., & Abdul Kadir, K. (2020). Hajj crowd management using CNN-based approach.

- Alqaysi, H. H., & Sasi, S. (2013). Detection of abnormal behavior in dynamic crowded gatherings. In 2013 IEEE Applied Imagery Pattern Recognition Workshop (AIPR), (pp. 1-6): IEEE.

- Alsabei, A. A., Alsubait, T. M., & Alhakami, H. H. (2025). Enhancing crowd safety at hajj: Real-time detection of abnormal behavior using YOLOv9. IEEE Access.

- Alzahrani, R., & Algethami, N. (2025). Leveraging Machine Learning for Optimal Pilgrim Crowd Management. Electronics, 14(13), 2507.

- Anand, K., & Dwivedi, S. S. (2025). Improving Traffic Sign Recognition with the YOLOv9 Algorithm. In 2025 2nd International Conference on Computational Intelligence, Communication Technology and Networking (CICTN), (pp. 850-854): IEEE.

- Ardizzone, E., Bruno, A., & Mazzola, G. (2013). Scale detection via keypoint density maps in regular or near-regular textures. Pattern Recognition Letters, 34(16), 2071-2078.

- Bera, A., Kim, S., & Manocha, D. (2016). Realtime anomaly detection using trajectory-level crowd behavior learning. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition workshops, (pp. 50-57).

- Bhuiyan, M. R. (2022). Video analytics using deep learning for hajj pilgrimage crowd monitoring. Multimedia University.

- Dogbe, C. (2012). On the modelling of crowd dynamics by generalized kinetic models. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 387(2), 512-532.

- Felemban, E. A., Rehman, F. U., Biabani, S. A. A., Ahmad, A., Naseer, A., Majid, A. R. M. A., Hussain, O. K., Qamar, A. M., Falemban, R., & Zanjir, F. (2020). Digital revolution for Hajj crowd management: A technology survey. IEEE Access, 8, 208583-208609.

- Fradi, H., Luvison, B., & Pham, Q. C. (2016). Crowd behavior analysis using local mid-level visual descriptors. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 27(3), 589-602.

- Gazzawe, F., & Albahar, M. (2024). Reducing traffic congestion in makkah during Hajj through the use of AI technology. Heliyon, 10(1).

- Ge, T., Ning, B., & Xie, Y. (2025). YOLO-AFR: An Improved YOLOv12-Based Model for Accurate and Real-Time Dangerous Driving Behavior Detection. Applied Sciences, 15(11), 6090.

- Halboob, W., Altaheri, H., Derhab, A., & Almuhtadi, J. (2024). Crowd management intelligence framework: Umrah use case. IEEE Access, 12, 6752-6767.

- Jabbari, A. (2023). Tracking and Analysis of Pilgrims› Movement Throughout Umrah and Hajj Applying Artificial Intelligence and Machine Learning. In 2023 7th International Conference On Computing, Communication, Control And Automation (ICCUBEA), (pp. 1-6): IEEE.

- Khan, A., Ali Shah, J., Kadir, K., Albattah, W., & Khan, F. (2020). Crowd monitoring and localization using deep convolutional neural network: A review. Applied Sciences, 10(14), 4781.

- Liu, X., & Han, Z. (2025). Improved Yolov8 Algorithm for Cow Recognition Based on Soft NMS. Journal of Theory and Practice of Management Science, 5(6), 23-28.

- Nasir, R., Jalil, Z., Nasir, M., Alsubait, T., Ashraf, M., & Saleem, S. (2025). An enhanced framework for real-time dense crowd abnormal behavior detection using YOLOv8. Artificial Intelligence Review, 58(7), 202.

- Peng, R., Cui, C., & Wu, Y. (2025). Real-time fire detection algorithm on low-power endpoint device. Journal of Real-Time Image Processing, 22(1), 29.

- Pennisi, A., Bloisi, D. D., & Iocchi, L. (2016). Online real-time crowd behavior detection in video sequences. Computer Vision and Image Understanding, 144, 166-176.

- Rodriguez, M., Laptev, I., Sivic, J., & Audibert, J.-Y. (2011). Density-aware person detection and tracking in crowds. In 2011 International Conference on Computer Vision, (pp. 2423-2430): IEEE.

- Salih, Y., & Simsim, M. (2014). Visual surveillance for hajj and umrah: a review. IAES International Journal of Artificial Intelligence (IJ-AI, vol. 3, no. 2, pp. 90–104.

- Saqib, M., Khan, S. D., & Blumenstein, M. (2016). Texture-based feature mining for crowd density estimation: A study. In 2016 International Conference on Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ), (pp. 1-6): IEEE.

- Shah, A. A. (2025). A Machine Learning Model for Crowd Density Classification in Hajj Video Frames. arXiv preprint arXiv:2501.04911.

- Solmaz, B., Moore, B. E., & Shah, M. (2012). Identifying behaviors in crowd scenes using stability analysis for dynamical systems. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 34(10), 2064-2070.

- Tripathi, G., Singh, K., & Vishwakarma, D. K. (2019). Convolutional neural networks for crowd behaviour analysis: a survey. The Visual Computer, 35(5), 753-776.

- Wang, A., Chen, H., Liu, L., Chen, K., Lin, Z., & Han, J. (2024). Yolov10: Real-time end-to-end object detection. Advances in Neural Information Processing Systems, 37, 107984-108011.

- Wang, C., Zhao, X., Wu, Z., & Liu, Y. (2013). Motion pattern analysis in crowded scenes based on hybrid generative-discriminative feature maps. In 2013 IEEE International Conference on Image Processing, (pp. 2837-2841): IEEE.

- Wu, S., Moore, B. E., & Shah, M. (2010). Chaotic invariants of lagrangian particle trajectories for anomaly detection in crowded scenes. In 2010 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition, (pp. 2054-2060): IEEE.

- Wu, S., Yang, H., Zheng, S., Su, H., Fan, Y., & Yang, M.-H. (2017). Crowd behavior analysis via curl and divergence of motion trajectories. International Journal of Computer Vision, 123(3), 499-519.

- Zou, Y., Zhao, X., & Liu, Y. (2015). Detect coherent motions in crowd scenes based on tracklets association. In 2015 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), (pp. 4456-4460): IEEE.

إطار متكامل للذكاء الاصطناعي متعدد النماذج لإدارة الحشود في المشاعر المقدسة

مشاعل الغامدي*، نوف الرويس، هديل الجامع، أنفال العواجي، ندى المقرن، عبدالعزيز العبيد
معهد تقنيات الذكاء الاصطناعي والروبوت، مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم

Multi-Model AI Framework for Comprehensive Crowd Management at Religious Pilgrimage Sites

Masheal Alghamdi*, Nouf Alrowais, Hadeel Aljami, Anfal Alawaji, Nada Almugren and Abdulaziz Alobaid - Artificial Intelligence & Robotics Institute, King Abdulaziz City for Science and Technology
*Corresponding author: E-mail (malghamdi@kacst.gov.sa)

الملخص

يتوافد ما يزيد على مليوني حاج ومعتمر إلى المسجد الحرام والمشاعر المقدسة في مكة المكرمة والمسجد النبوي في المدينة المنورة خلال موسم الحج وموسم العمرة في رمضان، مما يُسبب كثافة حشود غير مسبوقة قد تُشكل مخاطر أمنية، إذ تتطلب هذه التجمعات الضخمة تحليلات آنية متطورة لضمان سلاسة التنقل وتفادي مخاطر الإزدحام من خلال حلول تقنية متقدمة لإدارة الحشود. وقد أصبحت مثل هذه الحلول التي تستخدم المراقبة المدعومة بالذكاء الاصطناعي، ضرورية لضمان سلامة الحجاج والمعتمرين حيث لا تكفي حلول المراقبة التقليدية وحدها اليوم في إدارة الحشود.

يقدّ م هذا البحث إطارً ا شاملاً يدمج تقنيات الذكاء الاصطناعي لإدارة الحشود أثناء الحج والعمرة. ويتألف هذا الإطار من ثلاثة عناصر رئيسية: (1) نماذج الرؤية الحاسوبية لمراقبة الأنشطة على الأرض، و(2) تحليل صور الأقمار الصناعية لتتبع حركة الحشود على نطاق واسع يشمل إحصاء المركبات وقياس كثافة الازدحام، إلى جانب (3) ذكاء اصطناعي قادر على التفسير لتعزيز الشفافية والحدّ من التحيز. وتم التحقق النوعي من دقة النظام من خلال التقييم الخبري والحقائق المرجعية. يمكّن هذا الدمج من مراقبة فورية ودقيقة للحشود ودراسة سلوك الأفراد والمجموعات، مما يساهم بشكل فعّال في تعزيز سلامة الحجاج والمعتمرين وتحسين تجربتهم

وقد بلغت الدقة الإجمالية لتحليل الأنشطة الميدانية باستخدام النموذج المقدم نسبة 89% وكانت نتائج الأداء للأنشطة كالتالي: الحواجز المنظمة لحركة الحشود (97%)، وحركة الكراسي المتحركة (93%)، والجلوس في أماكن غير مناسبة (77%)، والأمتعة المهجورة (72%). وفي مجال تحليل الصور الفضائية وصل إحصاء المركبات إلى دقة كشف 0.8 للمركبات الكبيرة، 0.69 للصغيرة حسب مقياس mAP@0.5.

تُؤكِّد هذه الدراسة على الدور المحوري للبيانات لتطوير حلول متقدمة لإدارة الحشود لذلك نؤكد على الحاجة إلى إنشاء منصة وطنية شاملة مركزية للحج والعمرة، تجمع بين مختلف المصادر (الصور، مقاطع الفيديو، أنماط التنقل، البيانات السكانية والبيئية واللوجستية) ستمكن هذه البنية التحتية من بناء نماذج ذكاء اصطناعي أكثر تطوراً ودقة لضمان السلامة، وتحسين تجربة الحجاج، وذلك من خلال شراكة استراتيجية بين القطاع الأكاديمي والحكومي

Abstract

The Hajj and Ramadan Umrah seasons bring over two million pilgrims to the holy sites in Makkah and Madinah, creating unprecedented crowd levels and potential security hazards. Managing these vast gatherings demands advanced, real-time analysis to ensure safe and smooth pilgrim movement. As a result, AI-powered crowd management solutions have become a necessity to ensure the safety of the pilgrims, as traditional methods are insufficient by themselves.

The study employs a multi-model AI methodology for crowd management during Hajj and Umrah; combining three modules: (1) computer vision models for ground-level monitoring, (2) explainable AI for transparency and bias reduction, and (3) satellite imagery analysis for large-scale crowd and vehicle monitoring. Qualitative validation through expert assessment and ground-truth observations ensures system accuracy. Together, these modules provide multi-level situational awareness, enabling real-time detection, interpretable decision-making, and macroscopic analysis. The framework enhances safety and resource allocation while supporting ethical and accountable use of AI in sensitive religious contexts.

The proposed model achieved an overall accuracy of 89% in field activity analysis. Performance for specific activities was as follows: identifying vulnerable barriers (97%), detecting wheelchair movement (93%), spotting people sitting in inappropriate

areas (77%), and recognizing abandoned luggage (72%). In satellite image analysis, the model›s vehicle detection accuracy, measured by mAP@0.5, was 0.8 for large vehicles and 0.69 for small vehicles.

This research underscores the critical role of data in crowd management. We advocate for a centralized national database for Hajj and Umrah, aggregating multi-source imagery, video, mobility traces, demographics, environmental metrics, and logistics. This resource is essential for developing accurate AI models to enhance safety and improve the pilgrim experience, requiring collaboration between research and government bodies.

Keywords: Multi-modal AI Framework, Explainable AI (XAI), Computer Vision, Deep Learning

1. Introduction

Religious pilgrimages to Makkah are among the world's most challenging crowd management events. The annual Hajj attracts over 2 million pilgrims, while Umrah welcomed 16.9 million in 2024 with expectations of 30 million by 2030 (Almuzaini et al., 2022). Such gatherings create extreme densities of 7–8 people/m in Makkah's limited 400-hectare holy sites, causing frequent crowd-related incidents (Gaddoury and Armenian, 2024). Existing methods—CCTV, security guards, and group control—are slow and overstretched. For example, dangerous events may take 3–5 minutes to detect (Piza et al., 2019; Sreenu and Durai, 2019), and human operators quickly lose focus, unable to monitor millions simultaneously (Yezli et al., 2017). Heat waves reaching 50°C during Hajj 2024 further undermined traditional monitoring (Yezli et al., 2024).

These challenges highlight the need for advanced AI to monitor crowds at three levels: microscopic (individual risks like unattended bags), mesoscopic (group density and flow patterns), and macroscopic (satellite-based large-area monitoring). AI can exceed 90% accuracy in detecting risky behaviors, outperforming humans who suffer from fatigue (Chen et al., 2025; Bhuiyan et al., 2022a,b). Integrating computer vision, explainable AI, and satellite analysis offers a unified solution that ensures real-time awareness, transparency, and public trust in sensitive religious contexts (Alotaibi et al., 2025).

To address these needs, our framework integrates three modules for multi-scale analysis: (1) a Computer Vision Module using deep learning to detect ground-level risks such as barrier breaches and wheelchair movement (Khan et al., 2017); (2) an Explainable AI Module with techniques like EigenCAM and LIME to ensure interpretability and fairness (Arrieta et al., 2020; Yao et al., 2023); and (3) a Satellite Analysis Module that processes high-resolution imagery to capture large-scale crowd and vehicle patterns for strategic planning (Shah et al., 2024).

The objective is to show how combining these modules overcomes traditional limitations by integrating diverse perspectives into one framework. This multi-model approach improves early detection, predictive analysis, and actionable intelligence for both immediate response and long-term planning (Martella et al., 2017; Alasmari et al., 2024). Embedding explainable AI ensures decisions remain transparent, ethical, and socially responsible (Mehrabi et al., 2021; Ülkü, 2024).

2. Methodology (Materials and methods)

To address the multifaceted challenges of crowd monitoring at religious pilgrimage sites, this study employs a modular approach comprising three distinct AI models. Each model is designed to operate at a different analytical level— microscopic, mesoscopic, and macroscopic—delivering complementary insights into crowd behavior and safety. The following subsections detail the methodology, datasets, and implementation strategies used for each of the three components: a ground-level computer vision system, an explainable AI framework for interpretability and fairness, and a satellite imagery analysis model for large-scale observation. Figure 1 provides a visual overview of the proposed AI multi-modal framework and its components.

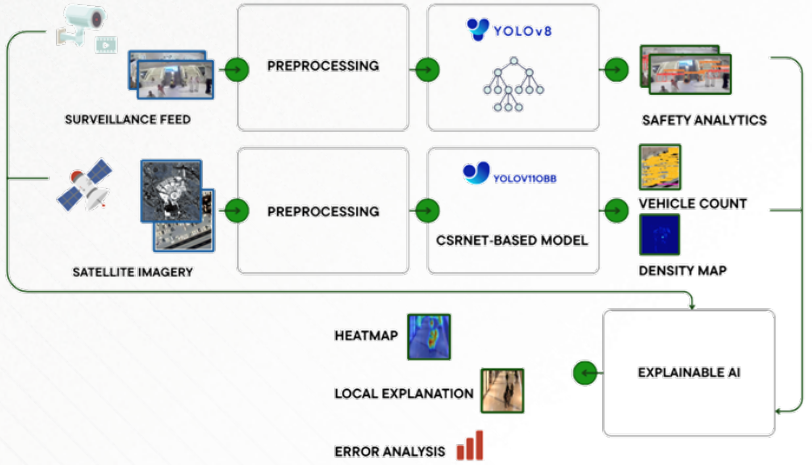


Figure 1. Overview of the proposed multi-model AI framework for crowd management at holy sites. The diagram depicts three integrated parts: ground-level vision for real-time risk monitoring, an explainability layer for transparent and fair decisions, and satellite analytics for large-area situational awareness. Together, these components provide multi-scale insights—from individuals to region-wide patterns—linking inputs to actionable alerts and planning tools. Details of each part are presented in subsequent

figures.

2.1 Ground-Level Computer Vision Model

This module applies YOLOv8 (Jocher et al., 2023) for real-time monitoring of four safety risks in Al-Haram: unattended bags, compromised barriers, improper sitting, and wheelchair movements. This microscopic-level analysis enables rapid intervention and improved safety.

2.1.1 Dataset Development

To build a reliable dataset, we combined multiple annotation strategies. A total of 40,000 surveillance images from Al-Haram formed the base. For rapid labeling, we applied automatic methods: Grounding DINO (Liu et al., 2024) through Autodistill provided zero-shot detections, while LandingAI transferred knowledge from existing models. To ensure accuracy, 1,000 images were manually refined as a high quality seed set. This seed model was then used for semi automatic annotation of the larger dataset. Finally, 10,000 images were carefully reviewed and corrected by human annotators, producing a high fidelity dataset across the four target categories.

2.1.2 Model Architecture and Training

YOLOv8 was selected as the detection framework due to its balance of accuracy and real-time speed. The network used a CSPDarknet backbone with cross-stage partial connections and an input resolution of 640×640 pixels , optimized for dense crowd scenes. Training followed a two-stage process. First, the model was initialized on a 1,000-image manually refined seed dataset, establishing baseline detection performance. Second, it was retrained on the complete 40,000-image dataset, with special weighting on the 10,000 manually verified samples to reinforce annotation accuracy. The training schedule used a learning-rate warmup, cosine decay, and data augmentation (random flips and scaling) to improve generalization. This architecture and training pipeline ensured the model could detect small but critical objects (bags, barriers, wheelchairs) under challenging conditions.

2.1.3 Decision Tree Analysis for Posture Classification

To handle improper sitting in restricted areas, we added a posture classification module. Each detected person was represented by the height–width ratio of their bounding box, a simple yet effective feature for distinguishing standing vs sitting. A binary decision tree classifier (depth 2) was trained on 614 labeled samples, enabling lightweight real time inference. To address frequent false positives (e.g., upper body detections misclassified as sitting), we included contextual information from surrounding pixels. This hybrid approach reduced errors and allowed the system to reliably flag sitting individuals in Tawaf and walking zones, complementing the YOLOv8 detections without requiring heavy pose estimation models.

2.1.4 Experiments

Experiments were conducted on NVIDIA A100 GPUs using a separate test set of 2,000 images. Performance was measured with Precision, Recall, F1 score, and AP@0.5, showing consistently high detection accuracy across all categories. Beyond standard evaluation, we implemented specialized workflows to address Al Haram's operational needs: (1) unattended bag detection — a bag was flagged if no person was detected within a proximity threshold, reducing false alarms for carried items; (2) restricted zone monitoring — operators could draw polygonal zones (e.g., Tawaf pathways), and the system triggered alerts if wheelchairs or sitting individuals appeared inside; (3) barrier integrity monitoring — continuous tracking of barrier positions against baseline coordinates, detecting shifts, collapses, or unauthorized movement. These workflows extended YOLOv8 beyond generic object detection, providing practical, safety oriented analytics for real-time crowd management.

2.2 Explainable AI Component

The Explainable AI (XAI) module was integrated to ensure transparency, fairness, and accountability in AI-assisted safety decisions within sacred environments. Systematic error analysis logged recurring false positives and negatives, categorized them by object and context, and guided refinements in training and augmentation strategies. To make predictions interpretable, EigenCAM generated gradient-based heatmaps showing the image regions most responsible for YOLOv8 detections, enabling supervisors to confirm whether alerts focused on meaningful evidence such as a bag or barrier. In parallel, LIME perturbed inputs to reveal which features most influenced classification decisions, helping to identify potential demographic or contextual biases, such as clothing or mobility aids. Together, these complementary approaches provided a multi-layered interpretability framework that improved debugging, reduced bias, and reinforced public trust, ensuring that AI-supported safety systems remain transparent, ethical, and socially responsible in the management of large religious gatherings.

2.2.1 Experiments

We evaluated the XAI framework on a dataset of 5,000+ annotated bounding boxes of individuals from varied public settings, enriched with demographic labels including gender, visibility, frame position, face orientation, and ethnicity (3,982 males, 1,075 females). This ensured diversity across visual and contextual features for fairness analysis. Two leading detectors were compared: YOLOv8 (Jocher et al., 2023), optimized for real-time accuracy with an enhanced CSPDarknet backbone, and Faster R-CNN (Girshick, 2015), a two-stage model with a ResNet backbone and Region Proposal Network for precise

localization. All experiments were run on an NVIDIA A100 GPU, applying a confidence threshold of 0.5 and NMS IoU of 0.5 to balance precision and recall while avoiding duplicate detections. These standardized settings provided a consistent baseline for assessing interpretability methods and enabled a fair comparison of model behavior during subsequent XAI analyses.

2.3 Satellite Imagery Analysis

enables authorities to capture wide regions in a single frame, assess crowd densities, and analyze traffic flow, which has proven valuable in transportation and event planning (Leitloff et al., 2010; Chen et al., 2014; Cao et al., 2016; Mansour et al., 2019; Zhao et al., 2023). For this study, we constructed a multiresolution dataset (0.3–1.7 m) from multiple satellites covering the Makkah and Madinah regions, as illustrated in Figure 2.

A dedicated preprocessing pipeline enhanced image quality prior to analysis: conversion of raw imagery into standardized RGB truecolor representations (Rocchini, 2007), contrast stretching for normalization (Hecker et al., 2019), denoising and sharpening with edgepreserving filters (Buades et al., 2005; Paris et al., 2009), and histogram equalization to optimize dynamic range (Park et al., 2008). Where additional detail was required, superresolution techniques were applied, using RealESRGAN in GPUenabled environments (Wang et al., 2021) and enhanced bicubic interpolation for resourcelimited cases (Siu and Hung, 2012).

These stages produced highfidelity imagery suitable for vehicle detection and crowd density estimation, extending situational awareness to the macroscopic level and supporting both realtime decisionmaking and longterm urban planning.

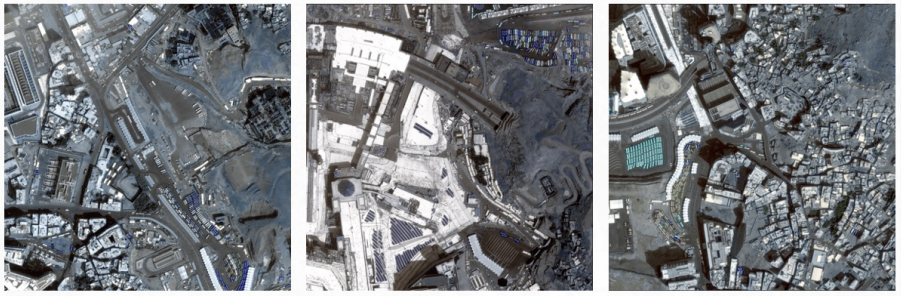


Figure 2: Samples of satellite images.

2.3.1 Fine-tuning YOLOv11 for Vehicle Detection in Crowd Management

To detect vehicles at scale, we finetuned the YOLOv11mOBB model (Jocher and Qiu, 2024) using a combined dataset of DOTAv1 (Ding et al., 2021) and 4,445 manually reviewed satellite images from Makkah and Madinah (tiled to 1024 × 1024 pixels)». Prelabels generated by the pretrained model were corrected in Label Studio, and the dataset was expanded through multiscale augmentation at 0.25×, 0.5×, 1.0×, and 1.5×, producing 145,527 training images and 40,807 validation images. Training on an NVIDIA A100 GPU employed a learning rate of 1e5, batch size of 4, and up to 100 epochs, with early stopping at epoch 40 to prevent overfitting.

Evaluation showed notable gains over the pretrained DOTA model: the finetuned system achieved mAP@0.5 scores of 0.804 (large vehicles) and 0.694 (small vehicles), with improved recall for small vehicles (0.637 vs. 0.441).

Detailed comparisons are presented in Table 1, while Figure 10 illustrates qualitative improvements, particularly in detecting small vehicles in dense parking regions. These results confirm that domainspecific finetuning significantly enhances detection accuracy in crowd management applications, where monitoring vehicle flow is critical for traffic safety and crowd control.

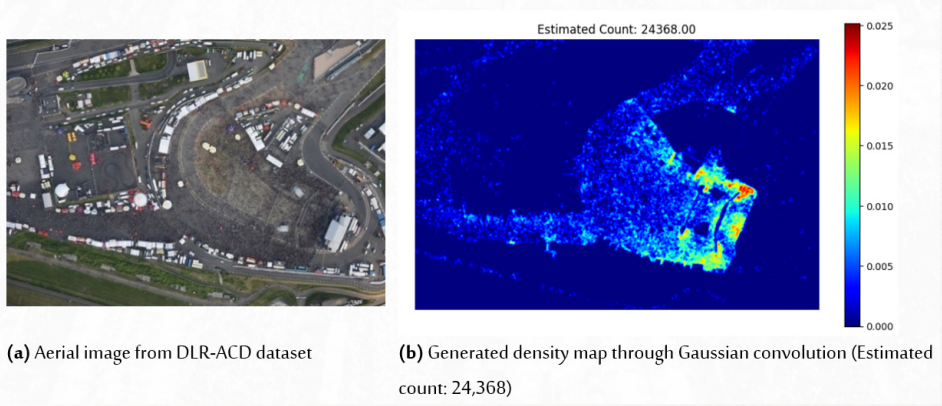
2.3. Density estimation:

For large-scale crowd monitoring, we developed a deep learning–based density estimation framework using high-resolution satellite imagery. The DLR Aerial Crowd Dataset (DLRACD) provides imagery with a ground sampling distance (GSD) ranging from 4.5 to 15 cm/pixel; source image dimensions are typically 5,100–5,700 pixels in width and 3,100–3,600 pixels in height (approximately 5,600 × 3,100 on average).

The system was trained on DLRACD's 33 aerial images with 226,291 manually annotated points, representing crowd counts from 285 to 24,368 per image (Bahmanyar et al., 2019). Annotations were transformed into continuous density surfaces via Gaussian convolution, modeling each individual as a Gaussian kernel; examples are shown in Figure 3. The framework employed CSRNet (Li et al., 2018), combining a VGG16 frontend with dilated convolutions for contextual density estimation.

To facilitate training, images were cropped into 512 × 512 patches with overlap, yielding a total of 7,860 training tiles. Training spanned 300 epochs with mean squared error loss and early stopping to avoid overfitting. To ensure operational reliability, we designed an interactive validation tool that allows operators to refine outputs by resetting or recalculating densities in problematic regions.

Additionally, a verification step based on classical Hough circle detection (Leavers, 1993) provided approximate head counts as an independent check. Together, these components enabled accurate, interpretable density maps that enhance situational awareness in AlHaram, supporting safety-critical monitoring during peak pilgrim periods.



(a) Aerial image from DLR-ACD dataset

(b) Generated density map through Gaussian convolution (Estimated count: 24,368)

Figure 3: Aerial crowd dataset and density map generation: (a) Training data from DLR-ACD dataset showing an aerial image; (b) Conversion result showing the continuous density map generated through Gaussian convolution.

3. Results and Discussion

This section presents the experimental outcomes and interpretive insights from the three AI models proposed in this study. As each model addresses a distinct dimension of crowd analysis—ground-level detection, interpretability of human-centered predictions, and large-scale satellite-based observation—the results are reported separately. For each component, we detail performance metrics, highlight key findings, and discuss implications, limitations, and areas for future improvement.

3.1 Computer Vision Model Results

The groundlevel YOLOv8 model achieved an average accuracy of 89%, with the highest detection rate for barriers (97%), followed by wheelchairs (93%), sitting persons (77%), and bags (72%). These results align with prior work on object detection in crowded settings (Jocher et al., 2023). A unified visualization of the deployment is provided in Figure 3, where diverse surveillance inputs are routed to a central YOLOv8 detector and then branched into task-specific analytics that operate in real time.

3.1.1 Decision Tree Analysis for Posture Classification

To improve posture recognition, a decision tree classifier analyzed boundingbox aspect ratios. The approach reached precision 0.88, recall 0.86, F1score 0.87, and accuracy 86.1%, confirming its effectiveness for distinguishing sitting vs. standing. In the unified pipeline (Figure 3), this appears as the "Post Processing for Posture Analysis" branch, which flags sitting persons from the detector's outputs.

3.1.2 Specialized Detection Applications

Two specialized applications were deployed: wheelchair zone monitoring and unattended bag detection, illustrated in Figure 4. The first output differentiates between attended and unattended bags, reducing false alarms and enhancing security. The second output ensures wheelchairs remain within authorized zones, preventing misuse in restricted areas. Together, these workflows extend YOLOv8 beyond generic detection toward operationally relevant analytics.

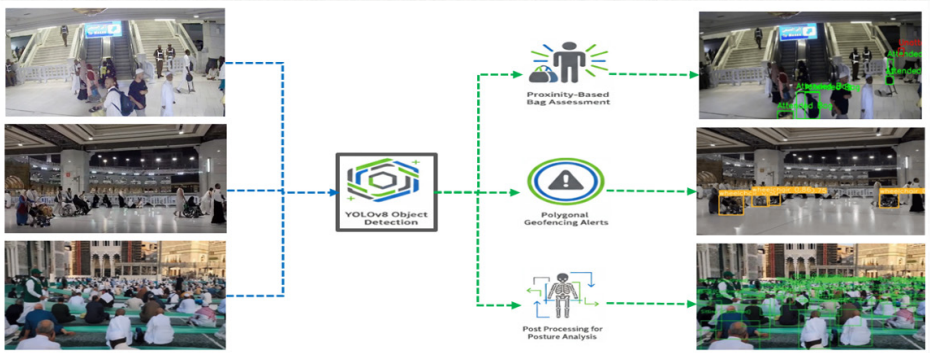


Figure 4: Unified YOLOv8-based safety analytics pipeline in Al-Haram surveillance, in which multiple camera streams feed a central detector whose outputs drive three post-processing branches: proximity-based bag assessment classifies attended versus unattended bags, polygonal geofencing generates wheelchair zone alerts, and post-processing for posture analysis uses a decision-tree classifier to identify sitting persons

3.2 Explainable AI Results

The XAI module revealed both strengths and biases. Grad CAM heatmaps showed that YOLOv8 emphasized body contours, while Faster R CNN focused on facial regions, affecting performance under occlusion (Figure 5). Both models performed well overall, but detection confidence dropped for females with partial visibility or side profiles, reinforcing earlier findings on bias in vision systems (Buolamwini and Gebru, 2018). The framework thus provided actionable insights for dataset balancing and fairness.

3.2.1 Demographic Bias Detection

Error analysis confirmed demographic disparities. For gender, YOLOv8 achieved a true positive rate of 99.78% for males vs. 94.26% for females (Figure 5). Ethnicity analysis (Figure 6) showed YOLOv8 performed consistently, though Faster R CNN exhibited variability. Additional tests revealed both models struggled with back facing individuals

and partial occlusions. Intersectional analysis (Figure 7) highlighted greater performance variation among female ethnic groups, underscoring the importance of fairness evaluations across multiple demographic dimensions.

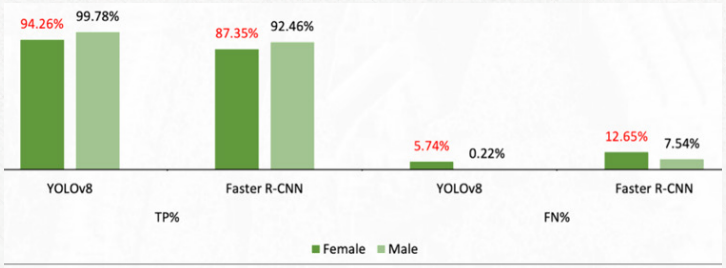


Figure 5: Error analysis based on gender.

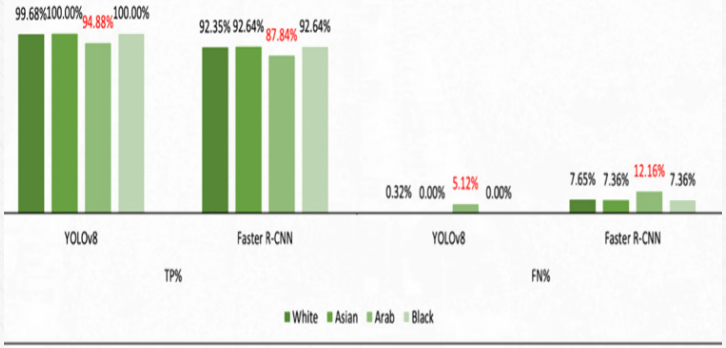


Figure 6: Error analysis based on ethnicity.

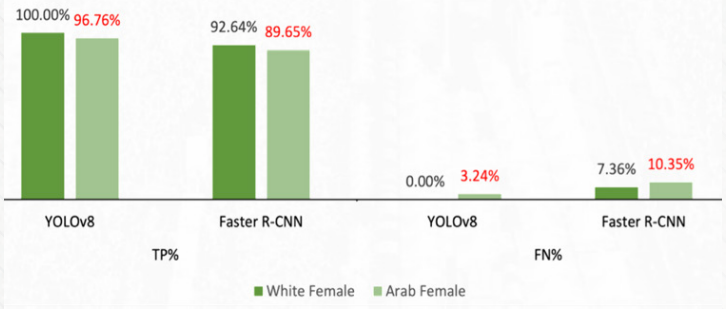


Figure 7: Comparing error analysis results among female subjects of different ethnicities.

3.2.2 Visual Explanations

We employed EigenCAM (Muhammad and Yeasin, 2020) and LIME (Ribeiro et al., 2016) to interpret YOLOv8 detections on surveillance imagery. For EigenCAM, the input surveillance-camera frame is processed by YOLOv8, and class/feature activations are visualized to yield a heatmap that highlights regions most influential to the detector's predictions, typically faces, upper bodies, and other salient cues when visible, with broader spatial emphasis under occlusion. For LIME, the same input is analyzed by perturbing superpixels and observing the effect on YOLOv8 outputs, producing an importance map that attributes detections to contextually relevant regions. Together, these complementary methods provide actionable transparency for trust, auditing, and debugging in safety-critical deployments.

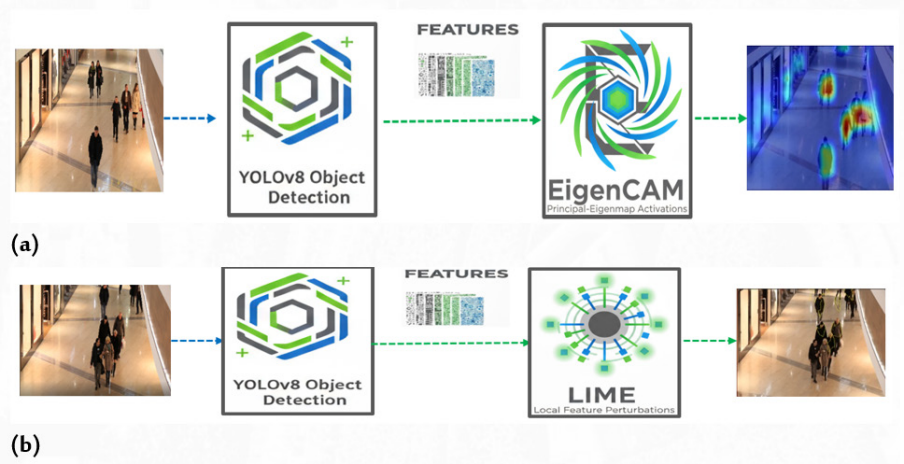


Figure 8: Explainability pipelines for YOLOv8 on surveillance images, where panel (a) shows a sequential workflow in which a surveillance-camera frame is processed by YOLOv8 and subsequently analyzed with EigenCAM to produce a heatmap highlighting regions most influential to the detector's predictions, and panel (b) presents an analogous workflow in which the same input is processed by YOLOv8 and then examined with LIME through superpixel perturbations to generate an importance map that attributes the detections to salient image regions.

3.3 Satellite Model Results

The satellite based framework effectively enhanced imagery, detected vehicles, and estimated densities at scale. Results varied by resolution and angle but consistently improved after preprocessing.

3.3.1 Pre-processing pipeline result

Over 1000 satellite Images have been enhanced and sample of enhancement outcomes are illustrated in Figure 9. Contrast stretching and histogram equalization improved feature visibility (Hecker et al., 2019; Park et al., 2008), nonlocal means denoising reduced sensor noise while retaining structure (Buades et al., 2005; Paris et al., 2009), and RealESRGAN superresolution (Wang et al., 2021) added fine detail as shown in the zoomed region. Collectively, these steps produced sharper images for vehicle and crowd analysis.



Figure 9: Satellite image enhancement result.

3.3.2 Fine-tuning YOLOv11 for Vehicle Detection in Crowd Management

The fine tuned YOLOv11m OBB (Jocher and Qiu, 2024) achieved mAP@0.5 of 0.804 for large vehicles and 0.694 for small vehicles, significantly outperforming the DOTA baseline (Ding et al., 2021). Recall for small vehicles improved from 0.441 to 0.637, confirming better sensitivity in congested areas. Detailed metrics are provided in Table 1, and visual comparisons in Figure 10 show clear improvements, particularly in dense parking regions. The best deployment model yielded mAP@0.5:0.95 of 0.608, balancing accuracy and efficiency.

Table 1: Performance comparison between pre-trained DOTA model and fine-tuned model on combined validation dataset

Model	Vehicle Class	Precision	Recall	mAP@0.5	mAP@0.5:0.95
Fine-tuned Model	Large Vehicle	0.888	0.695	0.804	0.660
Fine-tuned Model	Small Vehicle	0.738	0.637	0.694	0.542
DOTA Model	Large Vehicle	0.894	0.686	0.807	0.664
DOTA Model	Small Vehicle	0.762	0.441	0.572	0.452

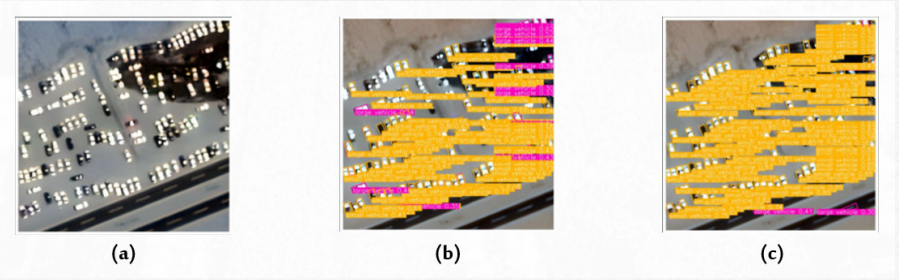


Figure 10: Comparative detection results on satellite imagery showing (a) original image, (b) default YOLOv11-OBB model predictions, and (c) fine-tuned model predictions with improved vehicle detection performance.

3.3.3 Crowd Density Estimation Results

The CSRNetbased model (Li et al., 2018) demonstrated reliable convergence, with validation loss decreasing by 96.9% over 300 epochs. Training aligned closely with validation curves, indicating strong generalization. As illustrated in Figure 11, the workflow uses the Arafah input image, processes it through CSRNet, passes the results through a validation tool, and produces the final outputs: an overlay of the density map on the Arafah image and the estimated total crowd count of 28,853.



Figure 11: Crowd density estimation workflow for Arafah using CSRNet. The diagram presents a sequential pipeline comprising the input Arafah satellite image, the CSRNet model (Li et al., 2018) as the core method, and a validation tool employed to assess performance and consistency, culminating in the output overlay of the predicted density map on the Arafah image with an estimated total count of 28,853 people.

4. Conclusions

The integration of AI frameworks provide a valuable impacts in crowd management for in general. By combining several domains of AI, namely computer vision, explainable AI, and satellite imagery analysis, the research represents a multiscale solution that effectively

monitors crowds from individual to mass scales. The power of the framework lies in its complementary components in two levels: ground-level monitoring with high detection accuracy and interpret decision making through XAI techniques that contribute in trust while reducing bias, and broad view in aerial analysis that provides crucial macroscopic insights.

5. Recommendations

Based on the research findings, we recommend that the computer vision modules should be expanded to address several scenarios for safety concerns. Integration with existing emergency response systems would enhance coordination during incidents, and privacy techniques should be implemented to balance surveillance capabilities with

pilgrim privacy. And establishing a cross-disciplinary research initiative would continuously improve the framework by incorporating advances in AI, crowd management practices.

References

- Alasmari, M., Alotaibi, B., Alshehri, A., and Alghamdi, F. (2024). A systematic review of deep learning-based crowd management techniques. Smart Cities, 7(1):56–78.

- Almuzaini, Y., Alburayh, M., Alahmari, A., Alamri, F., Sabbagh, A. Y., Alsalamah, M., and Khan, A. (2022). Mitigation strategies for heat-related illness during mass gatherings: Hajj experience. Frontiers in public health, 10:957576.

- Alotaibi, S. R., Mengash, H. A., Maray, M., Alotaibi, F. A., Alkharashi, A., Alzahrani, A. A., Alotaibi, M., and Alnfiai, M. M. (2025). Integrating explainable artificial intelligence with advanced deep learning model for crowd density estimation in real-world surveillance systems. IEEE Access.

- Arrieta, A. B. et al. (2020). Explainable artificial intelligence (xai): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible ai. Information Fusion, 58:82–115.

- Bahmanyar, R., Vig, E., and Reinartz, P. (2019). Mrcnet: Crowd counting and density map estimation in aerial and ground imagery. arXiv preprint arXiv:1909.12743.

- Bhuiyan, M. R., Abdullah, J., Hashim, N., and Al Farid, F. (2022a). Crowd monitoring of hajj pilgrimage using video analytics and deep learning. In 2022 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), pages 1–4. IEEE.

- Bhuiyan, M. R., Abdullah, J., Hashim, N., Al Farid, F., Haque, M. A., Uddin, J., Isa, W. N. M., Husen, M. N., and Abdullah, N. (2022b). A deep crowd density classification model for hajj pilgrimage using fully convolutional neural network. PeerJ Computer Science, 8:e895.

- Buades, A., Coll, B., and Morel, J.-M. (2005). A non-local algorithm for image denoising. In 2005 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition (CVPR'05), volume 2, pages 60–65. Ieee.

- Cao, L., Wang, C., and Li, J. (2016). Vehicle detection from highway satellite images via transfer learning. Information sciences, 366:177–187.

- Chen, X., Xiang, S., Liu, C.-L., and Pan, C.-H. (2014). Vehicle detection in satellite images by hybrid deep convolutional neural networks. IEEE Geoscience and remote sensing letters, 11(10):1797–1801.

- Chen, Z., Xie, X., Qiu, T., and Yao, L. (2025). Dense-stream yolov8n: a lightweight framework for real-time crowd monitoring in smart libraries. Scientific Reports, 15(1):11618.

- Ding, J., Xue, N., Xia, G.-S., Bai, X., Yang, W., Yang, M., Belongie, S., Luo, J., Datcu, M., Pelillo, M., and Zhang, L. (2021). Object detection in aerial images: A large-scale benchmark and challenges. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, pages 1–1.

- Gaddoury, M. A. and Armenian, H. K. (2024). Epidemiology of hajj pilgrimage mortality: Analysis for potential intervention. Journal of Infection and Public Health, 17:49–61.

- Girshick, R. (2015). Fast r-cnn. In Proceedings of the IEEE international conference on computer vision, pages 1440–1448.

- Hecker, C., van Ruitenbeek, F. J., van der Werff, H. M., Bakker, W. H., Hewson, R. D., and van der Meer, F. D. (2019). Spectral absorption feature analysis for finding ore: A tutorial on using the method in geological remote sensing. IEEE geoscience and remote sensing magazine, 7(2):51–71.

- Jocher, G., Chaurasia, A., Qiu, J., and Stoken, A. (2023). Yolo by ultralytics. Available at: https://github.com/ultralytics/yolov5. https:

- //github.com/ultralytics/yolov5.

- Jocher, G. and Qiu, J. (2024). Ultralytics yolo11.

- Khan, S. D., Basalamah, S., Ye, L., and Saddik, A. E. (2017). Vision-based crowd monitoring and analysis: A case study of masjid al haram. IEEE Access, 5:617–627.

- Leavers, V. (1993). Which hough transform? CVGIP: Image understanding, 58(2):250–264.

- Leitloff, J., Hinz, S., and Stilla, U. (2010). Vehicle detection in very high resolution

satellite images of city areas. IEEE transactions on Geoscience and remote sensing, 48(7):2795–2806.

- Li, Y., Zhang, X., and Chen, D. (2018). Csrnet: Dilated convolutional neural networks for understanding the highly congested scenes. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pages 1091–1100.

- Liu, S., Zeng, Z., Ren, T., Li, F., Zhang, H., Yang, J., Jiang, Q., Li, C., Yang, J., Su, H., et al. (2024). Grounding dino: Marrying dino with grounded pre-training for open-set object detection. In European conference on computer vision, pages 38–55. Springer.

- Mansour, A., Hassan, A., Hussein, W. M., and Said, E. (2019). Automated vehicle detection in satellite images using deep learning. In International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology, volume 18, pages 1–8. The Military Technical College.

- Martella, C., Li, J., Conrado, C., and Vermeeren, A. P. O. S. (2017). Flow-based approach for understanding crowd dynamics: A case study in public events. Safety Science, 91:381–394.

- Mehrabi, N., Morstatter, F., Saxena, N., Lerman, K., and Galstyan, A. (2021). A survey on bias and fairness in machine learning. ACM Computing Surveys, 54(6):1–35.

- Muhammad, A. and Yeasin, M. (2020). Eigen-cam: Class activation map using principal components. arXiv preprint arXiv:2008.00299.

- Paris, S., Kornprobst, P., Tumblin, J., Durand, F., et al. (2009). Bilateral filtering: Theory and applications. Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision, 4(1):1–73.

- Park, G.-H., Cho, H.-H., and Choi, M.-R. (2008). A contrast enhancement method using dynamic range separate histogram equalization. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 54(4):1981–1987.

- Piza, E. L., Welsh, B. C., Farrington, D. P., and Thomas, A. L. (2019). Cctv surveillance for crime prevention: A 40-year systematic review with meta-analysis. Criminology & public policy, 18(1):135–159.

- Ribeiro, M. T., Singh, S., and Guestrin, C. (2016). "why should i trust you?": Explaining the predictions of any classifier. In Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, pages 1135–1144.

- Rocchini, D.(2007). Effects of spatial and spectral resolution in estimating ecosystem-diversity by satellite imagery. Remote sensing of Environment, 111(4):423–434.

- Shah, F., Alotaibi, F., and Khan, M. (2024). Enhancing hajj and umrah rituals and crowd management through ai technologies: A comprehensive survey of applications and future directions. International Journal of Crowd Science, 8(2):145–168.

- Siu, W.-C. and Hung, K.-W. (2012). Review of image interpolation and super-resolution. In Proceedings of The 2012 Asia Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference, pages 1–10. IEEE.

- Sreenu, G. and Durai, S. (2019). Intelligent video surveillance: a review through deep learning techniques for crowd analysis. Journal of Big Data, 6(1):1–27.

- Ülkü, A. (2024). Ethical and cultural considerations in ai-driven crowd control for religious tourism. Journal of Islamic Tourism Studies, 3(1):25–42.

- Wang, X., Xie, L., Dong, C., and Shan, Y. (2021). Real-esrgan: Training real-world blind super-resolution with pure synthetic data. In Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision, pages 1905–1914.

- Yao, L., Wang, X., and Zhao, Y. (2023). A real-time anomaly detection system based on explainable ai for smart video surveillance. Sensors, 23(3):1156.

- Yezli, S., Ehaideb, S., Yassin, Y., Alotaibi, B., and Bouchama, A. (2024). Escalating climate-related health risks for hajj pilgrims to mecca. Journal of travel medicine, 31(4):taae042.

- Yezli, S., Yassin, Y. M., Awam, A. H., Attar, A. A., Al-Jahdali, E. A., and Alotaibi, B. M. (2017). Umrah. an opportunity for mass gatherings health research. Saudi medical journal, 38(8):868.

- Zhao, B., Han, P., and Li, X. (2023). Vehicle perception from satellite. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 46(4):2545–2554.

محـــور

الرعايــة الصحيــة الرقميــة والحلول التكنولوجيــة التفاعليــة

تعزيز الرعاية الصحية في الحشود: نموذج جديد للرعاية الصحية عن بُعد في الحج

عبدالهادي الرويثي*[1]، مؤيد الجهني[2]، سعيد الغامدي[1]، عبدالله الرويلي[3] - قسم التقنية السريرية، جامعة أم القرى[1] - قسم علوم التأهيل الطبي، جامعة أم القرى[2] - قسم الخدمات الطبية الطارئة، جامعة الملك سعود بن عبدالعزيز للعلوم الصحية[3]

Advancing healthcare in mass gatherings: a new telehealth model for the Hajj

Abdulhadi Al Ruwaithi [1]*, Moiyad Aljehani[2], Saeed Alghamdi[1] and Abdullah Alruwaili[3] - [1]Department of Clinical Technology, Umm Al-Qura University - [2]Department Medical Rehabilitation Sciences, Umm Al-Qura University - [3]Department of Emergency Medical Services, King Saud bin Abdulaziz University for Health Sciences

*Corresponding author: E-mail (aaruwaithi@uqu.edu)

الملخص

تفرض مواسم الحج ضغوطًا مكثفة وممتدة على خدمات الصحة العامة مع توافد كثيف ومتعدد الجنسيات. تقدّ م الرعاية الصحية عن بُعد وسيلة عملية لإعادة توزيع الرعاية الطبية، وتحسين استخدام الموارد التخصصية النادرة، وتقليل الزيارات الحضورية غير الضرورية للمنشئات الصحية. لتحليل استخدام الخدمات وتحديد زيارات ومراجعات المرضى القابلة للرعاية عن بُعد، قمنا بتحليل سجلات منشآت وزارة الصحة في الحج لثلاثة مواسم (2018، 2019، و2022). قُدّ رت معدلات الاستخدام الطبي (MURs) بوحدة مراجعات المرضى لكل 10,000 حاج (PPTT)

أعلى معدل استخدام طبي سجل في 2018 لعيادات الرعاية الأولية وأقسام العيادات الخارجية (2,772.58 PPTT)، مقارنةً بـ245.76 PPTT لأقسام الطوارئ والتنويم بالمستشفيات. على مدار المواسم الثلاثة، سُجلت 1,383,415 مراجعة/زيارة مرضية في الرعاية الأولية والعيادات الخارجية و148,824 مراجعة في أقسام الطوارئ والتنويم. شكّلت زيارات الرعاية الأولية والعيادات الخارجية حوالي 90.3% من المجموع، مما يشير إلى أن معظم الحالات غير عاجلة وقد تكون قابلة للإدارة والمتابعة عبر الرعاية عن بُعد. نقترح في هذه الورقة نموذجًا تشغيليًا هجينًا يتكوّ ن من محاور رعاية صحية افتراضية ثابتة (عيادات إلكترونية تحتوي على غرف علاج وصيدليات) تُكمّلها عيادات إلكترونية موزعة داخل المخيمات تقدّ م الفرز الطبي، والترجمة الإلكترونية متعددة اللغات، والاستشارات المتزامنة عن بُعد، والتحليلات المركزية.

نوصي بإجراء دراسات محاكاة وتطبيق تجربة ميدانية لهذا النموذج لتقييم سير العمل، والتشغيل البيني مع المنصات الرقمية الوطنية، والنتائج السريرية، والجدوى الاقتصادية، وقبول المستخدمين. إذا أُثبتت الفعالية، يمكن أن يقلّل النموذج من الاستشارات الحضورية غير الضرورية، ويوسّع وصول المتخصصين، ويحسّن التواصل بين المريض والممارس الصحي، ويقوّ ي إدارة القدرة الاستيعابية للرعاية الطبية في التجمعات الجماهيرية

Abstract

Hajj seasons impose intense, sustained demands on health services as large, multinational crowds disperse across multiple sites. Telehealth and telemedicine offer a pragmatic means to redistribute care, optimize scarce specialist resources, and reduce avoidable in-person visits. To quantify service use and identify patient presentations/visits suitable for telehealth, this study analyzed Ministry of Health facility records from three Hajj seasons (2018, 2019, 2022). Medical usage rates (MURs) were estimated as patient presentations (clinical encounters) per 10,000 pilgrims (PPTT). The highest MURs figures were reported in 2018 for primary healthcare centers (PHC) and outpatient departments (OPD) with 2,772.58 PPTT, compared to 245.76 PPTT for emergency rooms (ER) and admissions. Pooled figures from the three Hajj seasons were 1,383,415 PHC and OPD encounters and 148,824 ER and admission encounters. PHC and OPD visits comprised approximately 90.3% of patient encounters, suggesting most patient presentations were non-urgent and potentially manageable via telehealth. Building on established telemedicine evidence, we propose a hybrid operational model comprising fixed telehealth hubs (e-clinics with treatment rooms and pharmacies) complemented by distributed in-camp e-clinics that provide triage, multilingual e-translation, synchronous remote consultation, and centralized analytics.

Recommendations for the next steps include simulation-based validation and a pragmatic pilot to evaluate workflow, interoperability with national digital platforms, clinical outcomes, and user acceptability. If validated, this model could reduce unnecessary face-to-face consultations, improve patient-clinician communication,

broaden specialist access, and materially strengthen surge-capacity management for mass gatherings.
Keywords: telehealth, telemedicine, mass gathering, Hajj.

1. Introduction

The annual Hajj pilgrimage attracts millions, resulting in a distinct set of healthcare challenges, particularly in ensuring timely and effective medical attention (Aldossari, Aljoudi, and Celentano, 2019; Al Ruwaithi, 2021). The current healthcare system is facing significant strain due to the large number of attendees and the vast geographical coverage of the event, despite the level of health missions and efforts designated to the Hajj (Aldossari, Aljoudi, and Celentano, 2019; Al Ruwaithi, 2021). In this context, telehealth solutions could play a crucial role by enabling the overcoming of geographical barriers and facilitating real-time medical consultation and monitoring. Given the traffic congestion, access limitations, and the diverse cultural and linguistic backgrounds of the pilgrims (Al Ruwaithi, 2021), the applications of telehealth solutions could present a momentous ease to healthcare provision in the Hajj. Additionally, the integration of advanced technologies like artificial intelligence (AI) and real-time data analytics in telehealth can significantly improve decision-making and efficiency in healthcare delivery.

The field of telehealth

In the realm of healthcare provision, the applications of remote technologies encompass a range of terms, such as telehealth, telecare, mHealth, eHealth, and telemedicine (Van Dyk, 2014; Bashshur et al., 2011). The taxonomy in question comprises three dimensions: functionality (consultation, diagnosis, monitoring, mentoring), application (medical specialties, disease entities, sites of care, treatment modalities), and technology (synchronicity, network design, connectivity) (Bashshur et al., 2011). The technology dimension has seen significant expansion since the publication of (Bashshur et al., 2011), particularly with the emergence of artificial intelligence (AI) applications in the telehealth field. This advancement not only amplifies the technological capabilities but also expands its role to incorporate decision-making assistance.

The concept of telehealth is not new; its roots can be traced back to the late 20th century with the advent of low-cost computing and digital telecommunication technologies (Kissi et al., 2023). Nevertheless, the COVID-19 pandemic has served as a significant turning point for telehealth, emphasizing its crucial role in maintaining uninterrupted healthcare services. Telehealth platforms have played a key role in delivering various services during the pandemic, ranging from routine consultations to care management. This has alleviated the strain on healthcare facilities and ensured the safety of both patients and healthcare personnel by minimizing the risk of virus transmission (Monaghesh and Hajizadeh, 2020).

The field of diagnostic telemedicine is still in the process of development, confronting substantial challenges in terms of reimbursement, legal considerations, and liability, with the exception of tele-radiology. The primary functions of telemedicine typically align with six categories, which may overlap: i) chronic condition monitoring to identify early deterioration; ii) treatment and rehabilitation delivery; iii) self-management education and advice; iv) specialist consultations for diagnosis and treatment; v) real-time clinical status assessment; vi) screening for conditions like angina (Flodgren et al., 2015). However, modern AI technologies—including predictive analytics, automated image interpretation, natural-language processing (NLP) for multilingual triage, anomaly detection in physiologic streams, and decision-support algorithms—are conceptually and operationally part of the broader digital health ecosystem rather than the narrower clinical definition of telemedicine.

Telemedicine consultations demonstrate equivalent or superior patient outcomes relative to traditional in-person visits, encompassing enhanced access to care, greater patient satisfaction, and savings in cost and time. Unlike in-person consultations, virtual clinics necessitate distinct infrastructure at various operational levels, leading to varied experiences for patients and healthcare professionals, with prior telemedicine experiences potentially influencing future consultations (Alshammari, 2021). Its advantages extend beyond the coronavirus pandemic, with the potential to enhance healthcare accessibility, reduce unnecessary hospital visits, save on travel and healthcare costs, and optimize specialist resources (Pradhan et al., 2022). The present study investigates the number of patient visits during three distinct Hajj seasons and presents a groundbreaking telemedicine operational framework (or design), known as tele-healthcare centers/E-clinics, to enhance the accessibility and efficiency of healthcare services during the Hajj.

2. Methodology (Materials and methods)

This current paper tends to gauge the volume of patient visits and presentations at traditional healthcare institutions in the Hajj settings that could be managed through telehealth and telemedicine applications. The data of patient presentations and admissions to the Ministry of Health (MOH) hospitals and primary healthcare centers were collected for three Hajj seasons. Two of them were collected prior to the onset of COVID-19 and one subsequent to the pandemic (Hajj of 2018, 2019, and 2022) from the MOH Statistical Book (MOH, 2024). The retrieved data was shown in four classified

groups of patient presentations to MOH medical care provision: primary healthcare center (PHC), hospital emergency room (ER), outpatient clinic (OPD), and admission to hospital.

To obtain a more accurate measurement of patient volume across various levels of services, a more comprehensive classification system was implemented. This involved categorizing ER visitors and admitted patients together, and PHC visitors and OPD patients–who can be managed by telehealth application–together. A descriptive analysis was conducted, with a specific focus on rates and proportions of patient presentations at different MOH healthcare institutions during three Hajj seasons. The patient Then, the medical usage rates (MURs) were estimated as the unit of patients per 10,000 of the gathering (PPTT) (see Milsten et al., 2003). As a result, the authors propose a new design for tele-healthcare centers with a design incorporates telehealth into a comprehensive healthcare system, customized for the Hajj scenario.

3. Results

Patient's presentations and medical services usability

The study findings demonstrate a significant disparity in patient volumes, which reflect the medical usage rates (Milsten et al., 2003) among the various healthcare facilities observed during the three Hajj seasons under investigation. In the Hajj season of 2018, prior to the COVID-19 pandemic, the patient presentation per 10.000 (PPTT) to primary health care centers (PHC) was the highest, followed by OPD, ER visits, and hospital admissions (Figure 1). When comparing the level of usability of medical services (ER and admissions vs PHC and OPD), it is evident from Figure 2 that the majority of health interactions occurred through PHC and OPD.

The numbers of visits in PHC and OPD are 657,565, 545,068, and 180,782, compared to 582,87, 69,797, and 20,740 for ER and admissions in MOH healthcare institutions for Hajj seasons of 2018, 2019, and 2022, respectively. The PHC and OPD, combined, accounted for 91.9%, 88.6%, and 89.7% of all patient presentations to MOH venues in Makkah, Madinah, and Hajj sites in 2018, 2019, and 2022 respectively. The cumulative numbers of the three Hajj seasons reveal that PHC and OPD visits represent 90.3% (1383415 visits) of all patients served by MOH healthcare institutions in the Hajj, compared to 9.7% (148,824 visits or admissions) were reported at hospitals ER and/or admitted.

The patient visits proportion in 2018 was 30.2% of pilgrims, suggesting a substantial demand for healthcare services. In the Hajj of 2019, this proportion experienced a decrease to 24.7%. In 2022, immediately following the extensive lockdown due to the COVID-19 pandemic, there was a noticeable decline in the overall number of patients presenting, amounting to 21.8% of pilgrims.

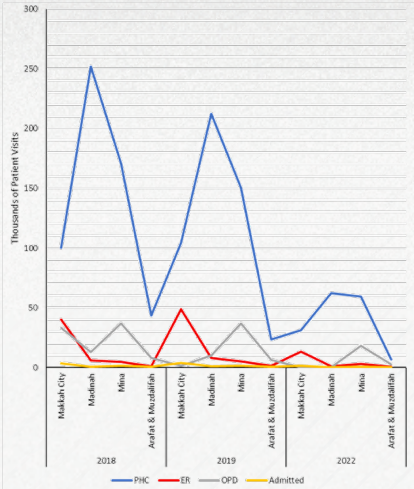


Figure 1. Patient visits among pilgrims in different locations during three Hajj seasons.1

Note. ER denotes MOH hospital emergency room, admitted denotes the admissions to MOH hospitals, PHC denotes primary healthcare centers, OPD denotes outpatient clinics (or department). 1The data source: Saudi MOH (MOH, 2024).

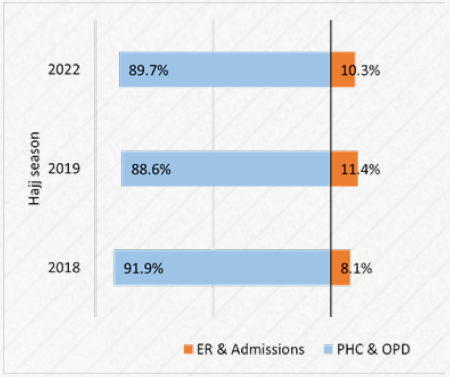


Figure 2. Proportions of patient visits within different levels of medical usability. 1

Note. ER denotes MOH hospital emergency room, admission denotes the patient admissions to MOH hospitals, PHC denotes primary healthcare centers, OPD denotes outpatient clinics (or department). 1The data source: Saudi MOH (MOH, 2024).

Medical usage rates

The number of patient (or clinical) encounters at MOH health facilities was 715,852, 614,865, and 201,522 in Hajj seasons of 2018, 2019, and 2022, respectively. For ER and

admissions, the MURs were 245.76 PPTT in 2018, 280.38 PPTT in 2019, and 223.96 PPTT in 2022 (Table 1). Conversely, MURs were 2,772.58 PPTT in 2018, 2,189.55 PPTT in 2019, and 1,952.16 PPTT in 2022 for PHC and OPD visits (Table 1). The idea here is that knowing the burden distribution on different levels of healthcare services provided in the Hajj—with a careful inference that some of those visits could be related to the same person. The large proportion of those visits can be managed through the use of telehealth/telemedicine applications. These volumes of patient presentations and loads of service demands urge us to propose a novel tele-healthcare system designed to be provided in the Hajj.

Table 1. Medical usage rates of the primary categories during the three Hajj seasons.

Hajj season	ER & Admissions		PHC & OPD	
	Patient encounters	(MURs)	Patient encounters	(MURs)
2018	58,287	(245.76 PPTT)	657,565	(2,772.58 PPTT)
2019	69,797	(280.38 PPTT)	545,068	(2,189.55 PPTT)
2022	20,740	(223.96 PPTT)	180,782	(1,952.16 PPTT)
Total/overall average	148,824	(257.16 PPTT)	1,383,415	(2,390.50 PPTT)

MURs indicates medical usage rates measured by patients per 10,000 (PPTT) of attendees.

Tele-healthcare centers

The proposed tele-healthcare layout is explicitly designed to lighten demand on traditional hospitals and clinics by shifting non-urgent primary and outpatient encounters into a hybrid pathway that combines local vital-sign checks and treatment windows with tele-triage, remote E-clinics, and specialist e-consultation. The proposed tele-healthcare layout is explicitly designed to lighten demand on traditional hospitals and clinics by shifting non-urgent primary and outpatient encounters into a hybrid pathway that combines local vital-sign checks and treatment rooms with tele-triage, remote E-clinics, and specialist e-consultation. The design is incorporating all technological advancements in telemedicine with on-site healthcare centers and clinics. The layout provided for the tele-healthcare center (Figure 3) shows a streamlined patient flow, beginning with the entrance leading to a reception, vital signs monitoring room, a waiting area, and a series of electronic clinics (E-clinics) flanking either side of the central treatment area. The area of management and technical or information technology (IT) support is centrally located, indicative of the pivotal role of technology in this model. Adjacent to the exit, there is a pharmacy with inside and outside windows that offers services to tele-healthcare centers patients and patients who present prescriptions from E-clinics dispersed across Hajj camps. The design allows for ease of access to various healthcare services and promotes efficient patient circulation within the facility, from entry to exit. In this hybrid model, the telehealth premises are leveraged to cover most of the services provided by traditional healthcare institutions, while reserve much of advantages of telemedicine.

Additionally, we propose the implementation of E-clinic within the Hajj camp areas to enhance the efficiency of service distribution. The proposed E-clinic would possess identical capabilities to the E-clinic situated within the tele-healthcare center. In cases where patients require specific medical care or prescriptions, physicians working remotely through these in-Hajj-camp distributed E-clinics can issue printed prescriptions and treatment instructions for patients in multiple languages (including English and the patient›s native language) and guide them to the nearest pharmacy and treatment facility. The premises of implementing the tele-healthcare centers and E-clinics within the Hajj settings include minimizing the physical contact, improving multi-language communication, enhancing data collection and monitoring, tackling the burden of cold cases, and providing better and more convenient access to the medical consultations and healthcare services.

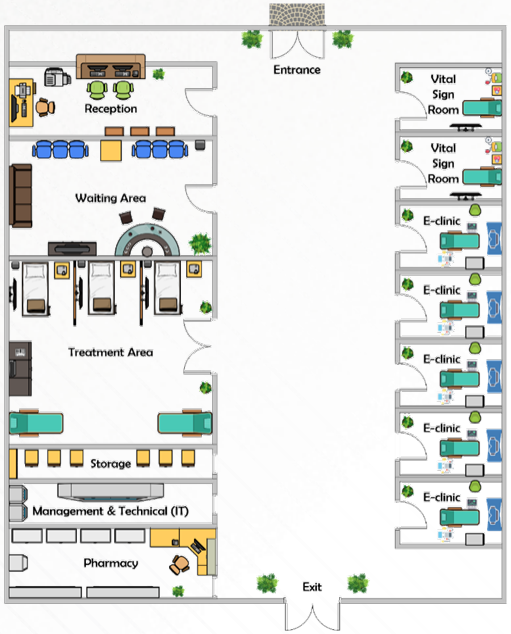


Figure 3. The proposed tele-healthcare center layout.

4. Discussion

The data show the majority of patient presentations during the Hajj are in PHCs and OPDs (≈90% overall). International evidence indicates that many PHC/OPD complaints — e.g., minor respiratory and gastrointestinal complaints, skin conditions, medication questions, chronic disease follow-up, mental-health triage, and some ENT/ophthalmology queries — can be handled by synchronous teleconsultation or store-and-forward specialist review (teledermatology, telepsychiatry) or by remote monitoring/triage to avoid unnecessary ED transfer (Alshammari, 2021; Seehusen and Azrak, 2019; Khatun et al., 2022; Vaidya et al., 2024).

Systematic reviews report measurable reductions in ED visits and hospital admissions after telemedicine implementation. Findings from the systematic review and meta-analysis indicate that perioperative telehealth interventions are associated with a reduced risk of readmissions and emergency department (ED) visits following abdominal surgery (Grygorian et al., 2024). Studies have demonstrated that telemedicine can alleviate congestion by as much as 20% (Alshammari, 2021, p. 1285). Moreover, some studies (e.g., Vaidya et al., 2024) revealed favorable perceptions of telemedicine among patients and healthcare professionals, particularly regarding management, counseling, efficiency, and convenience, consistent with (Hailey, Roine, and Ohinmaa.'s (2002) findings of high patient satisfaction and acceptance of telemedicine (Vaidya et al., 2024). In general, literature indicates that telemedicine consultations yield comparable satisfaction levels to in-person interactions despite physical separation (Vaidya et al., 2024).

Telehealth, a vital element of the contemporary healthcare provision, utilizes digital information and communication technologies to remotely access and manage healthcare services. This approach has garnered considerable attention, particularly in light of the worldwide COVID-19 crisis, which required a swift adaptation of healthcare delivery methods. The adoption of telehealth has been motivated by the imperative to ensure uninterrupted healthcare services while mitigating the risk of viral transmission, especially in mass gathering events (Monaghesh and Hajizadeh, 2020).

This paper manifests the volume of patients who can be managed by telehealth in the Hajj and suggests a new model of telehealth facility in the Hajj that leverages national health resources and promotes efficient and safe practices in healthcare. The results show the largest proportions of patients presented at MOH healthcare institutions in the Hajj are reported in PHCs and OPDs. The cumulative numbers of the three Hajj seasons reveal that PHC and OPD visits represent 90.3% of all patients served by MOH healthcare institutions in the Hajj, compared to 9.7% were reported at hospitals ER and/or admitted (inpatients departments). Similarly, the average of MURs for the three Hajj seasons indicates 2,390.5 PPTT in PHC and OPC, compared to 257.16 PPTT in ER and inpatient departments. With numbers exceeding 657.5k for patients' visits to PHC and OPD in some Hajj season, there is a high proportion of patients can be managed by telehealth in the Hajj.

The pattern of patient visits illustrated in Figure 1 reflects similar proportion to each group across the three Hajj seasons that were examined, considering the cumulative figures for all Hajj sites. The only exception, which is contrary to the trend observed in the aggregated data, the emergency room visits in Makkah City appear to exceed OPD visits (Figure 1). Similar patterns of high demands of non-emergency cases in the Hajj, sometimes reported to ambulance system or emergency medical services (EMS). Previous work demonstrates that non-emergency cases represent 45% in the 2018 Hajj and 61% in the 2019 Hajj season of reported patient visits to the primary EMS system, Saudi Red Crescent Authority (SRCA), in the three Hajj sites: Mina, Arafat, and Muzdalifah (Al Ruwaithi, 2021). On the other hand, 21% and 39% of patients reported by MOH ambulatory services are non-emergency cases (Al Ruwaithi, 2021).

The proportions of patient visits and MURs show a large decline in 2022. These findings suggest a potential correlation between density levels, the well-being of pilgrims as their numbers in 2022 largely reduced, compared to the pre-COVID-19 seasons. The number of pilgrims in 2022 is significantly lower at 926,062 compared to the figures of approximately 2.4 million and 2.5 million in 2018 and 2019, respectively. However, the proportion of visits and MURs to PHC and OPD remain high across the studied Hajj season, similarly with non-emergency cases (or cold cases) reported by ambulance services in the Hajj (Al Ruwaithi, 2021). In light of these findings, there is a practical opportunity to establish healthcare facilities that incorporate telemedicine concepts and tools, resulting in the formation of what is coined here as tele-healthcare centers.

The study shows that assimilation of telemedicine into the healthcare centers, particularly during the Hajj, signifies a transformative shift towards care that is more accessible, efficient, and patient-oriented. The findings of the study suggest that applying telehealth centers as a novel model can effectively manage the high volume of patient visits during the Hajj, providing increased accessibility to medical care. Additionally, it was projected that the implementation of such a model would enhance communication between healthcare providers and patients, as well as streamline the process of data collection during a multi-language gathering, such as the Hajj. The successful implementation and acceptance of telehealth applications in Saudi Arabia, including Seha and Mawid, have provided additional support for this transition. These applications have demonstrated their effectiveness in the midst of the COVID-19 pandemic (Alkhalifah et al., 2022;

Alghamdi et al., 2021).

The findings highlighted in this study underline the potential of telehealth in the management of patient care during large-scale events, such as the Hajj. The increasing reliance on emergency services and hospital admissions may reflect a shift in healthcare-seeking behavior, potentially influenced by the availability of telehealth options which could facilitate early intervention and management of acute conditions (Alghamdi et al., 2021). The proposed tele-healthcare center layout is a testament to the foresight of integrating technology with patient care. These centers provide a variety of digital tools, such as AI-powered physician-assisted diagnostic software, e-translator for voice and documentation, electronic health record systems, and real-time data analytics platforms. The consolidation of management and IT departments in the design emphasizes the importance of digital platforms in enhancing operational efficiency and patient flow (Alghamdi et al., 2021). The integration of E-clinics facilitates the utilization of vital medical resources, particularly physicians with specific specializations, from outside the Hajj area. This addresses two significant unresolved issues: (1) the logistical burden of deploying those physicians and (2) the utilization, for the first time, of non-Muslim physicians› capabilities in direct patient service during the Hajj.

The literature supports the advantages of telehealth applications, emphasizing their significance in raising awareness and providing health education. Some evidence suggested that telemedicine monitoring improved blood pressure control in hypertensive individuals, and several studies noted enhanced symptom scores for respiratory patients, with no differences observed in mental health services or dermatological consultations between face-to-face consultation and remote-meeting consultations (Flodgren et al., 2015). Flodgren et al.'s (2015) systematic review is quite old with the advancement in IT and AI, which assuming an improved healthcare provision can be achieved. This is particularly crucial during the Hajj, as it brings together individuals from diverse backgrounds (Almehmadi and Alqahtani, 2023).

Telemedicine systems rely on several key components to function effectively. The core components of telemedicine include improved networking techniques to optimize data transmission, security features to protect patient privacy, design strategies for effective system development, communication management to regulate information flow, and reliability, availability, and maintainability to ensure consistent service delivery (Alelyani et al., 2021). The tele-healthcare design in this study offers a scalable and efficient healthcare system, potentially alleviating the strain on healthcare facilities while improving patient outcomes. Such an adoption of healthcare delivery and provision not only supports the existing infrastructure but also ensures a more responsive, adaptable, and inclusive healthcare provision during the Hajj (Pradhan et al., 2022). Pradhan et al. (2022) make a call to extend telehealth applications beyond the COVID-19 response (Pradhan et al., 2022).

Telemedicine technology presents both benefits and drawbacks, with a notable downside being the erosion of the doctor-patient relationship (Pradhan et al., 2022). Nevertheless, by employing it during the Hajj, this limitation is eliminated, surpassing the traditional notion of community. Therefore, this proposed innovative healthcare design in the context of the Hajj could offer numerous advantages as follows:

(1) Minimizing the risk of infection involves limiting patient and physician contact, thus preserving valuable medical resources and reducing lost working days, and thus enhancing safety of both patients and healthcare clinicians.

(2) Alleviating the logistical burden of deploying physicians and providing flexible plans for them to contribute to Hajj healthcare missions (e.g., volunteering or contributing on specific days).

(3) Utilizing, for the first time, non-Muslim physicians' capabilities in direct patient service during the Hajj. Thus, it maximizes the country's resource utilization within healthcare agencies.

The significance of incorporating thoughtful and evidence-based design principles into the development of healthcare facilities is emphasized by these aforementioned advantages, with the aim of enhancing patient care and operational efficiency.

Implementation and infrastructure considerations

Implementation of a telemedicine program or telehealth model is a multi-faceted process that requires careful situational assessment, implementation planning, and continuous monitoring to ensure success, sustainability, as well as integration into the broader health system (WHO, 2022). Reflecting the World Health Organization's (WHO) Consolidated Telemedicine Implementation Guide and the Pan American Health Organization (PAHO)/WHO Framework for the Implementation of a Telemedicine Services (WHO, 2022; PAHO and WHO, 2016) ,and with thoughtful consideration of pilgrims' health needs and the Hajj environment, we suggest five core domains for deployment: (1) Connectivity and on-site IT hub — a centralized IT room with redundant connectivity and local caching to mitigate intermittent network disruption; (2) Clinical workflow & tele-triage — standardized triage protocols (scripts and red-flag triggers) and dedicated tele-triage staff to route cases to E-clinics, on-site treatment windows,

or emergency transport; (3) national integration — interoperability with national MOH records and appointment systems to avoid duplicate entries and preserve continuity of care; (4) Multilingual interface & e-translation — integrated speech/text translation and multilingual discharge/instruction printouts; and (5) Operational resilience & cybersecurity — defined availability targets (e.g., ≥95% baseline for non-critical services), routine data-quality checks, strong authentication and encrypted channels, and an incident response plan.

Limitations

This study's quantitative findings are necessarily general—statistical analyses were constrained by limited data accessibility and the paper's explicit aim of describing demand for urgent versus non-urgent medical services rather than making causal inferences or predictive claims. Despite this limitation, the manuscript introduces a novel hybrid tele-healthcare design that is tailored to pilgrims' community needs and the operational realities of Hajj. We therefore recommend a follow-on simulation study and a pragmatic pilot to test the model's operational performance, quantify potential reductions in in-person visits, and validate integration with existing health systems before large-scale implementation.

5. Conclusions

The incorporation of telemedicine and telehealth into the healthcare system, particularly during the Hajj, signifies a paradigm shift towards enhanced accessibility, efficiency, and patient-centric healthcare. The study›s findings demonstrate the large volume of patients' influx to MOH healthcare institutions that can be managed by telehealth in the Hajj settings. Thus, this paper shows the practicality of implementing healthcare centers as a novel model for handling the influx of patient visits to healthcare institutions during the Hajj, thereby enhancing accessibility to medical care. The projected healthcare facility model aims to enhance patient-practitioner communication and streamline data collection during multi-language gatherings, such as the Hajj. Additionally, it offers several advantages, such as reducing infection risk and maximizing utilization of national medical resources.

6. Recommendations

We recommend establishing and testing a hybrid telehealth model—fixed Tele-Healthcare Centers located near major Hajj zones plus distributed E-Clinics inside camp areas—that triages, consults, monitors, and manages the majority of non-emergency (PHC/OPD-level) presentations remotely. The model leverages existing national digital health platforms and infrastructure, on-site vitals/assessments and pharmacies, multilingual e-translation, and centralized IT/analytics to reduce in-person congestion, speed care, preserve emergency resources, and improve data capture for public-health surveillance. This recommendation is based on observed patient-flow patterns and medical usage rates (MURs) across three Hajj seasons presented in the uploaded manuscript.

References

- Al Ruwaithi, A. A. (2021) The Emergency Medical Services Delivery in Mass Gathering Events: A Case Study of the Hajj. PhD thesis. University of Delaware. Available at: https://udspace.udel.edu/items/856efa47-328f-44af-9bd1-aa3b1dcf84b0

- Aldossari, M., Aljoudi, A. and Celentano, D. (2019) 'Health issues in the Hajj pilgrimage: a literature review', Eastern Mediterranean Health Journal, 25(10), pp. 744–753. doi: 10.26719/2019.25.10.744. PMID: 31774140. Available at: https://www.emro.who.int/emhj-volume-25-2019/volume-25-issue-10/health-issues-in-the-hajj-pilgrimage-a-literature-review.html

- Alelyani, T. et al. (2021) 'Research challenges and opportunities towards a holistic view of telemedicine systems: a systematic review', in Marques, G., Bhoi, A.K., de la Torre Díez, I. and Garcia-Zapirain, B. (eds.) Enhanced Telemedicine and e-Health. Studies in Fuzziness and Soft Computing, vol. 410. Cham: Springer. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-70111-6_1

- Alghamdi, S. M., Alsulayyim, A. S., Alqahtani, J. S. and Aldhahir, A. M. (2021) 'Digital health platforms in Saudi Arabia: determinants from the COVID-19 pandemic experience', Healthcare, 9(11), p. 1517. MDPI. Available at: https://doi.org/10.3390/healthcare9111517

- Alkhalifah, J. M. et al. (2022) 'The role of the COVID-19 pandemic in expediting digital health-care transformation: Saudi Arabia's experience', Informatics in Medicine Unlocked, 33, p. 101097 .Available at: https://doi.org/10.1016/j.imu.2022.101097

- Almehmadi, M. and Alqahtani, J. S. (2023) 'Healthcare research in mass religious gatherings and emergency management: a comprehensive narrative review', Healthcare, 11(2), p. 244. MDPI. Available at: https://www.mdpi.com/2227-9032/11/2/244

- Alshammari, F. A. M. (2021) 'The effectiveness of telemedicine consultation and the elimination of congestion in hospitals: a systematic review', International Journal of Health Sciences, 5(S1), pp. 1284–1288. Available at: https://doi.org/10.53730/ijhs.v5nS1.15199

- Bashshur, R., Shannon, G., Krupinski, E. and Grigsby, J. (2011) 'The taxonomy of telemedicine', Telemedicine and e-Health, 17(6), pp. 484–494. Available at: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21718114/

- Flodgren, G., Rachas, A., Farmer, A. J., Inzitari, M. and Shepperd, S. (2015) 'Interactive telemedicine: effects on professional practice and health care outcomes', Cochrane Database

of Systematic Reviews, CD002098. Available at: https://doi.org/10.1002/14651858.CD002098.pub2

- Grygorian, A., Montano, D., Shojaa, M., Ferencak, M. and Schmitz, N. (2024) 'Digital health interventions and patient safety in abdominal surgery: a systematic review and meta-analysis', JAMA Network Open. Available at: https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.8555

- Hailey, D., Roine, R. and Ohinmaa, A. (2002) 'Systematic review of evidence for the benefits of telemedicine', Journal of Telemedicine and Telecare, 8(1_suppl), pp. 1–7.. Available at: https://doi.org/10.1258/1357633021937604

- Khatun, F. et al. (2022) 'The promise of teleconsultation in the era of pandemic: a case from Bangladesh', Telemedicine Journal and e-Health. doi:10.1089/tmj.2021.0529. Available at: https://doi.org/10.1089/tmj.2021.0529

- Kissi, J., Annobil, C., Mensah, N. K., Owusu-Marfo, J., Osei, E. and Asmah, Z. W. (2023) 'Telehealth services for global emergencies: implications for COVID-19: a scoping review based on current evidence', BMC Health Services Research, 23, p. 567. Available at: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37264401/

- Milsten, A. M., Seaman, K. G., Liu, P., Bissell, R. A. and Maguire, B. J. (2003) 'Variables influencing medical usage rates, injury patterns, and levels of care for mass gatherings', Prehospital and Disaster Medicine, 18(4), pp. 334–346. Available at: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15310046/

- Ministry of Health (MOH) (2024) Annual Statistical Book 2022: Chapter Five: Hajj for the year of 2022. Riyadh: Ministry of Health. Available at https://www.moh.gov.sa/Ministry/Statistics/book/Pages/default.aspx

- Monaghesh, E. and Hajizadeh, A. (2020) 'The role of telehealth during COVID-19 outbreak: a systematic review based on current evidence', BMC Public Health, 20, pp. 1–9. Available at: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32738884/

- Pan American Health Organization (PAHO) and World Health Organization (WHO) (2016) Framework for the Implementation of a Telemedicine Service. Washington, DC: Pan American Health Organization. Available at: Available at: https://iris.paho.org/handle/10665.2/28414

- Pradhan, N., Panda, N., Singh, S., Rout, M. R. and Samantaray, K. (2022) 'Knowledge, attitude and perception of health care providers and their patients regarding "Telemedicine" for otorhinolaryngeal care during the COVID-19 pandemic', International Journal of Community Medicine and Public Health, 9(12), pp. 4499–4504. Available at: https://www.ijcmph.com/index.php/ijcmph/article/view/10312

- Seehusen, D. A. and Azrak, A. (2019) 'The effectiveness of outpatient telehealth consultations', American Family Physician, 100(9), pp. 575–577. Available at: https://www.aafp.org/pubs/afp/issues/2019/1101/p575.html

- Vaidya, V. et al. (2024) 'Healthcare in the modern era: launching a telemedicine-based OPD consultation in rural Pune (process, results, and challenges)', Cureus. Available at: https://doi.org/10.7759/cureus.60310

- Van Dyk, L. (2014) 'A review of telehealth service implementation frameworks', International Journal of Environmental Research and Public Health, 11(2), pp. 1279–1298. Available at: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3945538/

- World Health Organization (2022) Consolidated Telemedicine Implementation Guide. Geneva: WHO. Available at: Available at: https://www.who.int/publications/i/item/9789240059184

أنظمة الفرز الأولي للشكاوى العضلية الهيكلية في التجمعات المكتظة: مراجعة أدبية وإطار مقترح لتطبيقه في الحج

احمد العلوي- قسم علوم التأهيل الطبي، كلية العلوم الطبية التطبيقية، جامعة أم القرى

Triage Support Systems for Musculoskeletal Complaints During Mass Gatherings: A Literature Review and Proposed Framework for Hajj Settings

Ahmed Alalawi - Department of Medical Rehabilitation Sciences, College of Applied Medical Sciences, Umm Al-Qura University, Makkah, Saudi Arabia

*Corresponding author: E-mail (Amalawi@uqu.edu.sa)

الملخص

تعد الشكاوى العضلية الهيكلية من أكثر الحالات شيوعًا خلال موسم الحج، حيث تتراوح معدلات انتشارها بين 70% و80% من الحجاج، وتشمل آلام أسفل الظهر، آلام الركبة، واضطرابات القدم والساق. وعلى الرغم من العبء الكبير لهذه الحالات، لا تتوفر حتى الآن أدوات فرز مصممة خصيصًا للتجمعات البشرية الكبرى مثل الحج.

الهدف: هدفت هذه المراجعة المنهجية إلى تحديد وتحليل الأنظمة الرقمية والإكلينيكية المستخدمة لفرز الحالات العضلية الهيكلية واقتراح إطار عمل مبسط يتناسب مع بيئة الحج.

المنهجية: جرى البحث في اربع قواعد بيانات للفترة بين 2010 و2025. شملت الدراسات المؤهلة تلك التي تناولت تطوير أو تقييم أو التحقق من أدوات فرز أو دعم قرار خاصة بالاضطرابات العضلية الهيكلية

النتائج: تم تضمين ثماني دراسات تناولت أنظمة دعم القرار الطبي، ومسارات فرز يقودها اخصائي العلاج الطبيعي، واستبيانات تقييم المخاطر، وأدوات الاحالة. أظهرت الأدلة تحسن الكفاءة، رضا المرضى، ودقة الإحالات، بينما كان تأثيرها على النتائج السريرية محدودً ا. ولم تُطوّ ر أي أداة أو تُختبر في سياق الحج

الاستنتاج: استنادً ا إلى النتائج، نقترح إطارً ا مبسطًا يعتمد على فحص العلامات الحمراء، والتقييم الوظيفي والأعراض، لتصنيف الحالات إلى: (1) عناية ذاتية وتطمين، (2) إحالة للعلاج الطبيعي، (3) تصعيد للحالات الطارئة. ويُعد هذا الإطار أساسًا عمليًا للتنفيذ والتجريب الميداني خلال مواسم الحج المستقبلية

الكلمات الدالة: الفرز الأولي، العلاج الطبيعي، الرعاية الصحية الرقمية، الحج، الجهاز العضلي الهيكلي

Abstract

Background: Musculoskeletal (MSK) disorders are leading causes of disability worldwide and a major concern during the Hajj pilgrimage, where over 70% of pilgrims report MSK pain. Despite this high burden, no triage tools have been developed for mass gatherings. Objective: This systematic review aimed to identify and synthesize evidence on existing MSK triage tools and propose a framework adapted to Hajj. Methods: PubMed, Scopus, and EBSCOhost (CINAHL/MEDLINE) were searched from 2010 to 2025 using predefined criteria. Eligible studies described the development, validation, or evaluation of MSK triage or decision support systems. Data were extracted based on tool type, setting, inputs, outputs, validation, and findings. Results: Eight studies were included, encompassing digital clinical decision support systems, physiotherapy-led triage pathways, screening questionnaires, and referral tools. Evidence showed consistent improvements in efficiency, patient satisfaction, and referral appropriateness, but limited impact on clinical outcomes. Crucially, none were developed or validated in mass gathering contexts such as Hajj. Conclusion: Drawing on existing evidence, a simplified framework is proposed for Hajj. It combines red-flag screening, functional assessment, and symptom profiling to direct patients into self-management, physiotherapy referral, or urgent medical evaluation. This approach offers a practical foundation for validation in future Hajj seasons.

Keywords: Decision Support, Physiotherapy, Digital Health, Hajj, Musculoskeletal Triage

1. Introduction

Musculoskeletal (MSK) disorders are one of the leading causes of disability and impact

over 1.7 billion individuals globally (Haas et al., 2023). They significantly burden the usage of healthcare services(Haas et al., 2023). For example, up to 20% of primary care visits and many emergency rooms visits are related to MSK disorders (Silverman et al., 2020). Patients and healthcare systems are heavily burdened by these conditions, which include acute injuries and chronic pain syndromes. This burden requires effective methods for diagnosing and treating these conditions.

During the yearly Hajj pilgrimage, the impacts of MSK disorders become even more evident. Millions of people deal with heat stress, repetitive physical activity, long walks, and other MSK disorders. Specifically, according to epidemiological surveys, between 70% and over 80% of pilgrims experience MSK pain (Alghamdi et al., 2024; Alshehri et al., 2021). Low back pain, knee pain, foot and ankle problems, and generalized leg pain are common complaints. Fractures, ligament tears, and muscle pain and spasms are just a few examples of injuries. According to Alghamdi et al. (2024), these injuries are frequently mentioned as the main reasons why people get sick and need medical attention during the Hajj (Alghamdi et al., 2024). This circumstance emphasizes the necessity of efficient management and triage techniques intended for large crowds.

More studies on MSK triage models in healthcare systems, particularly physiotherapy-led approaches, have been conducted in the past years. Advanced practice physiotherapists have the ability of providing safe and efficient triage, as shown previously (Babatunde et al., 2020; Lafrance et al., 2023; Vedanayagam et al., 2021). In terms of efficiency, patient satisfaction, and diagnostic accuracy, their results are on level with or better than those of doctors (Babatunde et al., 2020; Vedanayagam et al., 2021). It has been demonstrated that non-medical triage and direct access services reduce wait times, enhance referral processes, and increase patient engagement (Babatunde et al., 2020; Morris et al., 2015).

Other approaches that show promise for organizing MSK care pathways include fuzzy logic decision support systems (Farzandipour et al., 2018) and digital decision aids (Bowen et al., 2020; Fajardo et al., 2019). These results collectively imply that structured triage models improve resource utilization and efficiency in high-volume MSK care.

Despite these developments, no triage tool has been developed or tested especially for situations involving large crowds, such as the Hajj. The current models are designed for use in hospital emergency rooms, orthopedic clinics, or primary care settings. They frequently depend on factors that are difficult to meet during the Hajj, such as internet access, the availability of specialists, or extensive patient evaluations. Given the high incidence of MSK problems among pilgrims and the particular difficulties of the pilgrimage environment, it is critical to modify current knowledge into a framework that can be used in situations involving large crowds. The purpose of this review is to provide an overview of the available data on MSK triage instruments and offer a tailored framework for handling typical MSK problems during the Hajj.

2. Methodology (Materials and methods)

This systematic review was conducted in accordance with the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) 2020 statement (PRISMA).

2.1 Eligibility Criteria: Studies were eligible if they described the development, validation, or evaluation of a digital or clinical triage tool for managing MSK disorders. This includes the most common MSK disorders during the Hajj pilgrimage, particularly low back pain, neck pain, knee pain, and ankle and foot disorders. Epidemiological studies have reported that these issues affect 70-80% of pilgrims (Alghamdi et al., 2024; Alshehri et al., 2021).

Eligible studies included those conducted in primary care, outpatient, emergency, or other first-contact healthcare settings. They had to report on tool characteristics such as inputs, outputs, decision logic, or evaluation outcomes like accuracy, safety, efficiency, or user satisfaction. Exclusion criteria included studies that focused only on surgical or postoperative triage, those that addressed non-MSK conditions, studies limited to children, and publications lacking sufficient methodological detail, such as conference abstracts, editorials, or narrative commentaries.

2.2 Search Strategy: A search was carried out across several electronic databases, including PubMed, Scopus, and EBSCOhost (CINAHL and MEDLINE), to identify relevant studies published between January 2010 and July 2025. The search strategy used terms related to MSK disorders and triage or decision support systems. For example: («musculoskeletal» OR «MSK») AND («triage» OR «clinical decision support» OR «decision aid») AND («digital» OR «tool» OR «system»). To ensure that the search was thorough, the reference lists of all included studies were also checked manually for additional eligible publications.

2.3 Study Selection: Search results from all databases were exported into reference management software, and duplicates were removed. Titles and abstracts were then checked against the predefined eligibility criteria. The full texts of potentially relevant articles were retrieved for detailed assessment. Studies that met the inclusion criteria were kept for data extraction and synthesis. Reasons were documented for excluding articles at the full-text stage.

2.4 Data Extraction and data items: A standardized data extraction form was developed in Microsoft Excel to ensure consistency across studies. For each included article, data were collected on bibliographic details (author, year, country), target MSK condition(s), tool type and description, clinical setting, inputs required (such as symptoms,

screening questionnaires, or clinical variables), outputs (including triage levels, referral recommendations, or treatment advice), validation or evaluation methods, and the main findings.

2.5 Data Synthesis and Analysis: Given the heterogeneity in study designs and results, a narrative synthesis approach was adopted. Key similarities and differences in inputs, outputs, and validation methods were highlighted. The findings were integrated to pinpoint evidence gaps and consider their implications for triage in mass gathering contexts like Hajj.

3. Results and Discussion

3.1 Results: A total of eight studies were included in the final synthesis after screening and assessing the eligibility of 657 records. This process is summarized in the PRISMA flow diagram (Figure 1). The studies looked at various MSK decision support and triage tools. These included AI-driven clinical decision support systems (CDSS), digital assessment and routing tools, physiotherapist-led diversion or telephone triage pathways, and questionnaire-based risk stratification instruments.

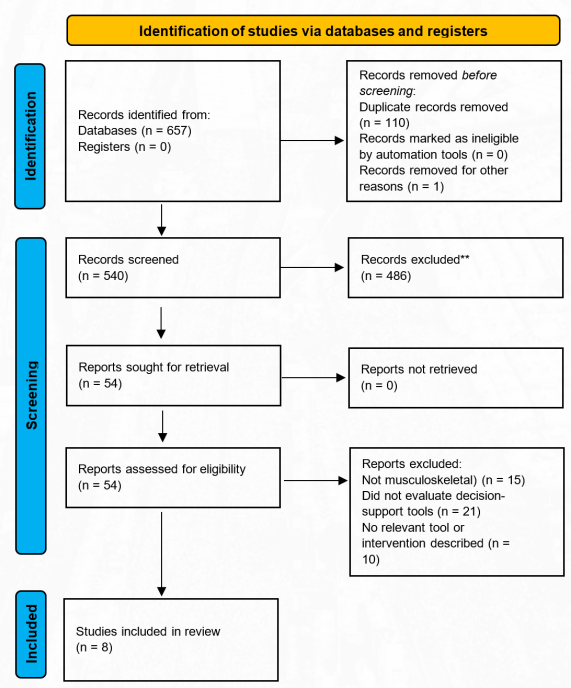


Figure 4: Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses (PRISMA) 2020 flow diagram

The target conditions varied across studies, but most focused on common MSK presentations involving spinal disorders such as neck pain (Granviken et al., 2023; Gergelé et al., 2021; Granviken et al., 2025) and low back pain (Gergelé et al., 2021; Abdul Malik Tun et al., 2023; Dowell et al., 2023). In addition, some studies included conditions related to the hip (Granviken et al., 2023; Lowe et al., 2024; Granviken et al., 2025; Lowe et al., 2025), knee (Granviken et al., 2023; Dowell et al., 2023; Lowe et al., 2024; Granviken et al., 2025; Lowe et al., 2025), or shoulder (Dowell et al., 2023; Lowe et al., 2025). Study settings were primarily within primary care physiotherapy (Granviken et al., 2023; Abdul Malik Tun et al., 2023; Granviken et al., 2025) and emergency department services (Truter et al., 2024; Dowell et al., 2023), with additional evaluations in workers' rehabilitation clinics (Gergelé et al., 2021) and NHS (National Health Service) MSK pathways (Lowe et al., 2024; Lowe et al., 2025).

3.1.1 Digital Decision Support Tools

Three studies looked at AI-based or digital CDSS interventions (Table 1). Granviken et al. (2023, 2025) examined case-based reasoning systems for personalized treatment recommendations in primary care physiotherapy. Early pilot testing showed high usability and acceptability (Granviken et al., 2023). However, a later cluster randomized trial found no significant benefit over usual care, with some results even favoring the control group (Granviken et al., 2025). Similarly, the decision support system for LBP (DeSSBack) tested by Abdul Malik Tun et al. (2023) added risk stratification to electronic medical records. This system showed moderate improvements in disability but had minimal effects on pain and mood outcomes. Overall, digital CDSS tools were feasible and well received by clinicians, but their clinical impact was limited due to small case numbers, low uptake, and challenges with adherence.

Two studies explored the Digital Assessment Routing Tool (DART) within NHS services (Table 1). Lowe et al. (2024) reported high patient satisfaction and no unsafe triage decisions. In a larger quality improvement study, Lowe et al. (2025) found that DART improved efficiency, reduced administrative workload, and provided substantial cost savings while maintaining safety.

3.1.2 Physiotherapist-led and Questionnaire-based Tools

Three studies looked at triage models led by physiotherapists or based on structured questionnaires (Table 1). In an emergency department setting, Truter et al. (2024) found that a physiotherapist-led diversion pathway cut the length of stay by nearly two hours, improved discharge compliance, and achieved high patient satisfaction. Dowell et al. (2023) also reported that a telephone triage and advice service safely discharged up to 40% of referrals, reduced unnecessary in-person consultations, and lowered non-attendance

rates.

Gergelé et al. (2021) explored questionnaire-based stratification for workers with spinal disorders. Their analysis indicated that the Örebro Musculoskeletal Pain Questionnaire (ÖMPQ) was more effective than both clinicians and the Work Assessment Triage Tool (WATT) in identifying workers at risk of delayed recovery. This highlighted the potential benefits of structured psychosocial screening in rehabilitation.

Table 1: Summary of Included Studies Evaluating MSK Decision Support and Triage Tools

Articles	Target MSK Condition	Tool Type	Setting	Inputs	Outputs	Validation/Evaluation	Main Findings
(Granviken et al., 2023)	People with Neck, shoulder, back, hip, or knee pain	AI-based Clinical Decision Support System (case-based reasoning)	Primary care physiotherapy (Norway)	Self-reported symptoms (MSK-HQ, STarT MSK Tool, Örebro Short Form), red flags, clinical exam findings	Patient profile dashboard, risk group affiliation, matched "most similar" patients, treatment recommendations (education, active & passive treatment, cooperation, referral options).	Qualitative pilot (4 physiotherapists, 12 patients); acceptance/usability interviews	- High usability and acceptability; supported patient history and patient dialogue, but limited influence on final decisions.
(Truter et al., 2024)	General musculoskeletal conditions (minor trauma, soft tissue injuries, atraumatic pain, closed fractures)	Physiotherapist-led diversion pathway (triage system)	Emergency Department (secondary hospital, Western Australia).	Presenting complaint, ED triage information, brief history, and triage assessment by advanced-scope physiotherapist; exclusion of red flag and high-risk cases.	Decision to divert to physiotherapy-led outpatient clinic vs. remain in ED; provision of evidence-based care including diagnosis, imaging, treatment, discharge planning, or onward referral.	Prospective intervention study (n=1794 total; 1099 diverted, 491 eligible but not diverted, 182 ineligible); service evaluation using ED metrics and patient satisfaction survey.	- Diversion reduced ED length of stay by about 110 minutes (mean LOS 82 vs. 191 minutes), improved 4-hour discharge compliance by 19.3%, and reduced "did not wait" rates (0.5% vs. 9.6%). - Patient satisfaction was very high (96.7%).
(Gergelé et al., 2021)	Spinal conditions (low back pain, neck pain).	Örebro Musculoskeletal Pain Questionnaire (ÖMPQ) and Work Assessment Triage Tool (WATT)	Workers' Compensation rehabilitation clinics (Canada; WCB-Alberta dataset).	ÖMPQ: 25-item questionnaire on psychosocial and work-related risk factors; WATT: 18-item computerized algorithm using worker-level characteristics; clinician recommendations for comparison.	Risk stratification into low, medium, and high risk of delayed recovery; corresponding recommendations for rehabilitation intensity (single service, functional restoration/workplace-based, or complex interdisciplinary programs).	Secondary analysis of a historical cohort (n = 2,872 workers with spinal conditions); Compared tool recommendations to actual treatment outcomes (return to work at 30 days and 180 days)	- Overall accuracy of all tools was modest. - ÖMPQ (original cut-offs) showed the best specificity (0.78) and highest positive likelihood ratio (LR+ = 1.51), significantly better than clinicians (1.05) and WATT (0.93). - Clinicians were more sensitive but less specific. - ÖMPQ may improve triage for spinal conditions.
(Abdul Malik Tun et al., 2023)	Nonspecific low back pain	Electronic Clinical Decision Support System (DeSSBack), integrated into EMR, adapted from STarT Back risk stratification.	Primary care clinic, University of Malaya Medical Centre (Malaysia).	Red Flag Identification (RFI) tool for serious pathology; STarT Back Screening Tool; Patient self-reported symptoms (pain, function, anxiety, depression).	Risk stratification (low, medium, high risk); Tailored management pathways: self-management, referral to physiotherapy, or referral to advanced pain & rehabilitation clinic.	Pilot cluster randomized controlled trial (10 doctors, 36 patients: 23 intervention, 13 control); mixed-methods evaluation with quantitative outcomes and qualitative interviews with doctors.	- Medium effect size improvement for disability (RMDQ, d = 0.718). - Small or negligible effect sizes for pain and depression. - Good fidelity among doctors; patient adherence to treatment was poor (affected by COVID-19). - Doctors found the system easy to use, promoted standardized care, improved consultation efficiency, and supported patient-centered care.
(Dowell et al., 2023)	General musculoskeletal injuries referred from the emergency department (ankle sprain, knee soft tissue injury, shoulder injury, low back pain)	Physiotherapy-led Telephone Triage and Advice (TTAD) service.	Emergency Department referrals to MSK physiotherapy, Queens Hospital Burton, UK.	Referral from ED, patient telephone consultation, basic history, symptom progress, red flag screening, clinical prioritization by physiotherapist.	Discharge via telephone with advice/self-management; Telephone follow-up review; Referral for face-to-face physiotherapy appointment if needed.	Retrospective service evaluation, pre-post implementation (2017 vs. 2018), n=598 referrals (250 in 2017, 348 in 2018).	- 40.2% of referrals discharged via TTAD in 2018. - Reduced initial face-to-face appointments (250 to 208). - Decrease in failed attendances (14.4% to 9.5%) despite an 11.2% increase in referrals. - High discharge rates via TTAD for ankle sprains (69.5%), knee injuries (73.8%), LBP (60%). - Concluded TTAD reduced demand for face-to-face appointments, improved efficiency, and maintained safety.
(Lowe et al., 2024)	General musculoskeletal conditions (back, knee, or hip pain)	Digital Assessment Routing Tool (DART) (a web-based/mHealth digital triage system).	NHS primary care practice, England.	Patient-reported symptoms via structured digital questionnaire; algorithm mapped to NHS MSK service pathways; includes screening for emergency/urgent needs, physiotherapy, and self-management options.	Triage recommendations: emergency/urgent medical care, first contact physiotherapist (FCP), physiotherapy, or supported self-management.	8-week crossover noninferiority randomized pilot trial (n=78); compared DART triage outcomes with physiotherapist-led triage; expert panel review of disagreements; System Usability Scale (SUS) for patient satisfaction.	- Initial agreement between DART and physiotherapists was 41% (ICC = 0.37, poor-moderate reliability). - Adjusted analysis incorporating expert panel judgments showed 78% agreement (ICC = 0.57). - No adverse triage decisions; most disagreements were minor over/under-escalations. - Patient satisfaction was high (SUS = 84/100, "excellent"). - Concluded DART has potential to improve MSK pathways; a full-scale definitive RCT is feasible.
(Granviken et al., 2025)	musculoskeletal pain (neck, shoulder, back, hip, knee, and complex/multisite pain).	AI-driven Clinical Decision Support System (CDSS, case-based reasoning).	Primary care physiotherapy, Norway.	Self-reported baseline questionnaires (pain, function, work ability, psychosocial factors, MSK-HQ, STarT MSK Tool, Örebro questionnaire); clinical exam findings	Patient dashboard; matched similar past patients; treatment suggestions across four domains (advice/education, active treatment, passive treatment, cooperation/referral).	Cluster randomized controlled trial (44 physiotherapists, 724 patients). Intervention = CDSS + usual care vs. control = usual care. Outcomes: Global Perceived Effect (GPE), Patient-Specific Functional Scale (PSFS), secondary outcomes (pain, work ability, MSK-HQ, etc.).	- No significant difference in GPE between groups. - PSFS showed higher improvement in the control group (70.3%) vs. intervention (59.7%), OR 0.41 (95% CI 0.20-0.85). - Some secondary outcomes also favored the control group, though effect sizes were small and below prespecified thresholds for clinical importance. - CDSS is feasible but limited by a small case base, lack of active learning, and low fidelity in therapist uptake.
(Lowe et al., 2025)	General musculoskeletal conditions (back, knee, hip, and shoulder).	Digital Assessment Routing Tool (DART), a web-based case-based reasoning triage system.	NHS MSK service, Mersey & West Lancashire Teaching Hospitals, England.	Patient self-reported symptoms (online or telephone-assisted); Algorithm configured to NHS MSK service pathways.	Stratification to urgent, routine physiotherapy, self-management, or condition-specific programs. Clinical summary uploaded to patient records for clinician review.	Outcomes included safety (clinician-DART agreement), efficiency, cost, and satisfaction.	- 401 (9.8%) urgent cases identified immediately. - Admin processing time reduced by 51% (cost saving of £80.16 per 100 referrals). - The new self-management pathway cut costs per patient by 73%. - Potential 63% cost saving for knee OA patients stratified to targeted program. Patient satisfaction was ~90%; clinicians and administrators reported improved workload balance. - Overall: DART improved safety, efficiency, cost-effectiveness, and satisfaction; successfully embedded into the NHS pathway.

Abbreviations: MSK: Musculoskeletal; DART: Digital Assessment Routing Tool; RCT: Randomized Controlled Trial; SUS: System Usability Scale; NHS MSK: National Health

Service; ED: Emergency Department; MSK-HQ: Musculoskeletal Health Questionnaire; STarT: Subgroups for Targeted Treatment (STarT Back Tool); LR: Likelihood Ratio; RMDQ: Roland-Morris Disability Questionnaire; EMR: Electronic Medical Record; CDSS: Clinical Decision Support System.

3.2 Discussion:

3.2.1 Summary of Evidence and Gap Identification

This review found eight studies that developed or evaluated MSK triage and decision support tools. These tools included digital clinical CDSS, risk stratification questionnaires, physiotherapy-led pathways, and electronic referral systems (Abdul Malik Tun et al., 2023; Dowell et al., 2023; Gergelé et al., 2021; Granviken et al., 2025; Granviken et al., 2023; Lowe et al., 2025; Lowe et al., 2024; Truter et al., 2024). Most of these studies focused on general MSK issues in primary care or emergency settings. Only a few targeted specific high-prevalence conditions like low back or knee pain. The evidence showed consistent improvements in efficiency, patient satisfaction, and the appropriateness of referrals. However, the effects on clinical outcomes were less clear. Importantly, none of the studies were developed or validated in mass gathering contexts such as the Hajj pilgrimage. During this event, 70-80% of pilgrims report MSK pain, which includes low back, knee, ankle/foot, and leg pain (Alghamdi et al., 2024; Alshehri et al., 2021).

3.2.2 Comparison with Global Screening Models

A broad range of approaches for musculoskeletal screening and triage have been developed and implemented globally. The NHS Digital Assessment Routing Tool (DART) in the UK has shown potential in improving efficiency and cost-effectiveness while appropriately directing patients to suitable care pathways (Lowe et al., 2025; Lowe et al., 2024). The Örebro Musculoskeletal Pain Questionnaire (Gergelé et al., 2021) has been extensively employed in Canada and Europe for psychosocial risk stratification. In Australian emergency departments, physiotherapist-led diversion pathways have resulted in higher patient satisfaction and reduced waiting times (Truter et al., 2024). These models demonstrate the efficacy of structured triage systems in diverse situations. The distinctive aspect of the proposed Hajj framework lies in its adaptation for large populations, emphasizing simplicity, efficiency, multilingual accessibility, and usability by non-specialist providers in resource-constrained environments. The framework is structured to address the specific challenges of the pilgrimage environment while adhering to established international standards.

3.2.2 Implications for Hajj and Proposed Framework

The lack of specific tools shows a key gap and points out the importance of new frameworks. Hajj has very dense crowds, diverse languages, and limited resources. These factors make current tools too complicated, reliant on the internet, or dependent on specialists. We suggest a simpler framework based on ideas from established triage models in this review. This framework includes (1) red-flag screening, (2) symptom-based functional assessment, and (3) stepwise triage into self-management, referrals for physiotherapy, or urgent medical evaluation. This approach is designed for non-specialist frontline providers. It could standardize musculoskeletal care, cut down on unnecessary referrals, and improve efficiency during Hajj. Future studies should test this framework in real-life settings, refine it with actual data, and look at how it might work with digital or AI-driven platforms for broader use. As shown in Figure 2, the proposed musculoskeletal triage framework for Hajj uses a step-by-step, rule-based approach. It starts with red-flag screening to identify urgent conditions that need immediate medical evaluation. If there are no red flags, the next step is symptom and functional assessment. This helps sort cases into one of three categories: (1) self-management with reassurance, (2) referral to a physiotherapy team for guided rehabilitation and management, or (3) escalation for urgent medical care if symptoms are severe, progressive, or unresponsive. The model is designed for quick use by non-specialist providers in resource-limited, high-density settings like the Hajj pilgrimage.

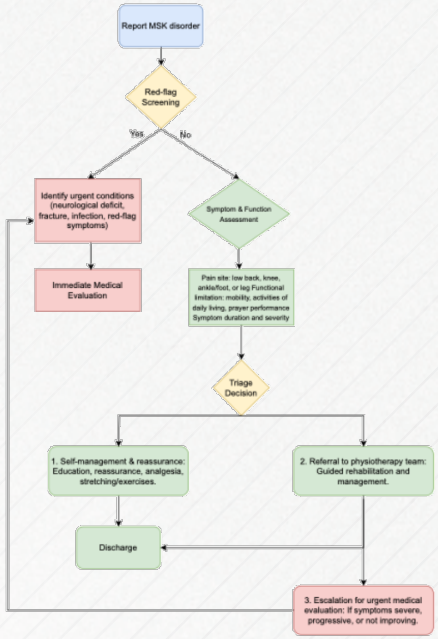


FIGURE 5: PROPOSED MUSCULOSKELETAL TRIAGE FRAMEWORK FOR HAJJ. THE FRAMEWORK BEGINS WITH RED-FLAG SCREENING TO IDENTIFY URGENT CONDITIONS REQUIRING IMMEDIATE EVALUATION. IF NO RED FLAGS ARE PRESENT, SYMPTOM AND FUNCTIONAL ASSESSMENT GUIDES TRIAGE INTO ONE OF THREE CATEGORIES: (1) SELF-MANAGEMENT, (2) REFERRAL TO PHYSIOTHERAPY, OR (3) ESCALATION FOR URGENT CARE. THE MODEL IS INTENDED FOR RAPID USE BY NON-SPECIALIST PROVIDERS IN HIGH-DENSITY, RESOURCE-LIMITED SETTINGS.

3.2.3 Applicability of Reviewed Methods to the Hajj Context

The tools, which were used in the reviewed studies, were typically intended to use in a stable healthcare setting, like an emergency room, primary care setting, or a rehabilitation clinic (Granviken et al., 2025; Lowe et al., 2024; Truter et al., 2024). These models often were based on factors such as long-patient interviews or questionnaires, access to electronic health records and clinician-based assessment. Even though these tools are effective in their respective settings, they face significant challenges when applied in the Hajj. Electronic clinical decision support systems, such as the ones that were piloted in primary care, needed to include a specialist practitioner and have a reliable internet connection, which may not be possible in crowded pilgrimage locations (Abdul Malik Tun et al., 2023; Granviken et al., 2023). Similarly, triage pathways that reduced waiting time in emergency departments necessitate a specialized MSK staff such as a physiotherapist (Dowell et al., 2023; Truter et al., 2024). On the other hand, the frontline staff is more varied and frequently unspecialized during Hajj. Although questionnaire-based techniques, such as the Örebro Musculoskeletal Pain Questionnaire (Gergelé et al., 2021) , can successfully identify risk, they may encounter difficulties because pilgrims may not speak the same language or have low literacy levels. These problems demonstrate why merely transferring current techniques is insufficient. A quick, multilingual, and simplified framework that addresses the unique difficulties of large gatherings is clearly needed.

3.2.4 Limitations of the proposed framework

Despite the framework›s design for use in large crowds, it presents several challenges. First, health beliefs and symptom reporting can vary greatly across different backgrounds. This cultural and linguistic diversity among pilgrims can make standardized assessment difficult. Second, multilingualism remains a challenge. Even with simpler tools, adaptation and translation that respect cultural differences will be necessary for successful use. Third, the framework is intentionally simplified. This could result in either over-triaging minor cases or under-triaging complex ones. Lastly, limited time for training providers, resource availability, and integration with existing health service pathways may restrict its use during the Hajj. These factors emphasize the importance of conducting phased piloting and improvement before broader adoption.

4. Conclusions

This review gathered evidence from eight studies that looked at MSK triage and decision support tools. These included digital CDSS, risk stratification questionnaires, physiotherapy-led pathways, and referral systems. While these tools regularly improved efficiency, patient satisfaction, and appropriate referrals, none were designed for large events like the Hajj pilgrimage, where MSK pain is common. To build on the strengths of existing models, we suggest a simpler framework. This framework includes red-flag screening, functional assessment, and symptom profiling to help guide stepwise triage into self-management, physiotherapy referral, or urgent medical care. Non-specialist providers in resource-limited areas can quickly use it. This framework could help standardize MSK care and cut down on unnecessary referrals during Hajj. Future research should focus on testing and improving this approach in real-world settings to allow for broader and context-specific use.

5. Recommendations

The proposed framework offers a straightforward, rule-based method designed for the specific needs of mass gatherings like Hajj. The next step should be to create a prototype version of the framework, such as a mobile app or web tool, and test its usability with frontline healthcare providers in simulated or small-scale environments. This pilot testing will provide an opportunity for early feedback on its practicality, clarity, and ease of use.

Thereafter, the framework should be tested in the field during Hajj seasons under actual conditions. This will help assess its accuracy, safety, and acceptance among non-specialist staff and patients. Data from these pilots will give the evidence needed for improvements and broader use. In the longer term, digital adaptations could include brief validated tools (like MSK-HQ and the STarT Back Tool) as well as risk factors relevant to pilgrims (including age, obesity, and other health conditions) to enhance accuracy. Adapting the framework into multilingual, offline-compatible formats will be crucial for its success in the Hajj setting. Ultimately, once validated, the framework could form the basis for integration with digital health platforms and might evolve into AI-supported decision-making.

5.1 Digital Application Development and Adoption

A natural progression of this approach is creating a digital application to assist frontline

providers. The application must incorporate essential features: (1) multilingual interfaces for prevalent languages among pilgrims, (2) offline capabilities for regions with restricted internet connectivity, (3) integrated alert systems for critical situations, (4) rapid assessment modules such as mobility evaluations and pain scales, and (5) automated referral pathways guiding patients to appropriate care levels.

5.2 Evaluation and Field Implementation Mechanism

The effectiveness and scalability of the proposed framework should be evaluated. Diagnostic accuracy, appropriateness of referrals, patient safety, efficiency metrics, and patient and provider satisfaction are examples of key performance indicators that could be used. Validated instruments like the Musculoskeletal Health Questionnaire and the STarT Back Screening Tool can be used to evaluate risk stratification and functional outcomes (Hill et al., 2016; Hill et al., 2011). Additional assessment tools, like satisfaction surveys translated into the main languages of pilgrims and real-time referral tracking in electronic health records, can offer invaluable insight into the context of the Hajj. To ensure consistency with Vision 2030 digital health strategies, the Saudi Ministry of Health should manage implementation in partnership with the Hajj Health Command and academic institutions (Al-Kahtani et al., 2022; Alotaibi et al., 2022). A phased approach is recommended, starting with pilot testing in controlled settings, limited deployment during the Hajj with frontline providers, and then broad adoption once safety and feasibility are confirmed.

References

- Abdul Malik Tun, F., Chin Hai, T., Shu Yi, T., Je Yu, S., Hana Salwani Mohd, Z., Anwar, S., Wei Leik, N., Mahmoud, D., Kay, S., Christian David, M., & Chirk Jenn, N. (2023). Evaluation of an electronic clinical decision support system (DeSSBack) to improve low back pain management: a pilot cluster randomized controlled trial. In Family Practice (Vol. 40, pp. 742–752): Oxford University Press (OUP).

- Al-Kahtani, N., Alrawiai, S., Al-Zahrani, B. M., Abumadini, R. A., Aljaffary, A., Hariri, B., Alissa, K., Alakrawi, Z., & Alumran, A. (2022). Digital health transformation in Saudi Arabia: A cross-sectional analysis using Healthcare Information and Management Systems Society'digital health indicators. Digital Health, 8, 20552076221117742.

- Alghamdi, G. A., Alghamdi, F. A., Almatrafi, R. M., Sadis, A. Y., Shabkuny, R. A., Alzahrani, S. A., Alessa, M. Q., Hafiz, W. A., Shabkuny, R., & Alessa, M. Q. (2024). The prevalence of musculoskeletal injuries among pilgrims during the 2023 Hajj season: a cross-sectional study. Cureus, 16(3).

- Alotaibi, A., Saleh, W., Abdulbaqi, A., & Alosaimi, M. (2022). Health research priority agenda for Ministry of Health, Kingdom of Saudi Arabia from 2020 to 2025. Journal of Epidemiology and Global Health, 12(4), 413–429.

- Alshehri, M. A., Alzaidi, J., Alasmari, S., Alfaqeh, A., Arif, M., Alotaiby, S. F., & Alzahrani, H. (2021). The prevalence and factors associated with musculoskeletal pain among pilgrims during the Hajj. Journal of Pain Research, 369–380.

- Babatunde, O. O., Bishop, A., Cottrell, E., Jordan, J. L., Corp, N., Humphries, K., Hadley-Barrows, T., Huntley, A. L., & van der Windt, D. A. (2020). A systematic review and evidence synthesis of non-medical triage, self-referral and direct access services for patients with musculoskeletal pain. PLoS One, 15(7), e0235364.

- Bowen, E., Nayfe, R., Milburn, N., Mayo, H., Reid, M., Fraenkel, L., Weiner, D., Halm, E. A., & Makris, U. E. (2020). Do decision aids benefit patients with chronic musculoskeletal pain? A systematic review. Pain Medicine, 21(5), 951–969.

- Dowell, R. J., Dattani, J., Nagy, M., Al Wadiya, A., Maher, M., & Ashwood, N. (2023). Physiotherapy-Led Musculoskeletal Telephone Triage and Advice Service: A Valid Option for Patients Referred From the Emergency Department. Cureus, 15(2), e34720. https://doi.org/10.7759/cureus.34720

- Fajardo, M. A., Durayb, B., Zhong, H., Trevena, L., Traeger, A., & Bonner, C. (2019). Online decision aids for knee osteoarthritis and low back pain: an environmental scan and evaluation. Medical Decision Making, 39(4), 328–335.

- Farzandipour, M., Nabovati, E., Saeedi, S., & Fakharian, E. (2018). Fuzzy decision support systems to diagnose musculoskeletal disorders: A systematic literature review. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 163, 101–109.

- Gergelé, E., Parent, E., & Gross, D. P. (2021). Accuracy of the Örebro Musculoskeletal Pain Questionnaire and Work Assessment Triage Tool for selecting interventions in workers with spinal conditions. J Back Musculoskelet Rehabil, 34(3), 355–362. https://doi.org/10.3233/bmr-200169

- Granviken, F., Meisingset, I., Bach, K., Bones, A. F., Simpson, M. R., Hill, J. C., van der Windt, D. A., & Vasseljen, O. (2025). Personalised decision support in the management of patients with musculoskeletal pain in primary physiotherapy care: a cluster randomised controlled trial (the SupportPrim project). Pain, 166(5), 1167–1178. https://doi.org/10.1097/j.pain.0000000000003456

- Granviken, F., Meisingset, I., Vasseljen, O., Bach, K., Bones, A. F., & Klevanger, N. E. (2023). Acceptance and use of a clinical decision support system in musculoskeletal pain disorders – the SupportPrim project [Article]. BMC medical informatics and decision making, 23(1), Article 293. https://doi.org/10.1186/s12911-023-02399-7

- Haas, R., Gorelik, A., Busija, L., O'Connor, D., Pearce, C., Mazza, D., & Buchbinder, R. (2023). Prevalence and characteristics of musculoskeletal complaints in primary care: an analysis from the population level and analysis reporting (POLAR) database. BMC primary care, 24(1), 40.

- Hill, J. C., Kang, S., Benedetto, E., Myers, H., Blackburn, S., Smith, S., Dunn, K. M., Hay, E., Rees, J., & Beard, D. (2016). Development and initial cohort validation of the Arthritis Research UK Musculoskeletal Health Questionnaire (MSK-HQ) for use across musculoskeletal care pathways. BMJ Open, 6(8), e012331.

- Hill, J. C., Whitehurst, D. G., Lewis, M., Bryan, S., Dunn, K. M., Foster, N. E., Konstantinou, K., Main, C. J., Mason, E., & Somerville, S. (2011). Comparison of stratified primary care management for low back pain with current best practice (STarT Back): a randomised controlled trial. The Lancet, 378(9802), 1560–1571.

- Lafrance, S., Vincent, R., Demont, A., Charron, M., & Desmeules, F. (2023). Advanced practice physiotherapists can diagnose and triage patients with musculoskeletal disorders while providing effective care: a systematic review. J Physiother, 69(4), 220–231.

- Lowe, C., Atherton, L., Lloyd, P., Waters, A., & Morrissey, D. (2025). Improving Safety, Efficiency, Cost, and Satisfaction Across a Musculoskeletal Pathway Using the Digital Assessment Routing Tool for Triage: Quality Improvement Study. Journal of Medical Internet Research, 27, e67269.

- Lowe, C., Sephton, R., Marsh, W., & Morrissey, D. (2024). Evaluation of a musculoskeletal digital assessment routing tool (DART): crossover noninferiority randomized pilot trial. Jmir Formative Research, 8(1), e56715.

- Morris, J. H., James, R. E., Davey, R., & Waddington, G. (2015). What is orthopaedic triage? A systematic review. Journal of evaluation in clinical practice, 21(1), 128–136.

- PRISMA, P. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA), 2020. In.

- Silverman, A. R., Broome, J. N., Jarvis III, R. C., Plassche, G. C., & Kirschenbaum, I. H. (2020). Using emergency department data to inform specialty strategy: Analyzing the distribution of 13,777 consecutive immediate orthopaedic consults in an Urban community emergency department. JAAOS Global Research & Reviews, 4(2), e20.

- Truter, P., Flanagan, P., Waller, R., Richards, K., Makate, M., Johnstone, A., Bongiascia, L., Spilsbury, K., Cavalheri, V., & Lin, I. (2024). Short waits, happy patients and expert care, moving basic musculoskeletal care from the emergency department to a physiotherapist-led diversion pathway [Article]. EMA - Emergency Medicine Australasia, 36(5), 695–702. https://doi.org/10.1111/1742-6723.14416

- Vedanayagam, M., Buzak, M., Reid, D., & Saywell, N. (2021). Advanced practice physiotherapists are effective in the management of musculoskeletal disorders: a systematic review of systematic reviews. Physiotherapy, 113, 116–130.

أثر أدوات التحول الرقمي والمشاركة المجتمعية على الوعي الغذائي وخدمات الغذاء في مرافق الرعاية الصحية خلال موسم الحج

نور العلوي*، حاتم العمري، نشوى ششة، بسمة رفيع، ملهم فدا، اسراء امام، أحمد مشاط، بيان الشريف، أحمد الصايغ، شروق الهاشمي، أحمد العيسى، تهاني الصاعدي - تجمع مكة المكرمة الصحي

The impact of digital transformation tools and community engagement on nutritional awareness and nutrition services in healthcare facilities during the Hajj season

Nour A. Alalawi*, Hatim Al Omari, Nashwa Shesha, Basmah Rafea, Molham Feda, Esraa Imam, Ahmed Mashat, Bayan Alsharef, Ahmad Saigh, Shrooq Alhashmi, Ahmad Essa and Tahani Alsaedi - Makkah Health Cluster

*Corresponding author: E-mail (NAlalawi@makkahhc.sa)

الملخص

تواجه خدمات الطعام في مرافق الرعاية الصحية طلبًا متزايدً ا خلال موسم الحج، مما يستلزم اتباع مناهج فعّالة وقائمة على الأدلة لضمان جودة وسلامة التغذية ورفاهية الموظفين. قد تُحسّن الأدوات الرقمية والشراكات المجتمعية الالتزام بالمعايير الغذائية وتدعم احتياجات المرضى الخاصة، مثل مرض السيلياك

كما ان انتشار العادات الغذائية الخاطئة لدى الحجاج والازدحام وارتفاع درجة الحرارة يساهم في سوء التغذية لدى الحجاج بالإضافة لذلك فان التوعية والتثقيف الغذائي من خلال برامج التحول الرقمي تساعد في الوصول الى اكبر عدد من الحجاج والمستفيدين بالشراكة مع القطاعات المختلفة, اعتمدت هذه الدراسة تصميمًا شبه تجريبي لتقييم أثر أدوات التحول الرقمي والمشاركة المجتمعية على تحسين الوعي الغذائي ورضا الموظفين في صالات تقديم الطعام في المستشفيات خلال موسم الحج. ; وأدلة غذائية معتمدة، وتوثيقًا يوميًا للأطعمة، وشراكات غير ربحية لدعم مرضى السيلياك . وقد وصلت المبادرة إلى أكثر من 1800 من الكادر الصحي العاملين في مجال الرعاية الصحية، مما أدى إلى تحسين الالتزام بالمعايير الغذائية، وزيادة رضا الموظفين، وتكريم المستشفيات عالية الأداء.

وتدعم النتائج قابلية توسيع نطاق هذا النموذج ليشمل مرافق الرعاية الصحية في منطقة مكة المكرمة. والمرضى المنومين بمنشات تجمع مكة المكرمة الصحي, كما تم الوصول إلى أكثر من ١٢,٤٥٢ حاجًا من خلال تطبيق «المساعد الصحي»، الذي قدّم محتوى توعويًا بلغات متعددة (٢٠٠ لغة) باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي. غطّت التوعية مواضيع مثل الوقاية من الإجهاد الحراري، وأهمية شرب الماء، والتغذية الصحية، والوقاية من التسمم الغذائي. وشمل التدخل مواد تعليمية مُمكّنة برمز الاستجابة السريعة (QR Code)

Abstract

Food services in healthcare facilities face increased demand during the Hajj season, necessitating effective, evidence-based approaches to ensuring nutritional Quality and safety of nutrition and staff well-being. Digital tools and community partnerships can improve adherence to nutritional standards and support the needs of patients with specific conditions, such as celiac disease.

The prevalence of poor eating habits among pilgrims, along with overcrowding and high temperatures, contributes to malnutrition among pilgrims. Furthermore, nutritional awareness and education through digital transformation programs helps reach a larger number of pilgrims and beneficiaries in partnership with various sectors. This study adopted a quasi-experimental design to evaluate the impact of digital transformation tools and community engagement on improving nutritional awareness and staff satisfaction in hospital dining halls during the Hajj season. These tools included validated nutritional guides, daily food documentation, and non-profit partnerships to support celiac patients. The initiative reached more than 1,800 healthcare workers, resulting in improved adherence to nutritional standards, increased staff satisfaction, and recognition of high-performing hospitals.

The results support the scalability of this model to include healthcare facilities in the Makkah region and patients admitted to Makkah Health Cluster facilities. More than 12,452 pilgrims were reached through the «Health Assistant» application, which provided awareness content in multiple languages (200 languages) using artificial intelligence technologies. Awareness covered topics such as preventing

heat stress, the importance of drinking water, healthy nutrition, and preventing food poisoning. The intervention included educational materials enabled by a QR code.

1. المقدمة

الحج فريضة دينية واجبة، وهو من أعظم الشعائر وأقربها إلى قلوب المسلمين. تبذل حكومة المملكة العربية السعودية جهوداً متواصلة لخدمة الحجاج والمعتمرين، وتوفير احتياجاتهم من الغذاء بكميات ونوعيات مناسبة للحفاظ على صحتهم، ووضع حلول علمية وعملية لأي مشاكل طارئة، بما يحقق أمنهم وسلامتهم ورفاهيتهم، ويمكّنهم من أداء مناسكهم براحة وطمأنينة. لذا، ينصب سؤال هذا البحث على ضمان توفير الاحتياجات الغذائية المناسبة لمختلف الحالات الصحية للحجاج، حيث يؤثر سوء التغذية على صحتهم ولياقتهم البدنية، ويؤثر سلباً على أدائهم للمناسك. كما أن سوء ترشيد الغذاء يؤدي إلى فائض هائل من الطعام المتبقي، مما يُسبب تلوثًا بيئيًا وتراكمًا للكائنات الدقيقة وتكاثر الحشرات التي تنقل السموم والأمراض. حمدان 1 (2020)

أبرزت دراسات أُجريت في مصر وسوريا وجنوب أفريقيا والأردن ضرورة التثقيف الغذائي لتحسين الصحة العامة والنظام الغذائي غير المُعالَج (بني ياسين وآخرون، 2023). كما أشارت أبحاث أُجريت على طلاب سوريين وأردنيين إلى أن نقص التغذية غير المُعالَجة يُشكل عائقًا كبيرًا أمام التغذية الصحية (موسايجر وآخرون، 2012). بالإضافة إلى ذلك، يُقدم المسلمون من مختلف البلدان عادات غذائية ومستويات معارف غذائية مُختلفة، وهي أمور بالغة الأهمية لصحتهم ورفاهيتهم قبل وأثناء وبعد أداء عباداتهم. إن فهم تأثير التغذية غير المُعالَجة على صحة وسلامة الزائرين أمرٌ بالغ الأهمية. على سبيل المثال، يُشترط اتباع نظام غذائي مُحدد لمن يُعانون من أمراض مزمنة مثل داء السكري وارتفاع ضغط الدم. يمكن التخفيف من وطأة النشاط البدني والضغوط البيئية المرتبطة بالحج من خلال اتباع نظام غذائي صحي مناسب، مما يساعد على الحفاظ على الصحة ومستويات الطاقة. علاوة على ذلك، يزيد تجمع الحشود الكبيرة من خطر الإصابة بالأمراض المنقولة بالغذاء وانتقال الأمراض المعدية، مما يؤكد على ضرورة وضع استراتيجيات جيدة التخطيط لإدارة المخاطر (مارغلاني وآخرون، 2016). توصي منظمة الصحة العالمية (WHO) الحجاج بالالتزام بالإرشادات الصحية (غسل اليدين بالماء والصابون أو معقم اليدين الكحولي، وخاصة بعد السعال والعطس، وبعد استخدام المرحاض، وقبل تحضير الطعام وتناوله، وبعد لمس الحيوانات. استخدم المناديل عند السعال أو العطس وتخلص منها في سلة المهملات. ارتدِ الكمامات عند التواجد في الأماكن المزدحمة واستبدلها بكمامات جافة عندما تبتل. تجنب الاتصال المباشر مع الأشخاص الذين يبدو عليهم المرض وتجنب مشاركة الأغراض الشخصية. تجنب الاتصال المباشر بالإبل في المزارع أو الأسواق أو الحظائر. تجنب شرب الحليب غير المبستر أو تناول اللحوم النيئة أو المنتجات الحيوانية غير المطبوخة جيدًا. كما توصي بغسل اليدين قبل وبعد تناول الطعام وبعد استخدام الحمام. اغسل الفواكه والخضروات الطازجة جيدًا. خزن الطعام في درجات حرارة آمنة. من المهم طهي الطعام جيدًا وتجنب تناول الأطعمة المطبوخة التي تم كشفها أو تخزينها خارج الثلاجة. كما تنصح منظمة الصحة العالمية الحجاج بتجنب التعرض المباشر لأشعة الشمس وشرب كميات كافية من الماء، وخاصة كبار السن، لتقليل خطر الإجهاد الحراري و ضربة الشمس. كما يُنصح باستشارة الطبيب. علاج ما قبل الحج للحجاج الذين يتناولون أدوية تُفاقم الجفاف، مثل مُدرّات البول. (منظمة الصحة العالمية، ٢٠٢٣)

الدراسات السابقة

أظهرت الدراسات السابقة أن مرضى السيليك واجهوا خلال جائحة كوفيد-19 مجموعة من التحديات أبرزها انخفاض معدلات التشخيص بسبب تعطّل الفحوص والتنظير، وصعوبات الحصول على المنتجات الخالية من الغلوتين نتيجة نقص التوافر وارتفاع الأسعار، وهو ما انعكس سلبًا على التزام المرضى بالنظام الغذائي وزاد من القلق النفسي لديهم (Samasca et al., 2021؛ Stroebele-Benschop et al., 2024). كما بيّنت الأبحاث أن إعداد الطعام في المنزل قلّل من احتمالية التعرّض العرضي للغلوتين، لكنه ترافق مع عزلة اجتماعية وتراجع في جودة الحياة (Kreutz et al., 2023؛ Stroebele-Benschop et al., 2024). من ناحية أخرى، لم تُسجّل زيادة في معدلات الإصابة بالسيليك بعد عدوى كوفيد-19، لكن المرضى المصابين بالسيليك الذين أُصيبوا بالفيروس كانوا أكثر عرضة للاستشفاء مقارنة بغيرهم، ما يعكس هشاشتهم الصحية (Ford et al., 2023؛ Lexner et al., 2023)

وتتقاطع هذه النتائج مع التحديات الخاصة التي يواجهها مرضى السيليك في مناسبات كبرى مثل الحج والعمرة، حيث تشير تقارير ودراسات محلية إلى محدودية توافر الأغذية الخالية من الغلوتين ضمن الوجبات الجماعية، وضعف وعي بعض مقدمي الطعام بمعايير السلامة الغذائية لهذه الفئة. كما تشكّل الكلفة المرتفعة للأغذية المتخصصة وصعوبة تخزينها ونقلها في بيئة مكتظة ومرتفعة الحرارة عقبات إضافية، إلى جانب ما قد يشعر به المرضى من عزلة أو حرج عند رفض الأطعمة المشتركة أو البحث عن بدائل خاصة (دراسات ميدانية مرتبطة بموسم الحج). هذه التحديات تؤكد الحاجة إلى حلول تنظيمية وتوعوية تضمن سلامة المرضى وتمكينهم من أداء المناسك بطمأنينة واندماج كامل

كما أجريت عدة دراسات محلية في المملكة العربية السعودية تناولت مرض السيليك والتحديات الغذائية المرتبطة به. من بين هذه الدراسات، أشارت دراسة الفهيد، العتيبي، الزهراني، والسبيعي (2021) إلى أن 95.8% من مرضى السيليك يتبعون نظامًا غذائيًا خاليًا من الغلوتين، إلا أن 51.8% منهم لا يتلقون متابعة من أخصائيي تغذية، و57.1% لا يتابعون مع أطباء مختصين، بينما أشار 96.4% منهم إلى أن المطاعم لا توفر خيارات خالية من الغلوتين، مما يجعل 86.1% منهم يتجنبون تناول الطعام خارج المنزل. كما أظهرت دراسة القحطاني، الشمري، الغامدي، والعيسى (2020) وجود تفاوت في مستوى الوعي بمرض السيليك بين سكان مدينة الرياض، مما يدل على الحاجة إلى حملات توعية موسعة. وأكدت دراسة السعيد، العتيبي، الزهراني، والقحطاني (2019) أن هناك معرفة عامة بالنظام الغذائي الخالي من الغلوتين بين الجمهور، لكن تطبيقه يختلف بين الأفراد، مما يستدعي تعزيز التثقيف الغذائي. أما الدراسة الحديثة للفهيد، الزهراني، العتيبي، والسبيعي (2023) فقد أبرزت التحديات المتعلقة بتوافر المنتجات الخالية من الغلوتين وارتفاع تكلفتها، بالإضافة إلى قلة الوعي بين مقدمي خدمات الطعام

تُظهر هذه الدراسات المحلية الحاجة الملحة لإجراء أبحاث ميدانية خاصة بموسم الحج والعمرة، حيث تزداد تعقيدات الحصول على غذاء آمن بسبب الزحام وكثرة المشاركين وتنوع الثقافات. تركيز الأبحاث على هذا الجانب قد يسهم في صياغة سياسات غذائية وصحية تستجيب بشكل مباشر لاحتياجات مرضى السيليك خلال هذه المناسبات، ويعزز من شمولية الخدمات الطبية

المقدمة للحجاج والمعتمرين

الأهداف:

الهدف الرئيسي:

تقييم أثر المشاركة المجتمعية على الوعي الغذائي باستخدام برامج التحول الرقمي.

الأهداف الثانوية:

1. الوصول إلى 1000 ممارس صحي بحلول عام 2025، مُلِمّين تمامًا بدليل الغذاء الصحي ودليل السعرات الحرارية، بما يتماشى مع مؤشر وزارة الصحة لمسار الغذاء الصحي بنموذج الرعاية الصحية
2. تدريب الممارسين الصحيين على دليل الغذاء الصحي ودليل السعرات الحرارية والامن الغذائي لنشر الوعي الغذائي بين الحجاج من خلال اتفاقيات المشاركة المجتمعية
3. زيادة رضا الموظفين في قاعات الطعام بمنشآت تجمع مكة الصحي خلال موسم الحج بنسبة 15% مقارنةً بالعام الماضي
4. 4تطبيق وصول مبتكر إلى المحتوى التعليمي من خلال رموز الاستجابة السريعة (QR codes) لتحقيق أقصى قدر من الوصول
5. الاستفادة من الشراكات غير الربحية لتوفير وجبات مناسبة لمرضى السيلياك، بالإضافة إلى التوعية بالأغذية الصحية
6. الاستفادة من الشراكات غير الربحية للحد من الإجهاد الحراري من خلال تغطية احتياج مستشفيات المشاعر ومنشات تجمع مكة المكرمة الصحي بالماء ونشر الوعي بطرق الوقاية من الاجهاد الحراري عبر التطبيق الذكي المساعد الصحي

2. منهجية وطرق البحث

اعتمدت هذه الدراسة تصميماً شبه تجريبيًا (قبل/بعد) لتقييم أثر أدوات التحول الرقمي والمشاركة المجتمعية على الوعي الغذائي ورضا الموظفين في مرافق التجمع الصحي بمكة المكرمة ومستشفيات المشاعر المقدسة خلال موسم الحج. شملت الدراسة ثلاث فئات رئيسية

1. الممارسون الصحيون: بلغ عدد المشاركين في الاستبيانات التدريبية 31 ممارسًا صحيًا، إضافة إلى 1,800 ممارس صحي استفادوا من برامج التوعية والتدريب الميداني في صالات الطعام
2. الحجاج: استفاد أكثر من 12,452 حاجًا من برامج التوعية الغذائية عبر تطبيق «المساعد الصحي».
3. المستفيدون من البرامج المجتمعية: شملت الفئة مرضى السيلياك وغيرهم من الفئات ذات الاحتياجات الغذائية الخاصة

أدوات القياس: استخدمت الدراسة استبيانًا مقننًا يتكون من 16 سؤال لقياس المعرفة الغذائية (السعرات الحرارية، الحصص الغذائية، البروتينات) والوعي بسلامة الغذاء (أسباب التسمم، طرق الوقاية، الأعراض). تم التحقق من صدق وثبات الاستبيان عبر عرضه على ثلاثة خبراء في التغذية والصحة العامة، كما تمت مقارنته باستبيانات مستخدمة في دراسات سابقة مثل موسايجر وآخرون (2012) وبني ياسين وآخرون (2023).

المحاضرات: تم تنظيم 6 محاضرات تدريبية بمتوسط مدة 90 دقيقة لكل محاضرة. ألقى المحاضرات مختصون في التغذية العلاجية وأطباء صحة عامة بمشاركة شركاء مجتمعيين من الجمعيات الصحية غير الربحية. تناولت المحاضرات موضوعات شملت

- النظام الغذائي الصحي والمتوازن.
- الأمن الغذائي وممارسات الوقاية من التسمم الغذائي.
- التغذية في البيئات المزدحمة مثل موسم الحج.
- الاحتياجات الغذائية الخاصة بمرضى السيلياك.

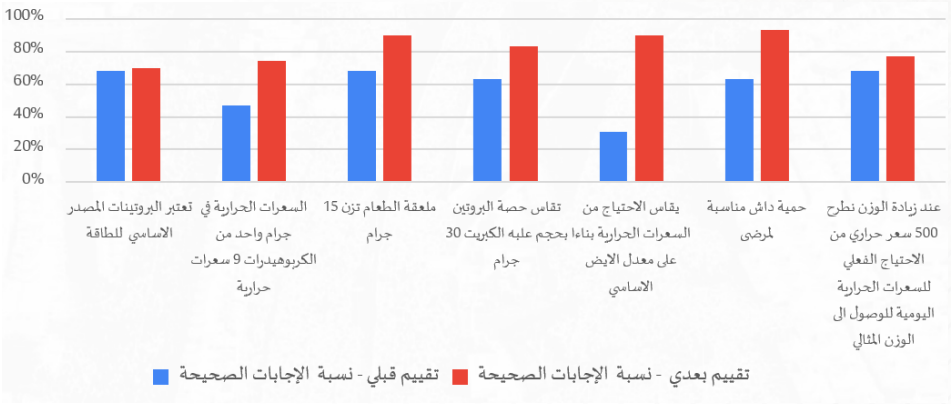
التطبيق الإلكتروني: تمت مراجعة محتوى التطبيق من قبل لجنة علمية متخصصة بالتغذية والأمن الغذائي لضمان دقته وملاءمته ثقافيًا ولغويًا. قدّم التطبيق محتوى توعويًا بأكثر من 200 لغة باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي، واشتمل على مواد تعليمية مدعومة برموز الاستجابة السريعة (QR Code). لم يتم جمع اي بيانات شخصية او صحية من الزوار حيث اقتصر التطبيق على قياس عدد الزيارات بشكل اجمالي فقط دون أي معلومات تعريفية و بناءً على ذلك لم يكن من الضروري الحصول على موافقة لجنة اخلاقيات البحث

التحليلات الإحصائية: تم تحليل البيانات باستخدام برنامج SPSS (الإصدار 26) . شملت التحليلات الإحصاءات الوصفية (المتوسطات والانحراف المعياري).اختبار t للعينات المرتبطة لمقارنة نتائج الاستبيانات القبلية والبعدية. , تحديد مستوى الدلالة الإحصائية عند $p < 0.05$ لاعتبار النتائج ذات دلالة إحصائية. وقد استخدمت هذه التحليلات لاختبار فرضيات الدراسة وتحديد اثر البرامج التدريبية والتطبيق الالكتروني على مستوى الوعي الغذائي ورضا المشاركين

3. النتائج والمناقشة

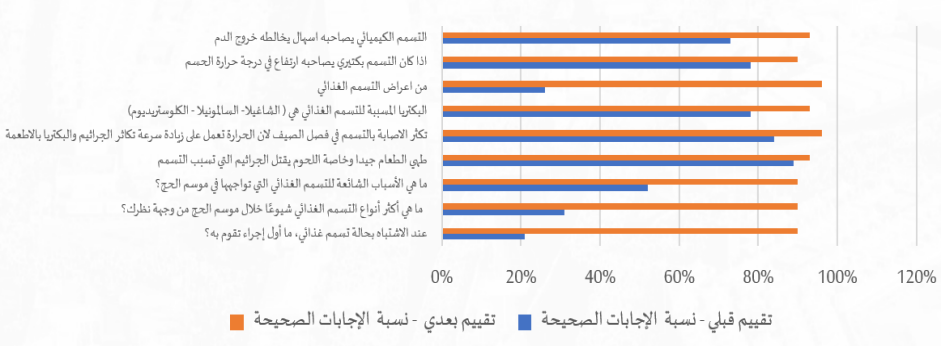
1.3 نتائج التدريب ورفع الوعي الغذائي: أظهرت نتائج استبياني ما قبل وبعد التدريب تحسنًا ملحوظًا في معارف الممارسين الصحيين. وارتفعت نسبة الإجابات الصحيحة المتعلقة بالوعي الغذائي من ٥٨٪ قبل التدريب إلى ٨٢٪ بعد التدريب (الجدول ا والرسم البياني ا)، أي بزيادة قدرها ٣٠٪.

الرسم البياني (1) أثر التدريب على زيادة نسبة الوعي الغذائي لدى الممارسين الصحيين



جدول (1) أسئلة استبيان قياس اثر التدريب والتعليم على الوعي الغذائي باستخدام برامج التحول الرقمي وبرامج المشاركة المجتمعية	تقييم قبلي				تقييم بعدي				قيمة p
	إجابات صحيحة	إجابات خاطئة	العدد الكلي للاجبات	نسبة عدد الإجابات الصحيحة	إجابات صحيحة	إجابات خاطئة	العدد الكلي للاجبات	نسبة عدد الإجابات الصحيحة	
تعتبر البروتينات المصدر الاساسي للطاقة	13	6	19	68%	22	9	31	70%	p = 0.42
السعرات الحرارية في جرام واحد من الكربوهيدرات 9 سعرات حرارية	9	10	19	47%	23	8	31	74%	p < 0.01*
ملعقة الطعام تزن 15 جرام	13	6	19	68%	28	3	31	90%	p < 0.001*
تقاس حصة البروتين بحجم علبه الكبريت 30 جرام	12	7	19	63%	26	5	31	83%	p < 0.01*
يقاس الاحتياج من السعرات الحرارية بناءا على معدل الايض الاساسي	6	13	19	31%	28	3	31	90%	p < 0.001*
حمية داش مناسبة لمرضى	12	7	19	63%	29	2	31	93%	p < 0.001*
عند زيادة الوزن نطرح 500 سعر حراري من الاحتياج الفعلي للسعرات الحرارية اليومية للوصول الى الوزن المثالي	13	6	19	68%	24	7	31	77%	p = 0.18
المجموع	78	55	133	58%	180	37	217	%82	**p < 0.001***

الرسم البياني (2) أثر التدريب على زيادة الوعي بالتسمم الغذائي لدى الممارسين الصحيين



كما ارتفعت نسبة الإجابات الصحيحة المتعلقة بالتوعية بالتسمم الغذائي من 59% قبل التدريب إلى 92% بعده، بزيادة قدرها 36% (الجدول 2والرسم البياني 2). وتشير هذه النتائج إلى أن برامج التدريب القائمة على المشاركة المجتمعية والتحول الرقمي ساهمت في تعزيز وعي الممارسين الصحيين بقضايا التغذية الصحية والأمن الغذائي

وتتفق هذه النتيجة مع ما ذكره موساجر وآخرون (2012) بشأن أهمية التثقيف الغذائي في تحسين السلوكيات الغذائية بين الفئات المستهدفة

جدول (2) أسئلة استبيان قياس اثر التدريب والتعليم على الوعي بالتسمم الغذائي باستخدام برامج التحول الرقمي وبرامج المشاركة المجتمعية	تقييم قبلي				تقييم بعدي				قيمة p
	إجابات صحيحة	إجابات خاطئة	العدد الكلي للاجبات	نسبة عدد الإجابات الصحيحة	إجابات صحيحة	إجابات خاطئة	العدد الكلي للاجبات	نسبة عدد الإجابات الصحيحة	
عند الاشتباه بحالة تسمم غذائي، ما أول إجراء تقوم به؟	4	15	19	21%	28	3	31	90%	p < 0.001*
ما هي أكثر أنواع التسمم الغذائي شيوعًا خلال موسم الحج من وجهة نظرك؟	6	13	19	31%	28	3	31	90%	p < 0.001*
ما هي الأسباب الشائعة للتسمم الغذائي التي تواجهها في موسم الحج؟	10	9	19	52%	28	3	31	90%	p < 0.01*
طبي الطعام جيدا وخاصة اللحوم يقتل الجراثيم التي تسبب التسمم	17	2	19	89%	29	2	31	93%	p = 0.27
تكثر الاصابة بالتسمم في فصل الصيف لان الحرارة تعمل على زيادة سرعة تكاثر الجراثيم والبكتريا بالأطعمة	16	3	19	84%	30	1	31	96%	p < 0.05*
البكتريا المسببة للتسمم الغذائي هي (الشاغيلا- السالمونيلا - الكلوستريديوم)	15	4	19	78%	29	2	31	93%	p < 0.05*
اعراض التسمم الغذائي	5	14	19	26%	30	1	31	96%	p < 0.001*
اذا كان التسمم بكتيري يصاحبه ارتفاع في درجة حرارة الجسم	15	4	19	78%	28	3	31	90%	p < 0.05*
التسمم الكيميائي يصاحبه اسهال يخالطه خروج الدم	14	5	19	73%	29	2	31	93%	p < 0.001*
المجموع	102	69	171	%59	258	20	279	% 92	**p < 0.001***

2.3 نتائج التوعية المجتمعية للحجاج: تم الوصول إلى أكثر من ١٢,٤٥٢ حاجًا من خلال تطبيق «المساعد الصحي»، الذي قدّم محتوى توعويًا بلغات متعددة (٢٠ لغة) باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي. غطّت التوعية مواضيع مثل الوقاية من الإجهاد الحراري، وأهمية شرب الماء، والتغذية الصحية، والوقاية من التسمم الغذائي. كما تم توفير المياه لأكثر من ١,٨٣٦,٠٠٠ حاج في منشآت التجمع الصحي بمكة المكرمة، ومستشفيات المشاعر المقدسة، والمناطق المزدحمة. مما يُبرز فعالية برامج التحول الرقمي والمشاركة المجتمعية في إيصال الرسائل الصحية للحجاج من مختلف الثقافات.

3.3 نتائج مرض السيلياك: في إطار الأهداف الموضوعة للدراسة والمتعلقة بدعم مرضى السيلياك، تم تخصيص جانب من برامج المشاركة المجتمعية والتحول الرقمي لتقديم وجبات خالية من الجلوتين وضمان وصولها إلى المستفيدين. وقد استفاد من هذه المبادرة ما يزيد عن 420 مريضًا مشخصين بالسيلياك كانوا ضمن الحجاج أو العاملين الصحيين في مرافق التجمع الصحي بمكة المكرمة

توفير الوجبات ودور الشراكات: تم إعداد وتوزيع أكثر من 500 وجبة غذائية خالية من الجلوتين بالتعاون مع جمعيات غير ربحية متخصصة في دعم مرضى السيلياك. وقد روعي في تصميم هذه الوجبات التنوع الغذائي وسلامة مكونات الطعام بما يتوافق مع الدلائل الإرشادية

العالميـة لتغذيـة مرضـى السـيلياك. كمـا تضمنـت المبـادرة آليـة خاصـة لوضـع علامـات واضحـة علـى عبـوات الطعـام تحمـل رمـز الاسـتجابة السـريعة (QR Code) يتيـح للمريـض التعـرف علـى المكونـات الغذائيـة والتحقـق مـن خلوهـا مـن الجلوتيـن

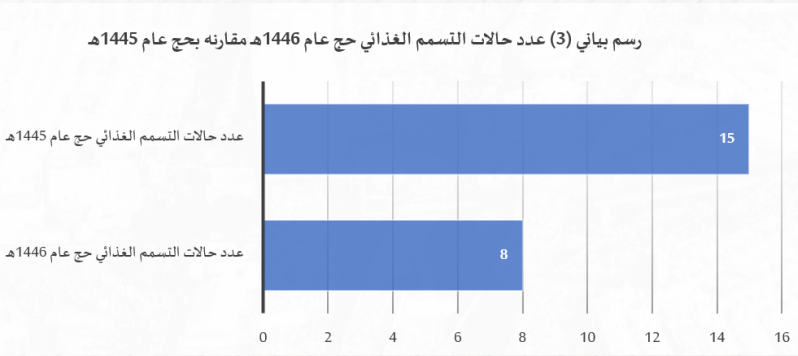
رضـا المرضـى والممارسـين الصحييـن: أظهـرت اسـتطلاعات الـرأي أن 87% مـن مرضـى السـيلياك عبـروا عـن رضاهـم عـن جـودة وتنـوع الوجبـات المقدمـة، كمـا أشـار 78% مـن الممارسـين الصحييـن الذيـن تعاملـوا مـع هـذه الفئـة مـن المرضـى إلـى أن المبـادرة حسّـنت مـن قدرتهـم علـى تقديـم المشـورة الغذائيـة والتعامـل مـع احتياجـات المرضـى الغذائيـة الخاصـة

أثـر المبـادرة علـى الوعـي الغذائـي: انعكـس هـذا التدخـل بشـكل إيجابـي علـى وعـي الممارسـين الصحييـن؛ إذ ارتفعـت نسـبة المعرفـة المتعلقـة بالتعامـل مـع مرضـى السـيلياك مـن 45% قبـل التدريـب إلـى 85% بعـد التدريـب (p<0.01). ويشـير ذلـك إلـى أن إدمـاج محتـوى خـاص بمـرض السـيلياك ضمـن برامـج التثقيـف والتطبيـق الإلكترونـي يعـزز بشـكل كبيـر مـن كفـاءة مقدمـي الرعايـة الصحيـة فـي الاسـتجابة للاحتياجـات الغذائيـة للفئـات الأكثـر هشاشـة

دلالات النتائـج: تؤكـد هـذه النتائـج أن إدمـاج مرضـى السـيلياك فـي برامـج التثقيـف والتدخـلات الرقميـة ليـس فقـط ضـرورة إنسـانية وصحيـة، بـل يسـهم أيضًـا فـي رفـع كفـاءة الممارسـين الصحييـن ويحـد مـن المخاطـر الغذائيـة التـي قـد يتعـرض لهـا الحجـاج. كمـا تدعـم النتائـج توصيـة الدراسـة بضـرورة توسـيع نطـاق هـذه المبـادرات لتشـمل جميـع مرافـق الرعايـة الصحيـة فـي منطقـة مكـة المكرمـة، بمـا يضمـن اسـتدامة الخدمـات الغذائيـة الآمنـة والملائمـة لمرضـى السـيلياك فـي مواسـم الحـج المسـتقبلية

4.3 نتائـج سلامـة الغـذاء: سـاهمت برامـج التوعيـة والوقايـة، إلـى جانـب التحـول الرقمـي، فـي انخفـاض حـالات التسـمم الغذائـي بنسـبة ٤٦.٧٪ خـلال موسـم حـج ١٤٤٦هـ مقارنـةً بالموسـم السـابق.1445هـ حيـث كان عـدد حـالات التسـمم بموسـم حـج 1445هـ 15 حالـة تسـمم غذائـي انخفضـت الـى عـدد (8) حـالات تسـمم غذائـي فـي عـام 1446هـ الجـدول 3، الرسـم البيانـي 3 تدعـم هـذه النتيجـة أهميـة برامـج التحـول الرقمـي والتدريـب الميدانـي، إلـى جانـب التثقيـف الصحـي، لضمـان سلامـة الغـذاء. وهـذا يتوافـق مـع توصيـة منظمـة الصحـة العالميـة (٢٠٢٣) بتعزيـز ممارسـات سلامـة الغـذاء فـي البيئـات المزدحمـة

رسم بياني (3) عدد حالات التسمم الغذائي حج عام 1446هـ مقارنه بحج عام 1445هـ



جدول (3) نسبة الإصابة بالتسمم الغذائي بموسم الحج 1446هـ مقارنة بموسم حج 1445هـ

عدد حالات التسمم الغذائي حج عام 1445هـ	عدد حالات التسمم الغذائي حج عام 1446هـ	نسبة الانخفاض
15	8	%46.67

5.3 النتائـج المتعلقـة برضـا الموظفيـن: أظهـرت اسـتطلاعات رضـا الموظفيـن ارتفـاع معـدلات رضـا الموظفيـن فـي قاعـات الطعـام إلـى ٩٤.٦٪ خـلال موسـم حـج ١٤٤٦هـ.. ويعـزى ذلـك إلـى تطبيـق معاييـر الغـذاء الصحـي (السـعرات الحراريـة لـكل وجبـة، وقائمـة طعـام صحيـة حسـب الحالـة الغذائيـة، وتوعيـة مرضـى الاضطرابـات الهضميـة، والوعـي بالأطبـاق الصحيـة، والوعـي بخيـارات الطعـام الصحـي ودليـل السـعرات الحراريـة، والوعـي بإجـراءات سلامـة الغـذاء، وتوفيـر وجبـات صحيـة ومغذيـة (٥٠ ألـف وجبـة لمرافقيـن المرضـى الحجـاج والحجـاج فـي المشـاعر المقدسـة و٢٠٠٠ وجبـة صحيـة لفـرق الإسـعاف) مـن خـلال برامـج المشـاركة المجتمعيـة. وقـد سـاهم إدخـال عنصـر تنافسـي إيجابـي مـن خـلال تكريـم المستشـفيات الأكثـر التزامًـا بالمعاييـر الغذائيـة (مثـل مستشـفى جبـل الرحمـة ومستشـفى الـولادة والأطفـال) فـي زيـادة رضـا المسـتفيدين

6.3 مناقشـة عامـة: تشـير نتائـج هـذه الدراسـة إلـى أن دمـج أدوات التحـول الرقمـي مـع المشـاركة المجتمعيـة أدى إلـى تحسـين ملحـوظ فـي وعـي الممارسـين الصحييـن بقضايـا التغذيـة والأمـن الغذائـي، بالإضافـة إلـى تعزيـز وعـي الحجـاج ورضـا العامليـن فـي مرافـق الطعـام خـلال موسـم الحـج

لماذا تحسّن وعي الممارسين؟

يمكـن تفسـير التحسـن الكبيـر فـي وعـي الممارسـين الصحييـن (مـن 58% قبـل التدريـب إلـى 82% بعـد التدريـب) بعـدة عوامـل رئيسـية

1. البرامـج التدريبيـة المكثفـة: قدمـت المحاضـرات معلومـات عمليـة مدعومـة بأمثلـة واقعيـة مـن بيئـة الحـج، ممـا سـاعد علـى تحويـل المعرفـة النظريـة إلـى ممارسـات عمليـة

2. التثقيـف متعـدد القنـوات: الجمـع بيـن المحاضـرات المباشـرة والمـواد الرقميـة التفاعليـة (QR codes، تطبيـق المسـاعد الصحـي) عـزز مـن ترسـيخ المعلومـات وسـهّل عمليـة التعلـم الذاتـي المسـتمر

3. الشـراكات المجتمعيـة: وفـرت الجمعيـات الصحيـة غيـر الربحيـة دعمـاً إضافيـاً مـن خـلال توفيـر مـواد تعليميـة ووجبـات مخصصـة لمرضـى السـيلياك، ممـا جعـل الممارسـين أكثـر إدراكًـا لاحتياجـات هـذه الفئـة.

أثر البرامج الرقمية مقارنة بالتدخلات التقليدية

البرامـج الرقميـة (مثـل تطبيـق «المسـاعد الصحـي» والمحتـوى المترجـم إلـى 200 لغـة) كان لهـا أثـر متميـز مقارنـة بالتـدخلات التقليديـة للأسـباب التاليـة

• الوصـول إلـى أعـداد أكبـر: اسـتفاد أكثـر مـن 12,452 حاجًـا مـن الرسـائل التوعويـة الرقميـة، وهـو رقـم يصعـب تحقيقـه عبـر المحاضـرات التقليديـة فقـط

• التكيـف مـع التعـدد اللغـوي: إتاحـة المحتـوى بلغـات متعـددة مكّـن مـن الوصـول إلـى شـرائح واسـعة

من الحجاج الذين يختلفون في خلفياتهم الثقافية واللغوية، وهو ما يصعب تحقيقه عبر المحاضرات المباشرة

• الاستدامة وسهولة التتبع: ساعدت التقنيات الرقمية على توثيق التفاعل (زيارات الصفحة، استخدام رموز (QR)، مما يتيح متابعة دقيقة لمدى فعالية البرنامج بمرور الوقت، بينما تفتقر التدخلات التقليدية إلى آليات التتبع الكمي

• المرونة: مكّنت الحلول الرقمية الحجاج من الوصول إلى المعلومات في أي وقت ومكان، بعكس المحاضرات التي ترتبط بزمان ومكان محددين

العلاقة بالدراسات السابقة

تتسق نتائج هذه الدراسة مع ما توصلت إليه الأبحاث السابقة:

• بني ياسين وآخرون (2023): شددوا على أن التثقيف الغذائي هو أداة فعالة لتحسين السلوكيات الغذائية، وهو ما ظهر بوضوح في تحسن معرفة الممارسين والحجاج في هذه الدراسة.

• موسايجر وآخرون (2012): أشاروا إلى أن نقص الوعي بالتغذية الصحية يشكل عائقًا أمام تحسين الأنماط الغذائية، والدراسة الحالية أثبتت أن التدخلات التدريبية الرقمية قادرة على تجاوز هذا العائق

منظمة الصحة العالمية (2023): أوصت بإجراءات وقائية مثل غسل اليدين، الطهي الجيد، وتجنب التعرض المباشر للشمس، وقد تم تضمين هذه التوصيات في محتوى التطبيق والمحاضرات، مما عزز من الوعي الغذائي ووعي السلامة الصحية

يتضح من هذه النتائج أن الجمع بين التدخلات الرقمية والمشاركة المجتمعية يمثل نموذجًا أكثر فاعلية واستدامة مقارنة بالطرق التقليدية وحدها. هذا النموذج لم يسهم فقط في رفع مستوى وعي الممارسين والحجاج، بل عزز أيضًا من رضا الموظفين وعليه، يمكن اعتبار هذا النهج قاعدة لتوسيع نطاق البرامج المستقبلية على مستوى المملكة العربية السعودية

4. الخلاصة

يمكن أن تعزز الابتكارات الرقمية والمشاركة المجتمعية بشكل كبير التعليم المرتبط بالرعاية الصحية .فقد تجاوز البحث أهدافه في الوعي والرضا وجودة الخدمة.

كما تقدم هذه الأبحاث نموذجًا قابلًا للتوسع والاستدامة في حملات الرعاية الصحية المستقبلية، لا سيما في المواسم المحدودة الوقت مثل الحج

إجراء المزيد من الأبحاث في مجال التغذية والتحول الرقمي خلال موسم الحج.

5. التوصيات

1. توسيع نطاق الدراسة لتشمل جميع المستفيدين من مرضى أقسام التنويم والحجاج والموظفين في المنشآت الصحية بمنطقة مكة المكرمة، ولاحقًا على مستوى المملكة العربية السعودية

2. ابرام المزيد من اتفاقيات المشاركة المجتمعية في برامج الاستثمار الاجتماعي لإعداد قوائم وصفات لوجبات صحية بعدة لغات تناسب جنسية الحجاج وحالتهم الصحية وعاداتهم الغذائية، وإتاحتها لمؤسسات الطوافة وشركات الاعاشة وتحفيزهم على تطبيقها.

3. ترجمة المواد العلمية المتعلقة بالغذاء الصحي إلى عدة لغات، وتحديد جميع الموظفين المصابين بمرض السيلياك، وتوفير وجبات صحية لهم من خلال برامج المشاركة المجتمعية ورفع الوعي الغذائي لديهم

4. تدريب الممارسين الصحيين بمنشآت تجمع مكة المكرمة الصحي وتأهيلهم ليكونوا مدربين معتمدين لمرض السيلياك بالتعاون مع القطاعات الصحية المختلفة ذات العلاقة عبر اتفاقيات المشاركة المجتمعية

المراجع

- Ford, A., Platt, S., Taylor, J., et al. (2023) 'Increased Risk of Hospitalization in Celiac Disease With COVID-19—Outcomes From a Large Matched Cohort Study', Clinical Gastroenterology and Hepatology.

- Kreutz, J.M., van der Laan, H., Geraedts, M., et al. (2023) 'Celiac Disease and the Gluten Free Diet during the COVID-19 Pandemic', International Journal of Environmental Research and Public Health, 59(3), p. 425.

- Lexner, J., Sundström, K., Holmberg, A-S., et al. (2023) 'The risk for celiac disease after COVID-19 infection', BMC Gastroenterology, 23, p. 96.

- Marglani, O. A., Alherabi, A. Z., Herzallah, I. R., Saati, F. A., Tantawy, E. A., Alandejani, T. A., Faidah, H. S., Bawazeer,N. A., Marghalani, A. A., & Madani, T. A. (2016). Acute rhinosinusitis during Hajj season 2014: Prevalence of bacterial infection and patterns of antimicrobial susceptibility. Travel Medicine and Infectious Disease, 14(6), 583–587.

- Musaiger, A. O., Al-Mannai, M., Tayyem, R., Al-Lalla, O., Ali, E. Y., Kalam, F., Benhamed, M. M., Saghir, S., Halahleh, I., & Djoudi, Z. (2012). Prevalence of overweight and obesity among adolescents in seven Arab countries: A cross-cultural study. Journal of Obesity, 2012. https://www.hindawi.com/journals/jobe/2012/981390/abs/

- Samah M. S. Hamdan1,* and Saja A. Albliwi2 (2020) Food Management During Hajj Using Lean Methodology to Fulfill The Pilgrims' and Umrah Performers' Food Needs, Rationalize Consumption and Preserve the Environment. DOI: http://dx.doi.org/10.21786/bbrc/13.3/70

- Samasca, G., Munteanu, O., Despot, V., et al. (2021) 'Celiac Disease in the COVID-19 Pandemic', Children (Basel), 8(1), p. 44.

- Stroebele-Benschop, N., Dönges, N., Vohls, P., et al. (2024) 'Life Challenges and Quality of Life of People Living With Coeliac Disease During COVID-19 Pandemic', Frontiers in Psychology.

- World Health Organization 27 June 2023 - (General health advice and guidance for pilgrims) https://www.emro.who.int/ar/media/news/general-health-advice-and-guidelines-for-pilgrims.html

- Al-Fuhaid, F., Al-Otaibi, S. M., Al-Zahrani, A. S., & Al-Subaie, N. A. (2021). Dietary challenges in adults with celiac disease in Saudi Arabia. International Journal of Celiac Disease, 11(1), 12-23.https://pubs.sciepub.com/ijcd/11/1/2/index.html

- Al-Qahtani, K. A., Al-Shammari, F. R., Al-Ghamdi, M. S., & Al-Issa, H. A. (2020). Knowledge and awareness of celiac disease among the population of Riyadh, Saudi Arabia. Cureus, 12(5), e220351. https://www.cureus.com/articles/220351-knowledge-and-attitude-of-celiac-disease-among-the-population-of-riyadh-saudi-arabia

- Al-Saeed, A., Al-Otaibi, N., Al-Zahrani, F., & Al-Qahtani, S. (2019). Public awareness of gluten-free diet in Saudi Arabia. Nutrition & Health Journal, 7(2), 45-53. https://revista.nutricion.org/index.php/ncdh/article/view/426

- Al-Fuhaid, F., Al-Zahrani, A., Al-Otaibi, S., & Al-Subaie, N. (2023). Recent perspectives on dietary management of celiac disease in Saudi adults. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/373765887_Dietary_Challenges_in_Adults_with_Celiac_Disease_in_Saudi_Arabia:

تحليل عوامل الخطر المسببة للإجهاد الحراري على طرق المشاة الرئيسية بالمشاعر المقدسة وكيفية الحد من مخاطرها

فتحي شعبان*، عبد الله باقاسي، ماجد بامقا ، إبراهيم فلاته، عبد الرحمن حضرمي - معهد خادم الحرمين الشريفين لأبحاث الحج والعمرة - جامعة أم القرى

Analysis of risk factors causing heat stress on main pedestrian roads in the Holy Sites and how to reduce their hazards

Fathy Shaaban*, Abdullah Baqasi, Majid Bamqa, Ebrahim Fallatah & Abdul Rahman Hadrami - The Custodian of Two Holy Mosques Institute for Hajj and Umrah Research - Umm Al Qura University

Corresponding author: E-mail (: ffshaaban@hotmail.com)*

الملخص

يعد موسم الحج من أكبر التجمعات البشرية السنوية في العالم، حيث يجتمع ملايين المسلمين من مختلف دول العالم لأداء المناسك في بيئة صحراوية حارة قد تتجاوز درجات الحرارة فيها 45 درجة مئوية. وتُعَدّ الظروف المناخية القاسية أحد أكبر التحديات الصحية، حيث يؤدي ارتفاع الحرارة والرطوبة إلى تعرض الحجاج لخطر الإجهاد الحراري بمختلف أنواعه، بدءً ا من الإنهاك الحراري وحتى ضربة الشمس

تهدف الدراسة الى تحديد المسببات الرئيسية لحدوث الإجهاد الحراري للحجاج والحد من مخاطرها خلال رحلتهم في المشاعر المقدسة. وتقييم النقاط الحرجة على طرق المشاة الرئيسية والمشاعر المقدسة والتي تؤدي للإصابة بالإجهاد الحراري ومنها: المشي لمسافات طويلة، عدم توفر الخدمات اللازمة للحجاج على طرق المشاة، التعرض لدرجات الحرارة المرتفعة، التعرض لأشعة الشمس، الأمراض المزمنة والتقدم في العمر، عدم شرب السوائل الكافية، فقد الرعاية الطبية خلال رحلة المشاعر المقدسة

تم اشتقاق بيانات متوسط درجة حرارة السطح (LST) ، درجة حرارة الهواء الجوي، الرطوبة النسبية وكذلك معدل الاجهاد الحراري خلال يومي 15و16 يونيو عام 2024م (9 & 10 ذي الحجة 1445 هـ) لمنطقة الدراسة من الساعة 12ظهراً إلى 4 عصراً من بيانات المرئيات الفضائية وقد تبين أن أقصي درجة حرارة السطح لمنطقة الدراسة بلغت 72.77درجة وتظهر الطرق التي افترشها الحجاج يوم عرفات اقصى قيمه لدرجات حرارة السطح والتي كان لها تأثير بشكل فعال على ارتفاع درجة حرارتهم واصابتهم بالإجهاد الحراري. كذلك بلغت أقصي درجة حرارة للهواء الجوي 49.93 درجة. والرطوبة النسبية حققت 45.4% وهذه القيم ساعدت على الإحساس المرتفع بدرجات الحرارة. بلغ الإجهاد الحراري بمنطقة الدراسة إلي 51.55 درجة. وتصنف هذه القيمة في مؤشر الاجهاد الحراري بالخطر الشديد، والاحتمال كبير لتعرض الحاج لضربة شمس والاجهاد الحراري، وخاصةً عند المشي تحت اشعة الشمس المباشرة.

تم قياس درجات الحرارة داخل المخيمات (اماكن اقامة الحجيج) التي اظهرت قيما مرتفعة نسبيا تراوحت ما بين 36 – 39 درجة مئوية نتيجة لعدم قدرة المكيفات على خفض درجات الحرارة الداخلية لأسباب عدة منها وجود فتحات في جدران المخيم، فتح وغلق المدخل مرات عديدة ، جدران المخيم رقيق وليس عازل حراري عن البيئة، كذلك تفاوتت درجات الحرارة في ممرات المخيمات والمناطق المفتوحة بها بين 39 – 42.5 درجة مئوية وترجع القيم المنخفضة الى استخدام تلك المخيمات الرشاشات والمراوح الرذاذية ايضا في الممرات والساحات المفتوحة. بينما اظهرت الرطوبة النسبية قيما متوسطة في جميع المخيمات تراوحت قيمتها ما بين 22% - 31% . بينما اظهرت قيم الرطوبة النسبية في الممرات والمساحات الخارجة في المخيمات ارتفاعا نسبيا تراوح بين 33% - 45% نتيجة استعمال الرشاشات والمراوح الرذاذية. وتم تعيين قيم الاجهاد الحراري داخ المخيمات والتي بلغت 38 درجة مئوية وكذلك في ممرات المخيمات حيث حققت 51 درجة مئوية. تم تكرار عمليات تقييم الاجهاد الحراري من بيانات الأقمار الصناعية وداخل المخيمات في موسم حج 1446 (خلال يومي 9، 10 ذي الحجة) والتي أظهرت انخفاضا ملحوظا في كل القيم وصل الى 10 درجات تقريبا، مما ادي الي انخفاض معدل الإصابات بالاجهاد الحراري. ومن الأسباب الرئيسية التي أدت الى انخفاض معدلات الاصابة بالاجهاد الحراري هو التشديد الأمني على الحج المخالف والغير نظامي وانعدامه تقريبا هذا الموسم كذلك توفر الخدمات الطبية وسهولة التنقل في المشاعر نتيجة لعدم افتراش المخالفين.

Abstract

The Hajj season is one of the largest annual human gatherings in the world, bringing together millions of Muslims from around the world to perform the rituals in a hot desert environment where temperatures can exceed 45 degrees Celsius. Harsh climatic conditions are one of the biggest health challenges, as high

1. المقدمة

يمثـل الإجهـاد الحـراري تحديًـا بيئيًـا وصحيًـا متزايـدً ا يتطلـب فهمًـا عميقًـا واسـتراتيجيات متعـددة للتعامـل معـه. ومـن الضـروري تعزيـز البحـث العلمـي فـي هـذا المجـال وتطبيـق تقنيـات جديـدة للوقايـة والتكيـف، سـواء علـى مسـتوى الأفـراد أو المجتمعـات أو النظـم البيئيـة. يُعـدّ الإجهـاد الحـراري أحـد أبـرز التحديـات البيئيـة التـي تواجـه الكائنـات الحيـة فـي ظـل التغيـرات المناخيـة المتسـارعة. ويشـير إلـى الحالـة الفسـيولوجية التـي تحـدث عندمـا يتعـرض الكائـن الحـي، سـواء كان إنسـانًا أو حيوانًـا أو نباتًـا، إلـى درجـات حـرارة مرتفعـة تفـوق قـدرة الجسـم علـى التكيـف، ممـا يـؤدي إلـى اضطرابـات صحيـة أو بيولوجيـة.

يعـد موسـم الحـج مـن أكبـر التجمعـات البشـرية السـنوية فـي العالـم، حيـث يجتمـع ملاييـن المسـلمين مـن مختلـف دول العالـم لأداء المناسـك فـي بيئـة صحراويـة حـارة قـد تتجـاوز درجـات الحـرارة فيهـا 45 درجـة مئويـة. وتُعَـدّ الظـروف المناخيـة القاسـية أحـد أكبـر التحديـات الصحيـة، حيـث يـؤدي ارتفـاع الحـرارة والرطوبـة إلـى تعـرض الحجـاج لخطـر الإجهـاد الحـراري بمختلـف أنواعـه، بـدءً ا مـن الإنهـاك الحـراري وحتـى ضربـة الشـمس

مفهوم الإجهاد الحراري

الإجهـاد الحـراري هـو حالـة طبيـة تحـدث عندمـا يفشـل الجسـم فـي تنظيـم درجـة حرارتـه الداخليـة نتيجـة التعـرض المطـول لحـرارة مرتفعـة، خاصـةً عنـد القيـام بمجهـود بدنـي مثـل المشـي لمسـافات طويلـة، أو الوقـوف لفتـرات طويلـة كمـا يحـدث أثنـاء أداء المناسـك مثـل الطـواف والسـعي ورمـي الجمـرات

يعـرف الإجهـاد الحـراري بأنـه حالـة مـن الإجهـاد الفسـيولوجي والنفسـي نتيجـة تعـرض الجسـم لحـرارة زائـدة لا يسـتطيع التخلـص منهـا بوسـائل التبريـد الطبيعيـة مثـل التعـرق أو التنفـس. وتكمـن خطورتـه فـي التأثيـر المباشـر علـى الوظائـف الحيويـة، مثـل تنظيـم درجـة الحـرارة، وتـوازن المـاء والأمـلاح، ووظائـف الأعضـاء المختلفـة (Sawka et al., 2011)

- آثار الإجهاد الحراري على الإنسان:
- زيادة معدل ضربات القلب والتنفس
- فقدان السوائل من خلال التعرق
- انخفاض ضغط الدم
- الإرهاق الحراري وضربة الشمس
- ضعف الأداء العقلي والبدني (Epstein & Moran, 2006)

يحصـل الشـعور بعـدم الراحـة الحراريـة عندمـا لا يتمكـن الشـخص مـن التخلـص مـن الطاقـة الحراريـة الزائـدة المتولـدة بصـورة مسـتمرة داخـل جسـمه، والناتجـة عـن عمليـات الأيـض الغذائـي، بالإضافـة إلـى الأجـواء المحيطـة بـه، وهـذا يـؤدي الـى حصـول جسـم الانسـان علـى ضغـط حـراري داخلـي يمكـن أن يسـبب لـه مشـاكل صحيـة فـي حالـة المكـوث فـي نفـس المكـان لفتـرة طويلـة، مـع العلـم أن المحافظـة علـى درجـة الحـرارة الجسـم بـ 37°م، محققـة التـوازن الحـراري، فـي حيـن تكـون درجـة حـرارة الجلـد 31-34°م. وفـي دراسـة قـام بهـا (Hadad and Ajian, 1988) مـن الأرصـاد السـعودية، أفـاد بوجـود علاقـة بيـن ارتفـاع عـدد الوفيـات بسـبب ارتفـاع درجـة حـرارة الطقـس والرطوبـة النسـبية. خصوصـاً عنـد ارتفـاع درجـات الحـرارة لأكثـر مـن 38°م والرطوبـة النسـبية اعلـى مـن 50% ومعظـم الحـالات التـي رصـدت لتعرضهـا

temperatures and humidity expose pilgrims to the risk of various types of heat stress, from heat exhaustion to heatstroke.

The study aims to identify the main causes of heat stress among pilgrims and mitigate its risks during their journey through the holy sites. It also aims to assess critical points on the main pedestrian routes and the holy sites that lead to heat stress, including: walking long distances, the lack of necessary services for pilgrims on pedestrian routes, exposure to high temperatures, exposure to sunlight, chronic diseases and advanced age, insufficient fluid intake, and lack of medical care during the journey to the holy sites. Data on the mean surface temperature (LST), atmospheric air temperature, relative humidity, and heat stress were derived for the study area from 12 noon to 4 p.m. on June 15 and 16, 2024 (Dhu al-Hijjah 9 and 10, 1445 AH) from satellite imagery. The maximum surface temperature in the study area reached 72.77°C. The roads used by pilgrims on the Day of Arafat show the highest surface temperature values, which significantly impacted their temperature rise and heat stress. The maximum atmospheric air temperature also reached 49.93°C. The relative humidity reached 45.4%, which contributed to the increased sensation of temperature. Heat stress in the study area reached 51.55°C. This value is classified as extremely dangerous on the heat stress index, and the pilgrims are highly likely to suffer from heatstroke and heat stress, especially when walking in direct sunlight. Temperatures were measured inside the camps (pilgrims› accommodations), which showed relatively high values ranging between 36-39°C. This was due to the inability of air conditioners to reduce internal temperatures for several reasons, including holes in the camp walls, frequent opening and closing of the entrance, and thin camp walls that do not provide thermal insulation from the environment. Temperatures also varied in camp corridors and open areas between 39-42.5°C. The low values were due to the use of sprinklers and misting fans in these corridors and open spaces. Relative humidity, meanwhile, showed average values in all camps, ranging between 22% and 31%. Relative humidity values in the corridors and outdoor areas of the camps were relatively high, ranging between 33% and 45% due to the use of sprinklers and misting fans. Heat stress values were determined inside the camps, reaching 38°C, and in camp corridors, reaching 51°C. Heat stress assessments were repeated from satellite data and within camps during the Hajj season of 1446 (during the 9th and 10th of Dhul-Hijjah), showing a significant decrease in all values by approximately 10 degrees, leading to a decrease in the incidence of heat stress. The main reasons for the decrease in heat stress incidence are the tightening of security measures against irregular and unauthorized pilgrims, which has almost disappeared this season, as well as the availability of medical services and ease of movement within the holy sites due to the fact that violators do not sleep on their beds.

للإجهاد الحراري وضربات الشمس وبالتالي أدت للوفاة وجميعها كانت خلال فترة موسم الحج

وتعمل المملكة العربية السعودية على تشريعات واسعة تضمن الالتزام بقواعد الصحة والسلامة المهنية ضمن قوانين العمل لضمان سلامة العاملين والتي تتوافق مع قواعد منظمة العمل الدولية (Balkhyour et al., 2019; Ahmad and Balkhyour 2020). ويشارك المركز الوطني للأرصاد من خلال تنبيهات الطقس في إعداد الخطط للسيطرة على الاجهاد الحراري الذي قد يتعرض له جميع العاملين تحت أشعة الشمس والحجاج ومن يخدمهم أثناء فترة أداءهم لمناسك الحج لعدم التعرض لأشعة الشمس دون التعرض لتكييف الهواء. لذا ركزت هذه الدراسة على حساب الراحة الحرارية للحجيج في مشعر منى خلال موسم حج 1445هـ من خلال حساب عدد من العوامل التي لها تأثير مباشر وغير مباشر على صحة الحجيج

مع ازدياد تواتر موجات الحرارة نتيجة التغير المناخي، أصبح الإجهاد الحراري ظاهرة مقلقة تؤثر على الصحة العامة، والأمن الغذائي، والاقتصاد، خاصة في المناطق الحارة مثل الشرق الأوسط وشمال إفريقيا (Kjellstrom et al., 2009). وتشير الدراسات إلى أن الفئات الأكثر عرضة للخطر تشمل كبار السن، والعمال في الهواء الطلق، والمرضى

عوامل الخطورة أثناء الحج

تشمل العوامل التي تزيد من احتمالية حدوث الإجهاد الحراري خلال الحج ما يلي:

- الازدحام الشديد الذي يعيق التهوية والتبريد الذاتي.
- التعرض المباشر لأشعة الشمس لفترات طويلة.
- نقص شرب المياه أو سوائل الترطيب.
- كبر السن والأمراض المزمنة مثل السكري وأمراض القلب.
- ارتداء ملابس غير مناسبة تمنع تبخر العرق.

بحسب دراسة من وزارة الصحة السعودية، فإن أكثر من 20% من الحالات الصحية الطارئة خلال موسم الحج تتعلق بارتفاع الحرارة والإجهاد الحراري (MOH KSA, 2019)

أنواع الإجهاد الحراري الشائعة في الحج

- الإنهاك الحراري (Heat Exhaustion): يتميز بالدوخة، التعرق المفرط، الضعف، والغثيان.
- ضربة الشمس (Heat Stroke): تعتبر أخطر أشكال الإجهاد الحراري، وتتطلب تدخلاً طبياً فورياً . تشمل أعراضها ارتفاع حرارة الجسم فوق 40°C، جفاف الجلد، فقدان الوعي، وتلف في الجهاز العصبي

يعد مؤشر الإجهاد الحراري (Heat Stress Index - HSI) أداة مهمة تُستخدم لتقييم تأثير درجات الحرارة المرتفعة على صحة الإنسان. يساعد هذا المؤشر في تحديد ما إذا كانت الظروف البيئية تشكل تهديدً ا صحيًا للأفراد، خاصة في البيئات الحارة مثل موسم الحج. يعكس هذا المؤشر تأثير العوامل المناخية مثل درجة الحرارة، الرطوبة، سرعة الرياح، وأشعة الشمس المباشرة على قدرة الجسم على تنظيم حرارته

العوامل المؤثرة في مؤشر الإجهاد الحراري

يتأثر مؤشر الإجهاد الحراري بعدة عوامل بيئية تؤثر في قدرة الجسم على التكيف مع الحرارة:

- درجة الحرارة الجافة (Dry Bulb Temperature): هي درجة حرارة الهواء المحيط التي تقاس باستخدام مقياس حرارة عادي، ولا تأخذ في الاعتبار الرطوبة
- الرطوبة النسبية (Relative Humidity): تُعد من أهم العوامل المؤثرة في قدرة الجسم على التبريد عبر التعرق. عندما تكون الرطوبة عالية، يتباطأ تبخر العرق، مما يجعل الجسم يعاني من صعوبة في فقدان الحرارة
- سرعة الرياح (Wind Speed): الرياح تساعد في تبريد الجسم عن طريق تسريع تبخر العرق. إذا كانت الرياح بطيئة أو معدومة، يزيد تأثير الحرارة على الجسم
- درجة حرارة السطح (Mean Radiant Temperature): تشير إلى درجة حرارة الأسطح المحيطة بالأفراد، مثل الأرض أو المباني، التي تشع حرارة قد تؤدي إلى زيادة الإجهاد الحراري.

الإجهاد الحراري وآثاره خلال موسم الحج 1445 هـ

في موسم الحج من كل عام، يفِد إلى المملكة العربية السعودية جموع الحجاج من كل أنحاء العالم، حيث يلتقون في واحد من أكبر التجمعات البشرية السنوية. وقد شهد موسم الحج هذا العام 1445 هـ وفاة أكثر من ألف حاج، واستنادً ا إلى أعداد وفّرتها حوالي عشر دول عبر بيانات رسمية أو دبلوماسيين منخرطين في عمليات البحث عن الضحايا، بلغ عدد الوفيات في موسم الحجّ هذا العام 1426، بدون تحديد الأسباب في معظم الأحيان، وفقا لوكالة فرانس برس

يعتقد أن الحر الشديد في السعودية، حيث سجلت درجات الحرارة 51.8 مئوية في الظل، هو أحد الأسباب الرئيسية وراء وقوع هذا العدد الكبير من الوفيات بين الحجاج هذا العام. وحذرت وزارة الصحة السعودية الحجاج من مغبة التعرّ ض للشمس وللحر الشديد، ونصحتهم بتناول كميات كافية من المياه – لكن رغم ذلك، وقع كثير من الحجاج ضحايا للإنهاك الحراري وضربات الشمس.

حدثت موجة الوفيات خلال موسم الحج 2024 في الفترة من 14 إلى 19 يونيو 2024 حيث توفي ما لا يقل عن 1426 حاجا من جنسيات مختلفة أثناء أداء فريضة الحج في مكة بسبب الحرارة الشديدة التي تجاوزت 50 درجة مئوية. أعلى درجة حرارة مسجلة ابلغ عنها في المسجد الحرام بمكة كانت 51.8 درجة مئوية (125.2 درجة فهرنهايت . مما أدى إلى وفاة نسبة كبير من الحجاج الغير نظاميين الذين لا تتوفر لهم المكيفات ووسائل الراحة الأخرى

امتد موسم الحج 2024 بين 14 و19 يونيو في سياق موجة حر حادة. وصلت درجات الحرارة إلى أكثر من 50 درجة مئوية وبلغت ذروتها 51.8 درجة في المنطقة المركزية بالمسجد الحرام. وحذرت دراسة سعودية نشرت في مايو 2024 من عواقب التغير المناخي على الحج، قائلة إن درجات الحرارة في المواقع التي تقام فيها المناسك ترتفع بمقدار 0.4 درجة مئوية كل عشر سنوات

كما تسبب ارتفاع عدد الحجاج غير النظاميين. حيث يقضون يومهم دون خيام ولا يمكنهم استخدام وسائل الراحة الموفرة مثل الخيام المكيفة وحافلات الحج الرسمية، وهي وسيلة النقل الوحيدة حول الأماكن المقدسة. فاضطروا للسير كيلومترات عدّ ة تحت أشعة الشمس الحارقة. كما واجهوا صعوبات في دخول المستشفيات أو استدعاء الإسعاف لأحبائهم.

توفي عدد كبير من الحجاج بسبب موجة الحر التي تعرضوا لها أثناء أدائهم لمناسك الحج،

وأدى نقـص الغـذاء والمـاء إلـى تفاقـم الوضـع. أعلـن فـي البدايـة عـن وفـاة 22 حاجـا فـي 17 يونيـو، ولكـن الحصيلـة تزايـدت إلـى 577 حاجـا، ثـم أحصـى أكثـر مـن 900 وفـاة فـي 19 يونيـو، وفـي 22 يونيـو تخطـى إجمالـي عـدد الوفيـات أكثـر مـن 1330 وفـاة وتعتبـر هـذه الحصيلـة المبدئيـة القابلـة للزيـادة ثانـي اكبـر رقـم للوفيـات فـي تاريـخ الحـج بعـد كارثـة تدافـع الحجـاج فـي منـى التـي مـات فيهـا دهسـاً اكثـر مـن 2121 حـاج. وعـزى دبلوماسـي عربـي وفـاة معظـم الـ 658 حاجـاً مصريـا هـذا العـام إلـى الحـر الشـديد. وافتقـر معظـم هـؤلاء إلـى الخدمـات المخصصـة للحجيـج النظامييـن، مـا حـال دون حصولهـم علـى الدعـم اللازم

2. أهمية واهداف الدراسة:

• تحديـد المسـببات الرئيسـية لحـدوث الإجهـاد الحـراري للحجـاج والحـد مـن مخاطرهـا خـلال رحلتهـم فـي المشـاعر المقدسة

• تقييم النقاط الحرجة على طرق المشاة الرئيسية والمشاعر المقدسة

• انشاء مؤشر اجهاد حراري خاص بموسم الحج

أهداف الدراسة:

1- تحديـد النقـاط الحرجـة خلال رحلـة الحـاج بيـن المشـاعر المقدسـة والتـي تـؤدي للإصابـة بالاجهـاد الحـراري ومنهـا:

• المشي لمسافات طويلة

• عدم توفر الخدمات اللازمة للحجاج على طرق المشاه.

• التعرض لدرجات الحرارة المرتفعة

• التعرض لأشعة الشمس

• الأمراض المزمنة والتقدم في العمر

• عدم شرب السوائل الكافية

• فقد الرعاية الطبية خلال رحلة المشاعر المقدسة.

2- وضع الحلول المناسبة للحد من العوامل المسببة للإجهاد الحراري.

3- قياس رضا الحجاج عن راحتهم الحرارية والبدنية خلال رحلة المشاعر.

4- مشاركة جميع الهيئات والمجتمع للحد من العوامل المسببة للإجهاد الحراري.

• عدم توفير وسائل نقل مناسبة لجميع الحجاج من والى المشاعر

• عدم توفير أماكن مظللة او مشجرة في المشاعر المقدسة

• نقص الرعاية الطبية الطارئة في المشاعر المقدسة

• قلـة الوعـي بيـن الحجـاج حـول مخاطـر الإجهـاد الحـراري وكيفيـة الوقايـة منـه، مـن خـلال الحـملات التوعويـة والبرامـج الإرشـادية التـي توفرهـا الجهـات الصحيـة المعنيـة

3. منهجية وطرق البحث

يتم استخدام منهج القياس والتحليل لتقييم العوامل والمسببات الرئيسية للإجهاد الحراري.

• استبانة قياس رضا الحجاج عن الجهد المبذول والراحة الحرارية والبدنية خلال رحلة المشاعر.

• تعيين النقاط الحرجة للحجاج خلال رحلة المشاعر (رصد عدد الإصابات والوفيات بالإجهاد الحراري من خلال وزارة الصحة وأماكن حدوثها خلال موسم حج 1445)

• تحديد المسببات التي تؤدي إلى الإجهاد الحراري في موسم الحج، ويمكن تقسيمها إلى عوامل بيئية، صحية، واجتماعية

1.العوامل البيئية:

• الحرارة المرتفعة: تعتبر درجات الحرارة المرتفعة من أبرز العوامل التي تساهم في حدوث الإجهاد الحراري.

• الرطوبة العالية: الرطوبة المرتفعة في الهواء تعيق قدرة الجسم على تبريد نفسه عن طريق التعرق. في بيئات ذات رطوبة عالية، يصبح التعرق أقل فاعلية، مما يزيد من خطر الإصابة بالإجهاد الحراري

• التعرض المباشر لأشعة الشمس: العديد من المناسك تتطلب من الحجاج السير لمسافات طويلة في الهواء الطلق، مما يعرضهم لأشعة الشمس المباشرة، وهو ما يزيد من مخاطر الإصابة بالإجهاد الحراري

2.العوامل الصحية:

• الحالة الصحية العامة للحجاج: الحجاج الذين يعانون من أمراض مزمنة مثل أمراض القلب، السكري، أو ارتفاع ضغط الدم، يكونون أكثر عرضة للإصابة بالإجهاد الحراري بسبب ضعف قدرتهم على التعامل مع درجات الحرارة المرتفعة.

• التغذية غير المتوازنة: نقص السوائل والأملاح نتيجة للجفاف أو عدم تناول الطعام بشكل كافٍ يمكن أن يزيد من احتمالية الإصابة بالإجهاد الحراري

• الشيخوخة والطفولة: كبار السن والأطفال بشكل خاص يعانون من صعوبة أكبر في تنظيم حرارة الجسم، مما يجعلهم أكثر عرضة للإصابة بالإجهاد الحراري

3.العوامل الاجتماعية والسلوكية:

• الازدحام والتكدس: يشهد موسم الحج ازدحامًا شديدً ا، حيث يتجمع الحجاج في الأماكن المقدسة في وقت واحد. الازدحام يحد من قدرة الجسم على التنفس بشكل جيد أو الحصول على تهوية كافية، مما يزيد من احتمالية حدوث الإجهاد الحراري

• عدم الراحة البدنية: حمل الأمتعة والقيام بنشاطات بدنية شاقة مثل المشي لمسافات طويلة تحت الشمس في أوقات متقاربة قد يزيد من تعرض الجسم للإجهاد الحراري.

• قلة الوعي: قد لا يكون بعض الحجاج على دراية كافية بخطورة الإجهاد الحراري أو كيفية الوقاية منه، مما يزيد من تعرضهم للخطر

4. النتائج والمناقشة

مؤشر الاجهاد الحراري:: مؤشر الإجهاد الحراري هو مقياس لمدى الحرارة التي يشعر بها الإنسان عند أخذ الرطوبة النسبية وعوامل أخرى في الاعتبار إلى جانب درجة الحرارة (جدول 1). وعند ارتفاع نسبة الرطوبة، يصبح من الصعب أن يتعرق جسم الإنسان، ومن ثم يتبخر هذا العرق، بالإضافة إلى أن الإجهاد الحراري لدى الشخص يزداد عندما لا يتمكن من التبريد بكفاءة. ولتحديد مؤشر الاجهاد الحراري في فيجب معرفة درجة حرارة الهواء في الظل بالإضافة إلى الرطوبة النسبية. وعلى سبيل المثال إذا سجلت درجة الحرارة 40°م والرطوبة النسبية 30% فهذا يدل على أن مؤشر الاجهاد الحراري يقدر بقيمة 43°م وهي درجة الحرارة التي يشعر بها جسم الانسان، وهو يدل على إمكانية تعرض الشخص لتشنجات في عضلاته أو ضربة الشمس أو ضربة حرارية عند التعرض لفترة طويلة أو بذل مجهود بدني شاق

جدول 1: يوضح مؤشر الاجهاد الحراري.

المؤشر الحراري Heat Index	Relative Humidity الرطوبة المرتبطة								
درجة الحرارة Air Temp	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
>50	*	*	*	*	*	*	*	*	*
50	48	*	*	*	*	*	*	*	*
49	47	*	*	*	*	*	*	*	*
48	45	53*	*	*	*	*	*	*	*
47	44	51	*	*	*	*	*	*	*
46	43	49	*	*	*	*	*	*	*
45	42	47	*	*	*	*	*	*	*
44	41	46	52*	*	*	*	*	*	*
43	40	44	49	*	*	*	*	*	*
42	39	42	47	54*	*	*	*	*	*
41	38	41	45	51	*	*	*	*	*
40	37	39	43	48	*	*	*	*	*
39	36	38	41	46	52*	*	*	*	*
38	35	37	39	43	49	55*	*	*	*
37	34	35	38	41	46	51	*	*	*
36	33	34	36	39	43	48	54*	*	*
35	32	33	35	37	41	45	50	*	*
34	31	32	33	35	38	42	47	52*	*
33	31	31	32	34	36	40	44	48	54*
32	30	30	31	32	34	37	40	44	49
31	29	29	30	31	33	35	38	41	45
30	28	28	29	30	31	33	35	38	41
29	27	27	28	29	30	31	33	35	37
28	27	27	27	28	28	29	31	32	34
27	26	26	26	27	27	28	29	30	31
26	25	25	26	26	27	27	27	28	28

1.4 نتائج بيانات الأقمار الصناعية

أولاً : درجة حرارة السطح: تم اشتقاق بيانات متوسط درجة حرارة السطح (LST) خلال يومي 15و16 يونيو عام 2024م (9 & 10 ذي الحجة 1445 هـ) لمنطقة الدراسة من الساعة 12ظهراً إلى 4 عصراً من MOD11_L2. حيث يقيس القمر الصناعي MODIS الإشعاع الحراري بالأشعة تحت الحمراء من سطح الأرض عبر قناتين حراريتين مختلفتين (Band 31, 32) في أطوال موجية قريبة من بعضها: Band 31 ≈ 11 µm , Band 32 ≈ 12 µm ، وباستخدام في Google Earth Engine ، وقد تبين أن أقصي درجة حرارة سطح لمنطقة الدراسة بلغت 72.77درجة شكل (1). وتظهر الطرق التي افترشها الحجاج يوم عرفات اقصى قيمه لدرجات حرارة السطح والتي كان لها تأثير بشكل فعال على ارتفاع درجة حرارتهم واصابتهم بالإجهاد الحراري. بينما أظهرت نفس درجات الحرارة للسطح (9 & 10 ذي الحجة 1446 هـ) انخفاضا ملحوظا بلغ حوالي 8 درجات حيث وصلت اقصى درجة حرارة لسطح الأرض 64 درجة مئوية

ثانياً : درجة حرارة الهواء الجوي: النموذج المستخدم في ((Google Earth Engine (GEE لاستخراج درجة حرارة الهواء (Air Temperature) خلال يومي 15و16 يونيو عام 2024م (9 & 10 ذي الحجة 1445 هـ) لمنطقة الدراسة من الساعة 12ظهراً إلى 4 عصراً هو ERA5-Land من ECMWF هو نظام تنبؤ عددي متقدم جدً ا تابع لـ ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). وقد تبين من تحليل النموذج أن أقصي درجة حرارة جو بمنطقة الدراسة بلغت 49.93 درجة شكل (2). بينما أظهرت نفس درجات الحرارة للجو (9 & 10 ذي الحجة 1446 هـ) انخفاضا ملحوظا بلغ حوالي 9 درجات حيث وصلت اقصى درجة حرارة للهواء الجوي 40 درجة مئوية.

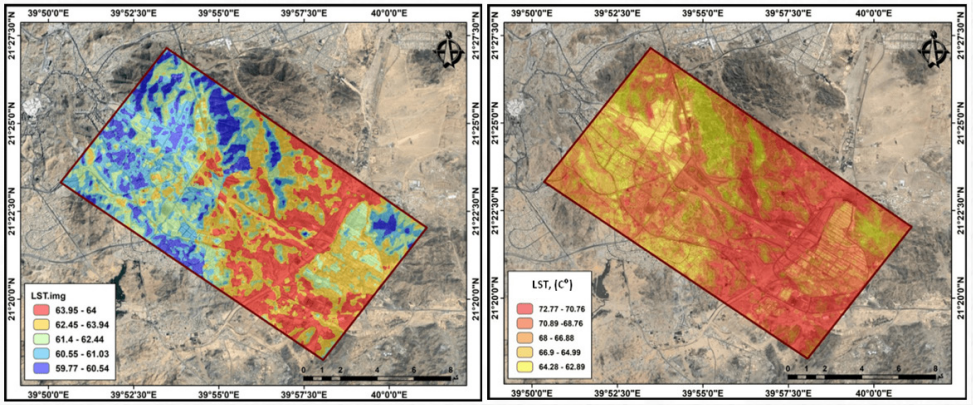
ثالثا: الرطوبة النسبية: النموذج المستخدم في ((Google Earth Engine (GEE لاستخراج الرطوبة النسبية خلال يومي 15و16 يونيو عام 2024م (9 & 10 ذي الحجة 1445 هـ) لمنطقة الدراسة من الساعة 12ظهراً إلي 4 عصراً هو ERA5-Land) ، وقد تبين من تحليل النموذج أن الرطوبة النسبية بلغ أقصاه بمنطقة الدراسة إلى 45.4%. وهذه القيم ساعدت على الإحساس المرتفع بدرجات الحرارة. بينما أظهرت قيم الرطوبة النسبية لهواء الجوي (9 & 10 ذي الحجة 1446 هـ) انخفاضا ملحوظا بلغ حوالي 8 درجات حيث وصلت اقصى قيم للرطوبة النسبية35%.

رابعا: الإجهاد الحراري: النموذج المستخدم في ((Google Earth Engine (GEE لاستخراج الإجهاد الحراري Heat Stress خلال يومي 15و16 يونيو عام 2024م (9 & 10 ذي الحجة 1445 هـ) لمنطقة الدراسة من الساعة 12ظهراً إلي 4 عصراً هو Heat Index ، وقد تبين من تحليل النموذج أن الإجهاد الحراري بلغ أقصاه بمنطقة الدراسة إلي 51.55 درجة شكل (3). وتصنف هذه القيمة في مؤشر الاجهاد الحراري بالخطر الشديد، والاحتمال كبير لتعرض الحاج لضربة شمس والاجهاد الحراري، وخاصةً عند المشي تحت اشعة الشمس المباشرة. بينما أظهرت قيم الاجهاد الحراري (9 & 10 ذي الحجة 1446 هـ) انخفاضا ملحوظا بلغ حوالي 9 درجات حيث وصلت اقصى قيمة للاجهاد الحراري 43 درجة مئوية.

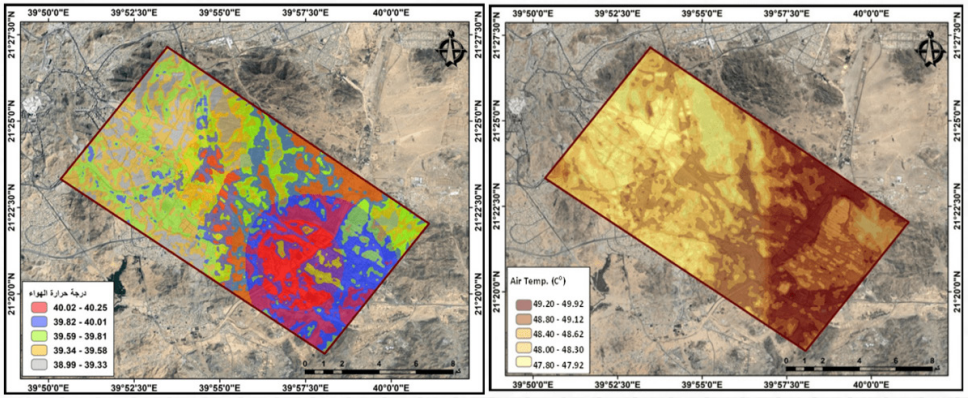
خامسا: الإشعاع الشمسي: النموذج المستخدم في ((Google Earth Engine (GEE لاستخراج الإشعاع الشمسي خلال يومي 15و16 يونيو عام 2024م لمنطقة الدراسة من الساعة 12ظهراً

إلي 4 عصراً هو (SARAH-2 (by CM SAF ، وقد تبين من تحليل النموذج أن الإشعاع الشمسي بلغ أقصاه بمنطقة الدراسة إلي 8 كيلو وات/ساعة

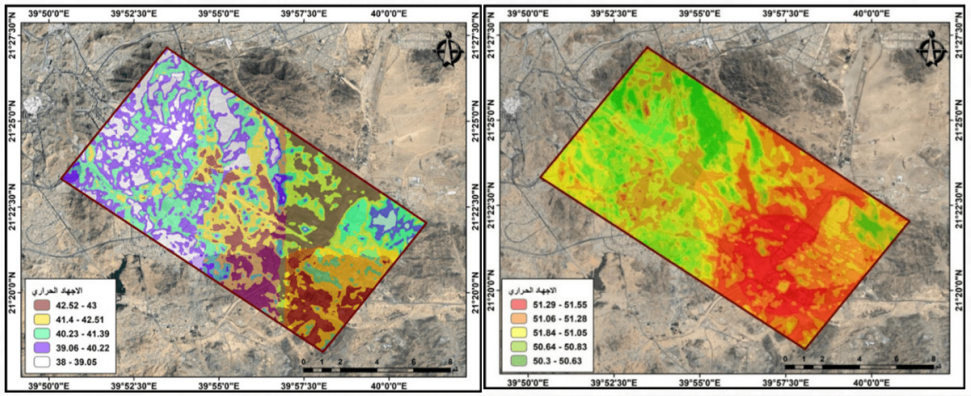
سادسا: سرعة الرياح: النموذج المستخدم في ((Google Earth Engine (GEE لاستخراج سرعة الرياح خلال يومي 15و16 يونيو عام 2024م لمنطقة الدراسة من الساعة 12ظهراً إلي 4 عصراً هو -ERA5 Land) – من ECMWF، وقد تبين من تحليل النموذج أن سرعة الرياح بلغ أقصاه بمنطقة الدراسة إلي 4.07متر/ ثانية. وقد أدت نقله سرعة الرياح الى نقص معدل التبخر وزيادة الإحساس بالحرارة



شكل (1): درجة حرارة السطح (LST, Land Surface Temperature)) خلال يومي 15و16 يونيو عام 2024م ، يومي 5و 6 يونيو عام 2025م لمنطقة الدراسة من الساعة 1ظهراً إلي 4 عصراً من بيانات القمر الصناعي MOD11_L2.



شكل (2): درجة حرارة الهواء (Air Temperature) خلال يومي 15و16 يونيو عام 2024م &5 و6 يونيو عام 2025م لمنطقة الدراسة من الساعة 1ظهراً إلي 4 عصراً.



شكل (2): الإجهاد الحراري Heat Stress (درجة مئوية) خلال يومي 15و16 يونيو عام 2024م & 5و6 يونيو عام 2025م لمنطقة الدراسة من الساعة 1ظهراً إلي 4 عصراً.

2.4 العناصر الجوية المقاسة

قياس العوامل البيئية في مخيمات عرفات ومنى يعد جزءً ا حيويًا من تقييم الأثر البيئي والتخطيط المستدام للحج. لضمان جودة البيئة وصحة الحجاج، ينبغي تنفيذ برنامج شامل لرصد العوامل البيئية. تم رصد العناصر الجوية (درجة الحرارة (°م) – الرطوبة النسبية (%) – الاجهاد الحراري) داخل وخارج عينة من المخيمات التي تم اختيارها، خلال حج 1445 هـ ، موسم حج 1446 هـ وذلك لتحديد اثر التغيرات المناخية على الراحة الحرارية التي يشعر بها الحجاج داخل وخارج المخيمات كذلك معدل الإصابات والوفيات نتيجة لتعرضهم للإجهاد الحراري. ان قياس درجات الحرارة والرطوبة النسبية عامل رئيسي لتحديد الراحة الحرارية للحجاج داخل المخيمات، وقد استخدمت عدة اجهزة لتحديد درجة حرارة والرطوبة النسبية داخل المخيمات وفي ممراتها شكل (4)



شكل (4): قياس درجات الحرارة والرطوبة النسبية داخل مخيمات الحجاج بعرفات ومنى.

بعد الانتهاء من عمليات الرصد والقياس في الميدان تم عمل تمثيل بياني لقيم العوامل البيئية المختلفة والمقاسة في مواقع 10 مخيمات لشركات مختلفة خلال موسم حج 1445 هـ ن وموسم حج 1446 هـ، وقد اظهرت الدراسة ما يلي:

أ) درجة الحرارة والرطوبة النسبية والاجهاد الحراري خلال حج 1445 هـ:

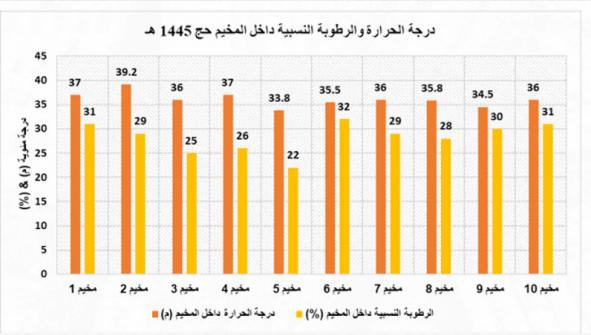
درجات الحرارة داخل المخيمات (اماكن اقامة الحجيج) اظهرت قيما مرتفعة نسبيا تراوحت ما بين 36 – 39 درجة مئوية في مخيمات الفئة الأولي والثانية شكل (5) لحج عام 1445 هـ، نتيجة لعدم قدرة المكيفات على خفض درجات الحرارة الداخلية لأسباب عدة منها وجود فتحات في جدران المخيم، فتح وغلق المدخل مرات عديدة، جدران المخيم رقيق وليس عازل حراري عن البيئة الخارجية. بينما المخيمات المطورة ذات الدوين اظهرت درجة حرارة منخفضة نسبية وصلت 33.8 درجة مئوية نتيجة لانعدام العوامل سابقة الذكر. وقد بلغت اصى قيم للرطوبة النسبية داخل المخيمات 31%

كذلك تفاوتت درجات الحرارة في ممرات المخيمات والمناطق المفتوحة بها بين 39 – 42.5 درجة مئوية وترجع القيم المنخفضة الى استخدام تلك المخيمات الرشاشات الرذاذية والمراوح الرذاذية ايضا في الممرات والساحات المفتوحة، شكل (7). بينما اظهرت الرطوبة النسبية قيما متوسطة في جميع المخيمات تراوحت قيمتها ما بين 22% - 31% ، وكانت أفضل القيم للرطوبة النسبية تابعة ايضا للمخيمات المطورة ذات الدورين. بينما اظهرت قيم الرطوبة النسبية في الممرات والمساحات الخارجة في المخيمات ارتفاعا نسبيا تراوح بين 33% - 45% نتيجة استعمال الرشاشات والمراوح الرذاذية شكل (7). تراوحت قيم الاجهاد الحراري داخل المخيمات من 32- 38 درجة مئوية ، ويشير مؤشر الاجهاد لهذه القيم الى تحذير شديد وخطر متوسط. بينما أظهرت قيم الاجهاد الحراري في الممرات والأماكن المفتوحة 42-51 درجة مئوية ويشير مؤشر الاجهاد الحراري لهذه القيم الى خطر ومؤشر الخطر عالي شكل (9)

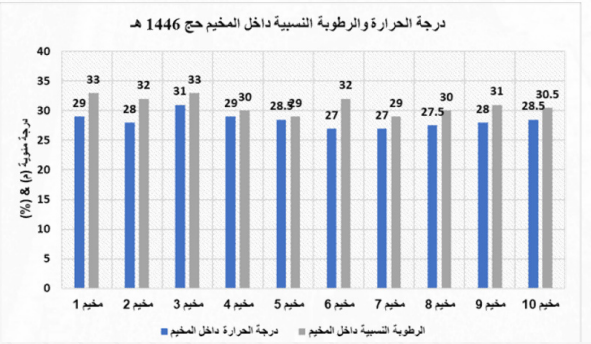
ب) درجة الحرارة والرطوبة النسبية والاجهاد الحراري خلال حج 1446 هـ:

درجات الحرارة داخل المخيمات (اماكن اقامة الحجيج) اظهرت قيما معتدلة جدا تراوحت ما بين 27 – 29 درجة مئوية في مخيمات الفئة الأولي والثانية شكل (6) لحج عام 1446 هـ، وقد بلغت اصى قيم للرطوبة النسبية داخل المخيمات 33%

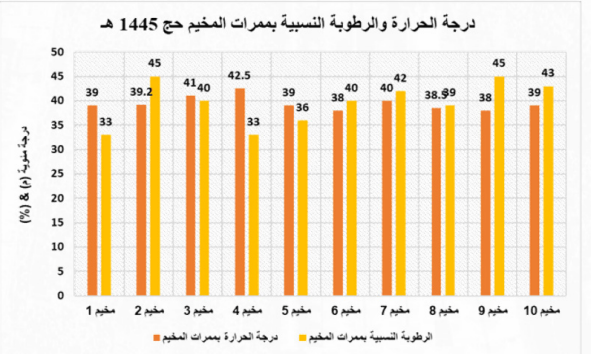
كذلك تفاوتت درجات الحرارة في ممرات المخيمات والمناطق المفتوحة بها بين 34 – 38 درجة مئوية وترجع القيم المنخفضة الى استخدام تلك المخيمات الرشاشات الرذاذية والمراوح الرذاذية ايضا في الممرات والساحات المفتوحة، شكل (8). بينما اظهرت الرطوبة النسبية قيما متوسطة في جميع المخيمات تراوحت قيمتها ما بين 36% - 38% . تراوحت قيم الاجهاد الحراري داخل المخيمات من 26- 30 درجة مئوية ، ويشير مؤشر الاجهاد لهذه القيم الى تحذير ومؤشر الخطر يشير الى خطر منخفض. بينما أظهرت قيم الاجهاد الحراري في الممرات والأماكن المفتوحة 30-33 درجة مئوية ويشير مؤشر الاجهاد الحراري لهذه القيم الى تحذير شديد ومؤشر الخطر متوسط شكل (9)



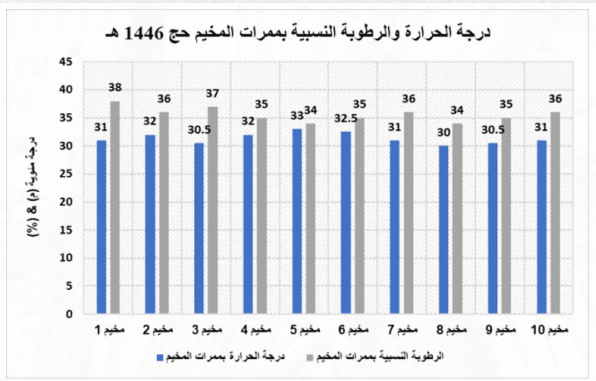
شكل (5): مقارنة بين درجة الحرارة والرطوبة النسبية بممرات المخيم لأنواع مختلفة من المخيمات بعرفات ومنى بأوقات الظهيرة يوم 9 & 10 ذو الحجة1445، حيث تراوحت درجة الحرارة الخارجية بين 49-50 م.



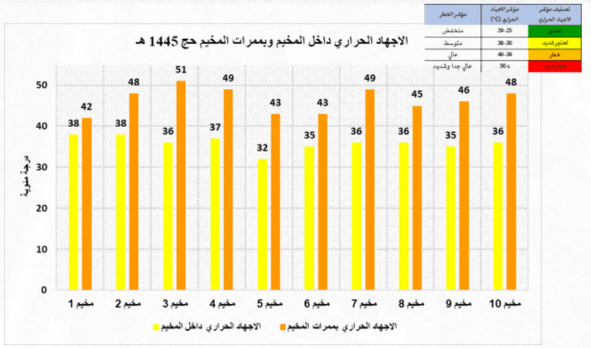
شكل (6): مقارنة بين درجة حرارة المخيم الداخلية لأنواع مختلفة من المخيمات بعرفات ومنى بأوقات الظهيرة يوم 9 & 10 ذو الحجة 1446 هـ، حيث تراوحت درجة الحرارة الخارجية بين 41-43 م.



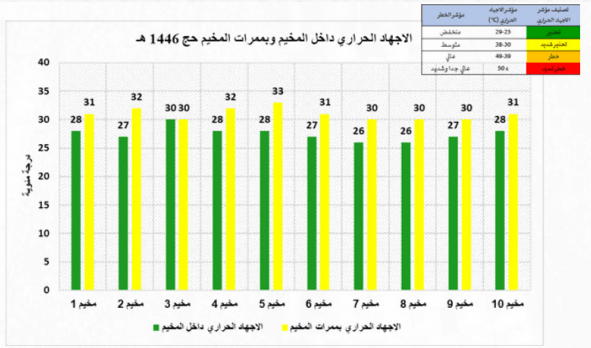
شكل (7): مقارنة بين درجة الحرارة والرطوبة النسبية بممرات المخيم لأنواع مختلفة من المخيمات بعرفات ومنى بأوقات الظهيرة يوم 9 & 10 ذو الحجة1445، حيث تراوحت درجة الحرارة الخارجية بين 49-50 م.



شكل (8): مقارنة بين درجة حرارة بممرات المخيم لأنواع مختلفة من المخيمات بعرفات ومنى بأوقات الظهيرة يوم 9 & 10 ذو الحجة 1446 هـ، حيث تراوحت درجة الحرارة الخارجية بين 41-43 م.



شكل (9): مقارنة بين قيم الاجهاد الحراري داخل المخيمات وبالممرات لأنواع مختلفة من المخيمات بعرفات ومنى بأوقات الظهيرة يوم 9 & 10 ذو الحجة1445.



شكل (10): مقارنة بين قيم الاجهاد الحراري داخل المخيمات وبالممرات لأنواع مختلفة من المخيمات بعرفات ومنى بأوقات الظهيرة يوم 9 & 10 ذو الحجة1446.

3.4 رصد العوامل الأخرى المسببة للإجهاد الحراري:

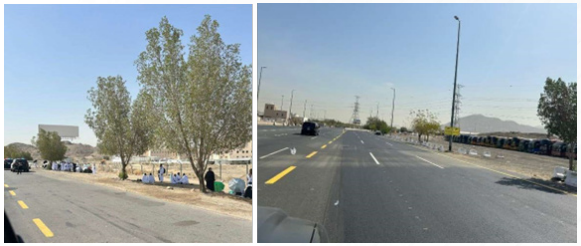
أ) افتراش الطرق في المشاعر من مخالفي أنظمة الحج: تم رصد انعدام الافتراش تقريبا خلال حج 1446 مقارنه بحج عام 1445 هـ، والتزام الحجاج باستعمال المظلات اثناء تجولهم في المشاعر المقدسة وقد ساعد هذا في عدم التعرض لدرجات الحرارة المرتفعة وتقليل الاصابة بالإجهاد الحراري



شكل (11): شوارع عرفات يوم الوقفة تظهر خلوها من الافتراشات وعدم التكدسات البشرية.

ب) المشي لمسافات طويلة الى المشاعر المقدسة: تم رصد انعدام الحجاج المخالفين واللذين كان معظمهم يتجه الى المشاعر المقدسة سيرا على الأقدام، وذلك نتيجة للمجهودات المبذولة من رجال الأمن لإتمام حج بدون مخالفين ، كما هو موضح بالشكل ()، منع بعض الحجاج المخالفين للوصول مشيا الى المشاعر المقدسة من قبل رجال الأمن

ج) بعض الإجراءات الوقائية: تم ملاحظة قيام الهيئة الملكية بمكة المكرمة بتظليل محيط مسجد نمرة وبعض الشوارع الرئيسية بالمشاعر المقدسة لحماية الحجاج من حرارة الشمس. وكذلك طلاء بعض الشوارع بطلاء ابيض عاكس للحرارة لزيادة الراحة الحرارية بالمشاعر المقدسة



شكل (12): رصد انعدام الحجاج المخالفين واللذين كان معظمهم يتجه الى المشاعر المقدسة سيرا على الأقدام.

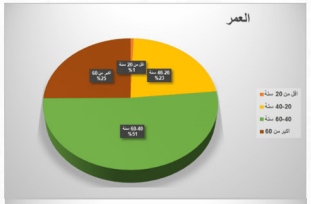


شكل (13): تظليل محيط مسجد نمرة وبعض الشوارع الرئيسية بالمشاعر المقدسة.

4.4 نتائج استبانة مسببات الاجهاد الحراري بالمشاعر المقدسة

أ) العمر

أوضحت نتائج العينة ان النسبة العظمي لأعمار الحجاج تتراوح بين 40-60 سنة، بينما اكبر من 60 سنة تمثل نسبة 25%.



ب) هل تعاني من أمراض مزمنة أو حالات صحية مستمرة؟

بلغت نسبة من يعانون من أمراض مزمنة 45% من اعداد الحجاج.

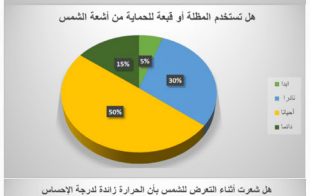


ج) هل كنت تعرف أعراض الإجهاد الحراري وكيفية الوقاية منه قبل الحج؟ وبلغت نسبة الحجاج اللذين لديهم معرفة بأعراض ومخاطر الاجهاد الحراري 57%.



د) هل تشرب الماء بانتظام (مثلاً كل ساعة تقريبًا)

بينما بلغت نسبة الحجاج اللذين يداومون على شرب الماء والسوائل بانتظام 18% والغالبية اجابوا باحيانا وبلغت نسبتهم 44%.



ه) هل تستخدم المظلة أو قبعة للحماية من أشعة الشمس

غالبية الحجاج 50% اوضحوا انهم أحيانا يداومون على استعمال المظلات للحماية من الشمس. وكذلك التعرض المباشر للشمس في أوقات الذروة.

و)ما مدى توافر مناطق مظللة أو مظلات في أماكن الانتظار والأماكن العامة.

اقر 50% من حجاج العينة بتوفر مناطق مظللة في أماكن الانتظار.

ز) هل تواجدت فرق إسعافية متنقلة أو نقاط طبية للتعامل مع حالات الإجهاد الحراري.

كذلك غالبية الحجاج من العينة اجابوا بتوفر فرق الإسعاف المتنقلة والنقاط الطبية الثابتة للتعامل مع حالات الاجهاد والمرضى.

ر) هل شعرت أثناء التعرض للشمس بأن الحرارة زائدة لدرجة الإحساس بالإنهاك

59% من العينة اجابوا انهم أحيانا يشعرون بالتعب والانهاك نتيجة تعرضهم لدرجات الحرارة المرتفعة.



5. الخلاصة

تم اشتقاق بيانات متوسط درجة حرارة السطح (LST) ، درجة حرارة الهواء الجوي، الرطوبة النسبية وكذلك معدل الاجهاد الحراري خلال يومي 15و16 يونيو عام 2024م (9 & 10 ذي الحجة 1445 هـ) لمنطقة الدراسة من الساعة 12ظهراً إلى 4 عصراً من بيانات المرئيات الفضائية وقد تبين أن أقصي درجة حرارة السطح لمنطقة الدراسة بلغت 72.77درجة وتظهر الطرق التي افترشها الحجاج يوم عرفات اقصى قيمه لدرجات حرارة السطح والتي كان لها تأثير بشكل فعال على ارتفاع درجة حرارتهم واصابتهم بالإجهاد الحراري. كذلك بلغت أقصي درجة حرارة للهواء الجوي 49.93 درجة. والرطوبة النسبية حققت 45.4% وهذه القيم ساعدت على الإحساس المرتفع بدرجات الحرارة. بلغ الإجهاد الحراري بمنطقة الدراسة إلي 51.55 درجة. وتصنف هذه القيمة في مؤشر الاجهاد الحراري بالخطر الشديد، والاحتمال كبير لتعرض الحاج لضربة شمس والاجهاد الحراري، وخاصةً عند المشي تحت اشعة الشمس المباشرة.

تم قياس درجات الحرارة داخل المخيمات (اماكن اقامة الحجيج) التي اظهرت قيما مرتفعة نسبيا تراوحت ما بين 36 – 39 درجة مئوية نتيجة لعدم قدرة المكيفات على خفض درجات الحرارة الداخلية لأسباب عدة منها وجود فتحات في جدران المخيم، فتح وغلق المدخل مرات عديدة ، جدران المخيم رقيق وليس عازل حراري عن البيئة، كذلك تفاوتت درجات الحرارة في ممرات المخيمات والمناطق المفتوحة بها بين 39 – 42.5 درجة مئوية وترجع القيم المنخفضة الى استخدام تلك المخيمات الرشاشات والمراوح الرذاذية ايضا في الممرات والساحات المفتوحة. بينما اظهرت الرطوبة النسبية قيما متوسطة في جميع المخيمات تراوحت قيمتها ما بين 22% - 31% . بينما اظهرت قيم الرطوبة النسبية في الممرات والمساحات الخارجة في المخيمات ارتفاعا نسبيا تراوح بين 33% - 45% نتيجة استعمال الرشاشات والمراوح الرذاذية. وتم تعيين قيم الاجهاد الحراري داخ المخيمات والتي بلغت 38 درجة مئوية وكذلك في ممرات المخيمات حيث حققت 51 درجة مئوية. تم تكرار عمليات تقييم الاجهاد الحراري من بيانات الأقمار الصناعية وداخل المخيمات في موسم حج 1446 (خلال يومي 9، 10 ذي الحجة) والتي أظهرت انخفاضا ملحوظا في كل القيم وصل الى 10 درجات تقريبا، مما ادي الي انخفاض معدل الإصابات بالاجهاد الحراري. ومن الأسباب الرئيسية التي أدت الى انخفاض معدلات الاصابة بالاجهاد الحراري هو التشديد الأمني على الحج المخالف والغير نظامي وانعدامه تقريبا هذا الموسم كذلك توفر الخدمات الطبية وسهولة التنقل في المشاعر نتيجة لعدم افتراش المخالفين

6. التوصيات

- زيادة التوعية بمخاطر الاجهاد الحراري وطرق الوقاية منها قبل الوصول إلى المشاعر، خصوصًا للحجاج كبار السن وأصحاب الأمراض.(أهمية شرب الماء بانتظام حتى دون الشعور بالعطش.، تجنب التعرض المباشر للشمس قدر الإمكان.، أهمية الراحة بين أداء المناسك.)
- تعزيز التعاون مع بعثات الحج لتوفير أدوية وسوائل تعويضية للحجاج.
- استخدام التكنولوجيا مثل الأساور الذكية لمراقبة درجة حرارة الجسم وتنبيه الجهات المعنية عند الحاجة

• أنظمة إنذار حراري مبكر: تعتمد على تحليل بيانات الطقس والكثافة السكانية لتحديد المناطق ذات الخطر العالي

• تطبيقات صحية: توفر استشارات فورية وخدمات الطوارئ، وإرشادات مخصصة حسب حالة الحاج الصحية

• زيادة معدلات تظليل وتشجير المشاعر المقدسة واستعمال وسائل زيادة الراحة الحرارية.

• تفعيل الاجراءات الأمنية الصارمة والتي اتبعت في حج 1446 هـ لمنع الحجاج المخالفين للأنظمة.

المراجع

- Abdulaziz R. Seroji, (2024): Variations of heat exhaustion rate of pilgrims with environmental conditions during hajj seasons between 2002 and 2018 in Makkah, Saudi Arabia, Journal of King Saud University - Science 36 (2024) 103173

- Ahmad, I; Balkhyour, M. A.: 2020: Occupational exposure and respiratory health of workers at small scale industries, Saudi Journal of Biological Sciences, Volume 27, Issue 3, Pages 985-990.

- Balkhyour et al., 2019: Assessment of Personal Protective Equipment use and Occupational Exposures in Small Industry in Jeddah: Health Implications for Workers, Saudi Journal of Biological Sciences 26(4).

- Epstein Y and Moran DS. 2006: Thermal Comfort and the Heat Stress Indices. Industrial Heath. 44(3): 388-398.

- Epstein, Y., & Moran, D. S. (2006). Thermal comfort and the heat stress indices. Industrial Health.

- Ghaznawi, HI, Ibrahim, MA, 1987: Heat Stroke and Heat Exhaustion in Pilgrims Performing the Haj (Annual Pilgrimage) In Saudi Arabia.; 7(4): 323-326

- Grundstein A, Poore S, Cooper E, Sarnat S (2017): Heat exposure and injuries among high school football players. Conference notebook. Bull Am Meteorol Soc 98(8):1580

- Hadad, A. and Ajian, M. 1988: «Comparative study for air temperature and relative humidity and heat stroke during the period of the Hajj». A report to the Saudi Meteorological and Environmental Protection Agency, Jeddah: Ministry of defense and availiation.

- Kjellstrom, T., et al. (2009). Climate change and occupational heat stress: Estimating the economic impact. Global Health Action.

- Sawka, M. N., et al. (2011). Integrated physiological mechanisms of exercise performance, adaptation, and maladaptation to heat stress. Comprehensive Physiology.

- Wahid, A., et al. (2007). Heat tolerance in plants: An overview. Environmental and Experimental Botany.

- WHO. (2018). Heat and health in the WHO Eastern Mediterranean Region: a guidance document.

- 1. https://english.alarabiya.net/News/saudi-arabia/2024/06/23/saudi-health-minister-says-1-301-died-during-hajj.

- 2.https://web.archive.org/web/20240619003850/https://enews.alwast.net/arabnews/haj-2024-over-2700-cases-of. مؤرشف من الأصل في 19-06-2024.

- 3. أكثر من 900 وفاة خلال الحجّ والبحث عن المفقودين يتواصل، مونت كارلو الدولية، 19 يونيو 2024. نسخة محفوظة 19-06-2024 على موقع واي باك مشين.

- 4. More than 550 hajj pilgrims die in Mecca as temperatures exceed 50C | Hajj | The Guardian». amp.theguardian.com. مؤرشف من الأصل في 19-06-2024. اطلع عليه بتاريخ 18-06-2024.

- 5. At least 550 hajj pilgrims die in scorching temperatures». ABC News (بAustralian English). 19 Jun 2024. Archived from the original on 2024-06-19. Retrieved 2024-06-19.

- 7. Search for missing pilgrims continues after hajj heat deaths، الغارديان، 19 يونيو 2024. نسخة محفوظة 20-06-2024 على موقع واي باك مشين.

- 8. Sweis, Rana F.; Mekay, Emad; Chutel, Lynsey (8 Jul 2024). «Soaring Temperatures and Profit Seekers Amplify Dangers on the Hajj» [ارتفاع درجات الحرارة والباحثون عن الربح يزيدون من المخاطر التي يتعرض لها الحج]. نيويورك تايمز (بالإنجليزية الأمريكية). ISSN:0362-4331. Archived from the original on 2024-07-08. Retrieved 2024-07-08.

محـــور

البنيــة التحتيــة الذكيــة منخفضــة الانبعــاثات

ارتفاع درجات الحرارة في المدن الكبرى وعلاقتها بالأنشطة البشرية: دراسة حالة في مدينة مكة المكرمة

تركي محمد حبيب الله[1*]، سعيد منير[2]، أرجان زمريق[2]، نصر الإسلام[2]، علاء خليل[2]، عبد الله بليغ[2]، محمد إسماعيل[2]، أيمن غلام[3]، جمعان القحطاني[4]

[1*]إدارة البحث والتطوير والابتكار، المركز الوطني للأرصاد الجوية - [2]إدارة التقارير والدراسات المناخية، المركز الوطني للأرصاد الجوية - [3]الرئيس التنفيذي، المركز الوطني للأرصاد الجوية - [4]الرئيس التنفيذي، المركز الإقليمي للعواصف الرملية والغبارية، المركز الوطني للأرصاد الجوية.

Rising Temperatures in Large Cities and Their Link with Anthropogenic Activities: A Case Study in the Holy City of Makkah

Turki M. A. Habeebullah[1*], Said Munir[2], Arjan O. Zamreeq[2], M. Nazrul Islam[2], Alaa Khalil[2], Abdullah Baligh[2], Muhammad Ismail[2], Ayman S. Ghulam[3], Jumaan Alqahtani[4]

[1*]Department of Research, Development and Innovation, National Center for Meteorology, [2]Climate Reports and Studies Department, National Center for Meteorology, [3]CEO, National Center for Meteorology, [4]CEO, Regional Center for Sand and Dust Storm, National Center for Meteorology

*Corresponding author: E-mail (t.habeebullah@ncm.gov.sa)

الملخص

تشكل ارتفاع درجات الحرارة في المدن الحضرية الواقعة في المناطق القاحلة وشبه القاحلة مصدر قلق، حيث تتقاطع الظروف المناخية القاسية مع التوسع الحضري السريع والبنية التحتية. وفي مدينة مكة المكرمة، التي تعد واحدة من أقدس الأماكن وأكثرها زيارة على مستوى العالم، تؤثر الأنشطة البشرية والتحضر بشكل مباشر على الظروف المناخية المحلية من خلال زيادة درجات الحرارة والتأثير على راحة السكان والزوار

حيث يؤدي تدفق ملايين الحجاج إلى زيادة الضغط على النقل والطاقة والتي لها علاقة بالأنشطة البشرية، مما يزيد من الانبعاثات ويؤدي إلى تفاقم الاحترار المحلي. وتهدف هذه الدراسة إلى مساهمة الأنشطة البشرية الرئيسية في ديناميكيات درجات الحرارة الحضرية في مكة المكرمة من خلال الظواهر الجوية المتطرفة والجوانب البيئية الأخرى، حيث تم تحليل انبعاثات المصادر البشرية، والتي تشير النتائج إلى أن أكثر من 60٪ من الانبعاثات تنشأ عن الأنشطة المتعلقة بالبنية التحتية مثل حركة المرور وأنظمة الطاقة والعمليات الصناعية. كما ترتبط هذه الانبعاثات ارتباطًا وثيقًا بارتفاع درجات الحرارة، لا سيما في البيئات المكتظة بالبناء.

وتؤكد نتائج هذه الدراسة إلى الحاجة الملحة إلى تخطيط البنية التحتية المستجيبة للمناخ، بما في ذلك تدابير مثل النقل العام الكهربائي، وأنظمة الطاقة الشمسية، وتحسين عزل المباني، وتخضير المدن، والإدارة المستدامة للنفايات. ومن خلال التخفيف من الانبعاثات عند مصادرها، يمكن لهذه الاستراتيجيات أن تقلل من الاحترار المحلي وتحسن من مرونة المناخ الحضري بشكل عام. كذلك يستطرق هذا البحث إلى توصيات علمية لتصميم بنية تحتية منخفضة الانبعاثات ومتكيفة مع المناخ في مكة المكرمة، بما يتماشى مع الأهداف الإستراتيجية لرؤية المملكة 2030 بشأن إنشاء مدن ذكية ومستدامة قادرة على تحمل الظروف المناخية القاسية.

Abstract

Rising urban temperatures are an increasing concern in arid and semi-arid regions, where extreme climatic conditions intersect with rapid urbanization and infrastructure expansion. In cities like Makkah, one of the holiest and most visited places globally, anthropogenic activities and urbanization directly influence microclimatic conditions by increasing temperature and impacting comfortability of residents and visitors.

The influx of millions of pilgrims imposes significant strain on transportation systems, energy demand, and urban infrastructure, amplifying pollutant emissions and intensifying local warming. In this study anthropogenic sources of emissions are analyzed, and the results indicate that over 60% of emissions originate from infrastructure-related activities such as traffic, energy systems, and industrial processes. Urban heat Island is quantified using CHIRTS-ERA5 dataset, which showed

that both minimum and mean temperatures were higher in urban areas than in the rural and suburban areas in Makkah. Anthropogenic emissions are closely linked to increases in temperatures in urban areas, particularly in densely built environments.

The findings underscore the urgent need for climate-responsive infrastructure planning, including measures like electric public transport, solar-powered energy systems, improved building insulation, urban greening, and sustainable waste management. By mitigating emissions at their sources, such strategies can manage air quality, reduce localized warming and improve overall urban climate resilience. This research provides a science-based recommendations for designing low-emission, climate-adaptive infrastructure in Makkah, aligning with the broader objectives of Saudi Arabia's Vision 2030 to create smart, sustainable cities capable of withstanding climate extremes.

Keywords: Urban temperature; climate change; vehicle emissions; infrastructure emissions; arid cities; Makkah; sustainable planning.

1. Introduction

The Holy City of Makkah, located in the western region of the Kingdom of Saudi Arabia, holds unparalleled religious and cultural significance for Muslims around the world. As a holy city, Makkah receives millions of visitors each year, coming to perform Hajj and Umrah (General Authority for Statistics, 2025). These mass gatherings represent the largest periodic influxes of people into a single urban area, placing extraordinary demands on the city's infrastructure, services, and environmental systems. The large number of visitors and activities intensifies the challenges of emissions and extreme temperature, especially in the context of global efforts toward climate change, environmental sustainability and public health (Habeebullah et al., 2022; Nayebare et al., 2018).

Urban infrastructure plays a critical role in shaping the air quality of densely populated cities like Makkah. Transportation systems, energy generation, building operations, and waste management are among the key components that directly contribute to pollutant and greenhouse gas emissions (Borrego et al., 2006). These impacts are significantly magnified during pilgrimage seasons, when traffic congestion and increased energy consumption lead to elevated levels of air pollution, particularly course and fine particulate matter (PM10 and PM2.5), which in turn leads to rising temperature in urban areas. When temperature is higher in urban areas than the surrounding rural areas, this phenomenon is referred to as urban heat island (UHI).

Jaschinsky (2024) reported that vehicular traffic and their emissions significantly contribute to urban heat stress, primarily through the generation of waste heat and the presence of sealed surfaces such as roads and parking lots. In large cities, car traffic alone produces up to three times as much waste heat daily as the body heat of the entire population (Jaschinsky, 2024).

Despite various initiatives aimed at modernizing transport and energy systems in the city of Makkah, a comprehensive understanding of the emission sources, their linkages to infrastructure and their impacts on local temperature remains limited.

This study addresses this gap by applying advanced source apportionment techniques (e.g., Watson and Chow, 2007, USEPA, 2014) to identify the major emission sources and quantify their contribution to PM10 pollution in Makkah. By linking these sources to specific urban infrastructure sectors, the study proposes a data-driven framework for mitigating emissions through smart infrastructure planning.

Furthermore, the study compares temperature levels in urban, suburban and rural areas of the Makkah city and discusses how local temperature is linked with anthropogenic activities. The findings not only enhance scientific understanding of air quality dynamics in one of the world's most important religious cities but also offer practical recommendations for designing low-emission systems, improving air quality, addressing the issue of urban heat island, and reducing impacts on urban life and human health.

These strategies aim to support sustainability, improve climatic conditions for both visitors and residents, protect public health, and contribute to national and global climate goals.

2. Methodology

Makkah is the Holy City for all Muslims around the world. Makkah is situated in the western part of Saudi Arabia, among the Sarawat Mountains, about 80 km inward from the Red sea, and 277 m above sea level. The population of Makkah city is around 1.96 million, and the population of the Makkah region is more than 8.5 million, with a growth rate of 1.8% (CDSI (2020)). Makkah is unique in the sense that it receives millions of pilgrims around the year, coming for Hajj and Umrah. The vast number of pilgrims leads to traffic congestion within and around the city, resulting in high levels of exhaust and non-exhaust emissions and dust resuspension. Makkah experiences hot and dry climatic conditions, where the maximum temperature reaches 50oC in the summer season. Urban infrastructure is a complex system influenced by many factors that contribute to pollutant emissions.

Figure 1 illustrates the main elements of urban infrastructure that contribute to pollutant and greenhouse gas emissions. These key elements include transportations, energy, and waste management, which emits different types of pollutants (such as NO2, PM, CO and SO2) and greenhouse gases (e.g., CO2, CH4 and other VOC). These pollutants and greenhouse gases not only affect human health and visibility but also have a negative impact on sustainability and climatic factors, such as temperature.

In this study, a detailed analysis of PM10 emission sources was carried out. To identify the major contributors to PM10 pollution in Makkah, a detailed chemical characterization and source apportionment study was conducted. Daily PM10 samples were collected over a five-month period from January to May 2019. Samples were collected at five locations in Makkah (Figure 2) and were analyzed for several chemical species, including trace metals (e.g., Al, Ca, Fe, Zn) and inorganic ions (e.g., SO_4^{2-}, NO_3^-). Positive Matrix Factorization (PMF), a receptor modeling technique, was applied to the dataset to quantify the contributions of different emission sources to ambient PM10 concentrations (Habeebullah et al., 2022).

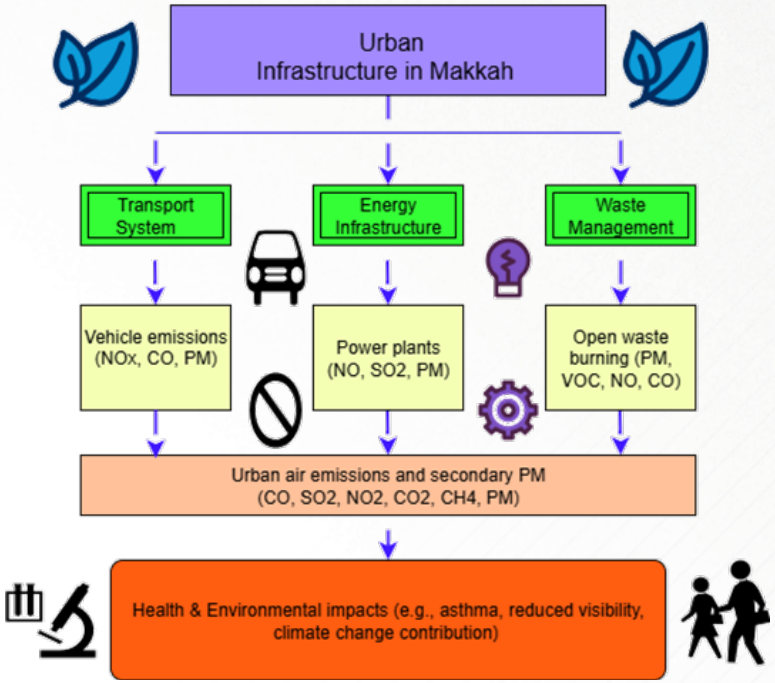


Figure 1. Flowchart of urban infrastructure, emissions and impacts

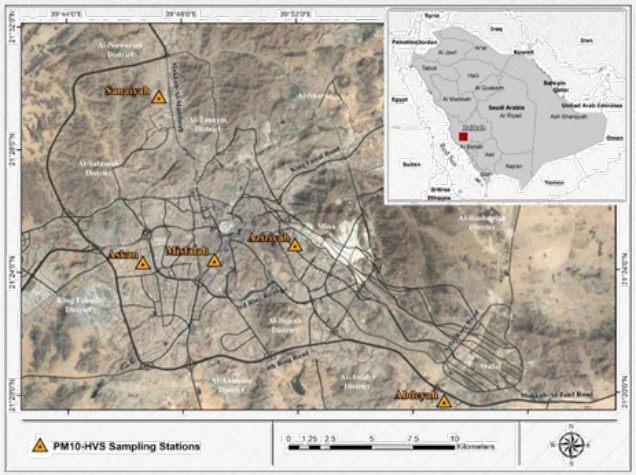


Figure 2. Location map of the five sampling sites (Aziziyah, Misfalah, Sanaiyah, Abdeyah, and Askan) in Makkah.

In the second part of the study, urban heat island (UHI) was analyzed in Makkah to see how temperature varies in urban, suburban and rural areas and what are the potential reasons. The Makkah City was categorized into urban (>1,500 people km-2), suburban (300–1,500 people km-2), and rural (<300 people km-2) zones using high-resolution population density data. CHIRTS-ERA5 temperature dataset at 2m height was analyzed for the years 1994, 2004, 2014, and 2024. The mapping and data analysis were conducted through the following ten sequential steps:

- Selection of study area: Makkah city was selected due to its unique values for pilgrims and visitors.

- Acquisition of population density data: A high resolution population density map of Saudi Arabia was obtained and used as the basis for spatial classification of Makkah.

- Extraction of city boundaries: Administrative boundary outlines for Makkah was sourced and prepared for spatial analysis.

- Derivation of population density values: Population density data were spatially intersected with the city boundaries to extract population density values specific to the city of Makkah.

- Zonal classification: Based on established thresholds, Makkah city was subdivided into three zones: urban (> 1,500 people km-2), suburban (300– 1500 people km-2), and rural (< 300 people km-2).

- Acquisition of temperature datasets: CHIRTS ERA5 data was used in this study, which provided air temperature data at 2 m height for the whole country.

- City level temperature extraction: From CHIRTS-ERA5 dataset, temperature values corresponding to the spatial extent of Makkah city and its zonal subdivisions (urban, suburban, rural) were extracted for the years 1994, 2004, 2014, and 2024.

- Temperature estimation for each zone: For each study year, mean, minimum, and maximum air temperature values were calculated for the urban, suburban, and rural zones within each city.

- Computation of temperature differences: The temperature differences between urban–suburban, urban–rural, and suburban–rural zones were calculated to quantify the magnitude of UHI effect.

- Visualization and comparative analysis: The results were visualized using graphical methods to facilitate both temporal and spatial comparison of UHI intensity across different zones in Makkah.

All data analysis was carried out using the R programming language (R Core Team, 2024) together with a set of specialized packages designed for statistical computing, spatial data processing, and visualization. Data manipulation was primarily performed using dplyr (Wickham et al., 2023) and tidyr (Wickham & Girlich, 2023), both of which are part of the tidyverse collection (Wickham et al., 2019).

For data visualization, we used ggplot2 (Wickham, 2016), a grammar-of-graphics–based plotting system, which allows for flexible and publication-quality figure generation. Spatial data handling and analysis were performed with several packages: sf (Pebesma, 2018) for vector data in simple features format, stars (Pebesma, 2023) for handling raster and spatiotemporal arrays, and terra (Hijmans, 2023) for raster and vector spatial analysis with efficient memory handling. NetCDF climate data were accessed using the ncdf4 package (Pierce, 2019).

3. Results and discussion

3.1 Quantifying PM10 emissions

Figure 3 presents the mean concentrations of PM_{10} (μg/m³) measured during 2019 across five monitoring sites in Makkah: Abdeyah, Askan, Aziziyah, Misfalah, and Sanaiyah. The results demonstrate considerable spatial variability in PM_{10} levels. Among the sites, Aziziyah recorded the highest concentrations, exceeding 300 μg/m³ on average, accompanied by a large standard deviation, indicating significant temporal fluctuation in pollution levels. This elevated level may be attributed to heavy traffic, ongoing construction, and the area's central role during pilgrimage seasons, which leads to increased anthropogenic activity. Misfalah also exhibited elevated PM_{10} levels (~230 μg/m³) with notable variability, likely influenced by dense traffic flow and its urban canyon-like street morphology that can trap airborne pollutants. In contrast, Abdeyah and Askan showed relatively lower PM_{10} concentrations (approximately 160–170 μg/m³), suggesting they are less impacted by direct pollution sources, potentially due to their residential nature and location outside the city center, where emissions are lower and dispersion conditions are more favorable. Sanaiyah recorded the lowest average concentration, around 140 μg/m³, indicating comparatively cleaner air, possibly due to fewer emission sources and better ventilation. Despite differences among the sites, all observed concentrations substantially exceed the World Health Organization's 24-hour guideline for PM_{10} (45 μg/m³), raising public health concerns.

These findings emphasize the urgent need for localized air quality interventions, particularly in heavily polluted zones such as Aziziyah and Misfalah. Effective mitigation strategies may include restricting high-emission vehicles, promoting green infrastructure, and optimizing urban design to improve air circulation. The data shows the importance and need for a high-resolution monitoring network in Makkah to inform sustainable urban planning and protect public health, especially during high-demand pilgrimage periods.

Figure 4 presents the mean concentrations of major (upper panel) and minor (lower panel) components of PM10 measured across five monitoring sites in Makkah: Abdeyah, Askan, Aziziyah, Misfalah, and Sanaiyah. In the upper panel, the most dominant pollutants are sulfate (SO_4^{2-}) and nitrate (NO_3^-), particularly at Aziziyah and Misfalah, with SO_4^{2-} concentrations exceeding 50 μg/m³ at Aziziyah. These secondary inorganic aerosols are indicative of atmospheric chemical transformations involving sulfur dioxide (SO_2) and nitrogen oxides (NO_x), which are typically emitted from vehicular traffic and industrial activities. High levels of chloride (Cl^-) and sodium (Na^+) across the sites suggest marine or road salt influence, while calcium (Ca^{2+}) and aluminum (Al) point to dust contributions from crustal or construction activities.

In the lower panel, minor pollutants such as fluoride (F^-), magnesium (Mg^{2+}), and NO_2^- show higher levels at Aziziyah and Misfalah, again reinforcing the influence of urban activities. Trace metals such as cadmium (Cd), chromium (Cr), and lead (Pb) are present in smaller quantities across all sites, but their presence, particularly at Aziziyah, suggests contributions from industrial or combustion-related sources. The elevated phosphate (PO_4^{3-}) and selenium (Se) may reflect a mix of industrial and possibly biological or waste combustion origins. Overall, the spatial trends reveal Aziziyah and Misfalah as hotspots

for both major and minor particulate pollutants, likely due to intense traffic, population density, and urban complexity. These findings support the need for localized air quality control and targeted emission reduction in these areas to mitigate health risks and environmental degradation.

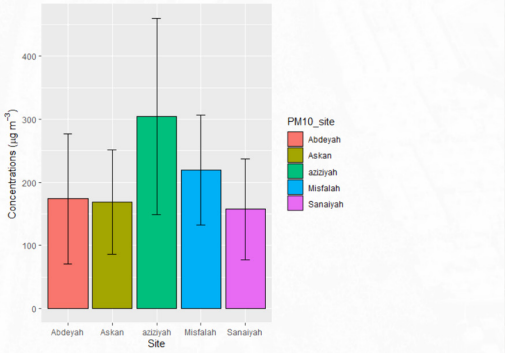


Figure 3. PM10 concentrations (µg/m3) at the five monitoring stations in Makkah 2019.

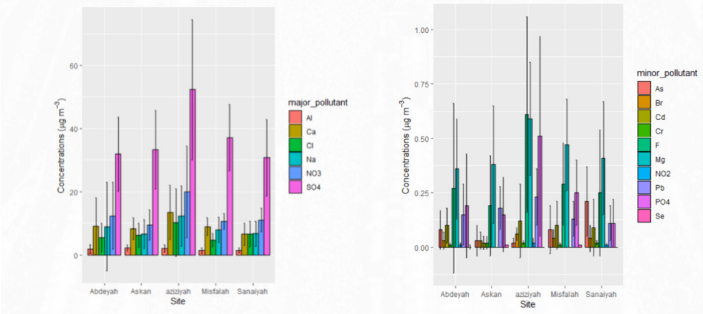


Figure 4. The levels of PM10 (µg/m3) components at different monitoring sites in Makkah in year 2019, where upper-panel shows the major constituents and lower-panel shows the minor constituents.

Source apportionment analysis of PM_{10} concentrations and components in Makkah using Positive Matrix Factorization (PMF) revealed four dominant emission sources contributing to airborne particulate pollution. The most significant contributor was identified as road traffic emissions, accounting for 51% of the total variance. This is consistent with Makkah's urban characteristics, where vehicular congestion, especially during pilgrimage seasons, results in high emissions from both light-duty and heavy-duty vehicles.

The second major source was a mixed component of industrial emissions and mineral dust, explaining 27.5% of the variance. This reflects the influence of construction activities, resuspended road and soil dust, and nearby industrial operations. The third source, contributing 13.6% of the variance, was attributed to restaurant and domestic emissions, likely originating from commercial cooking and waste burning activities in densely populated neighborhoods. Finally, other minor sources accounted for 7.9% of the variance.

These findings align closely with the earlier PMF-based study by Nayebare et al. (2018), which conducted a source apportionment of PM2.5 in Makkah. Their analysis identified four principal sources: vehicular emissions (30.1%), industrial-mixed dust (28.9%), soil or earth-crust sources (24.7%), and fossil-fuel/oil combustion (16.3%). Furthermore, their wind trajectory analysis suggested that both local wind direction and regional transport significantly influenced air pollution levels in Makkah. Collectively, both studies emphasize that anthropogenic activities account for more than 75% of the observed particulate air pollution in the city.

This underscores the critical need for targeted policy measures and emission control strategies, particularly focused on urban transportation, industrial processes, and fuel combustion. Reducing anthropogenic emissions is essential not only for improving air quality but also for safeguarding public health and enhancing environmental sustainability in this religiously and culturally significant city.

3.2 Analysis of Urban Temperature - UHI

Here, the results of UHI analysis are presented and discussed. Figure 5 illustrates city-level population density, zonal classification, and spatial temperature patterns in Makkah. High-density urban areas, depicted in dark red (Figure 5, top-left), are encircled by medium-density suburban zones and then low-density rural areas.

This classification is further clarified in the top-right panel of Figure 5, where urban, suburban, and rural zones are shown in red, green, and blue, respectively. However, the spatial distribution of maximum, mean and minimum temperatures (Figure 5, middle and lower left) do not mirror this population density pattern. Instead, temperature maps for 2024 reveal a clear northeast-to-southwest gradient across Makkah, where temperatures are lower in the northern and eastern parts and higher in the southern and western parts of the city.

It is evident that both mean and minimum temperatures are consistently highest in urban and lowest in rural zones. In contrast, maximum temperature trends show minimal variation across zones, as indicated by overlapping lines. The bottom-right panel (Figure 5) displays temporal trends in temperature across the urban, suburban, and rural zones for the years 1994, 2004, 2014, and 2024. Overall, temperatures have steadily increased in

all zones from 1994 to 2024, however, the increases are more consistent in minimum and mean temperatures. This analysis shows that minimum and mean temperatures are higher in urban areas, however, findings vary from area to area around the globe, as reviewed below.

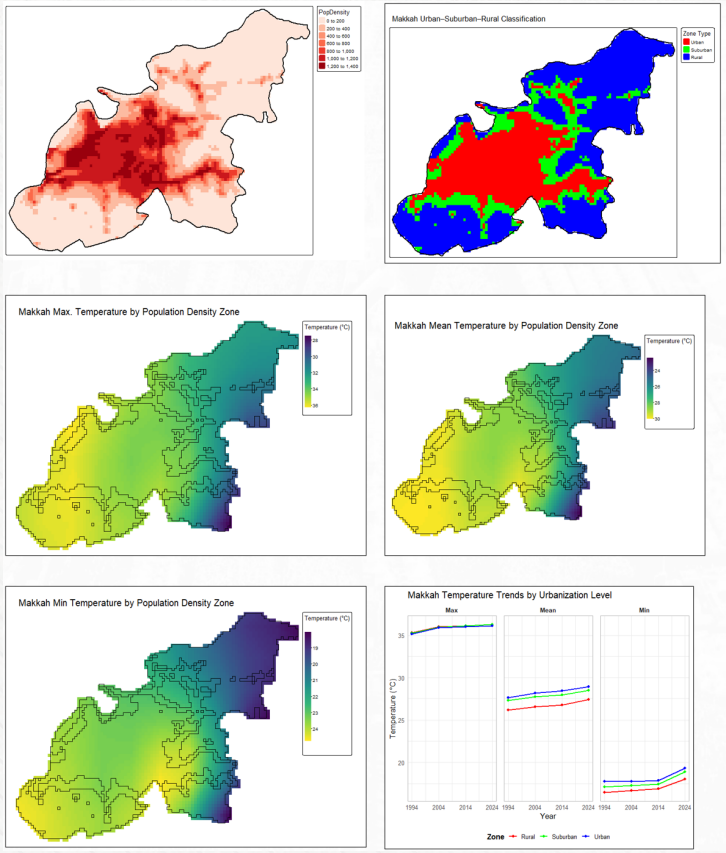


Figure 5. Showing Makkah population density (upper-left-panel), classification into urban, suburban and rural zones (upper-right-panel), and maps of 2 m air temperature for 2024 maximum (middle-left-panel), mean (middle-right-panel), and minimum (lower-left-panel), and trends in temperatures at urban, suburban and rural zones (lower-right-panel).

Vehicular traffic is a significant contributor to the intensity and spatial distribution of the UHI effect. Using a cell-transmission model (CTM) driven by traffic counting data, Zhu et al. (2017) demonstrated that heat generated from vehicle flows exhibited pronounced spatial heterogeneity and distinct daily and weekly periodicities. Their study revealed that major roads and intersections with the heaviest traffic volumes corresponded to the highest UHI intensities, indicating that dynamic vehicular flows can dominate local heat patterns. This evidence underscores the need to incorporate traffic-related anthropogenic heat emissions into urban climate models and to develop targeted heat mitigation strategies that account for both the spatial and temporal variability of road transport emissions.

In a detailed analysis of many global cities, Deng et al. (2024) reported that in warmer climatic regions, surface temperature exhibited a positive correlation with the population size of urban areas, indicating that larger cities tend to experience higher thermal loads. Their findings suggest that the magnitude of the urban heat island effect intensifies with increasing urban population, potentially due to greater anthropogenic heat emissions, higher building densities, and expanded impervious surfaces. Furthermore, Deng et al. (2024) observed that vegetation cover played a substantial role in modulating surface temperature. Their analysis revealed that vegetation contributed up to 61 % of the variation in surface temperature in arid cities with area size between 150 km² and 200 km². This shows the importance of green infrastructure in thermal regulation, especially in environmentally sensitive and water-limited arid and semi-arid urban environments.

Jaschinsky (2024) reported that vehicular traffic significantly contributed to urban heat stress, primarily through the generation of waste heat and the presence of sealed surfaces such as roads and parking lots (Figure 6). In large cities car traffic alone produced up to three times as much waste-heat daily as the body heat of the entire population (Jaschinsky, 2024).

This heat is stored in road surfaces and released into the atmosphere during the night, exacerbating the UHI effect. Additionally, parked vehicles retain heat, further hindering nighttime cooling. The accumulation of heat is intensified by pollutant emissions from vehicles, which contribute to atmospheric stability and reduced air mixing, thereby enhancing heat buildup (Jaschinsky, 2024). The increasing frequency of hot days poses significant health risks, particularly to vulnerable populations such as the elderly, children, and individuals with pre-existing chronic health conditions.

To mitigate these effects, urban planning strategies should focus on unsealing urban areas and incorporating more green spaces and water bodies to facilitate cooling (Jaschinsky, 2024). Figure 6 shows various sinks and sources of heat in urban areas, which shows that road traffic, factories and buildings increase temperature, whereas vegetation and water bodies have a cooling effect.

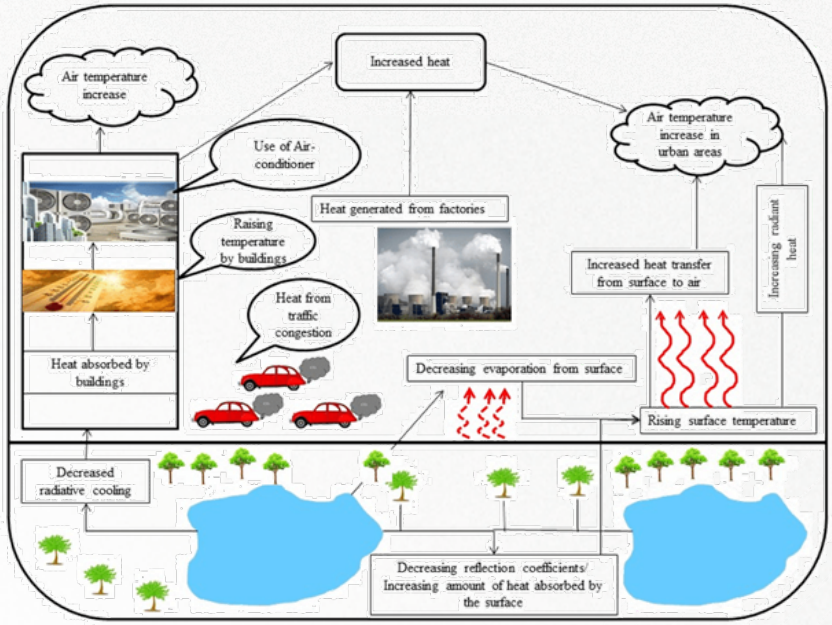


Figure 6. Different sources and sinks of heat in urban areas.

4. Conclusions

This study identified the main sources of PM_{10} air pollution in Makkah using Positive Matrix Factorization (PMF), revealing that traffic emissions, mineral dust, industrial activity, and biomass combustion account for over 75% of the observed particulate matter. The spatial distribution analysis highlighted hotspots in areas such as Aziziyah and Misfalah, which consistently recorded the highest concentrations of both major and trace pollutants. Elevated sulfate, nitrate, and trace metal levels in these locations reflect intense vehicular movement, construction activity, and secondary aerosol formation driven by atmospheric reactions. Wind trajectory analyses further emphasize the role of regional transport in amplifying local pollution, underscoring the complex interplay of anthropogenic and environmental factors in shaping Makkah's air quality.

Urban heat island analysis based on CHIRTS-ERA5 2m temperature data analysis, demonstrated that both minimum and mean temperature levels were higher in urban areas than the surrounding suburban and rural areas in Makkah. Furthermore, long-term trends analysis revealed that temperature levels have been increasing with time probably due to regional and global climate change effect and local urbanization. Literature reviews showed that anthropogenic activities, such as road traffic, industrial operations, and buildings, serve as significant sources of heat in urban areas, while water bodies and vegetations function as natural sinks that help mitigate urban temperatures. These findings highlight the critical need to align urban infrastructure with low-emission and smart city principles to reduce exposure and health risks, especially during the high-density pilgrimage seasons.

5. Recommendations

To reduce emissions and mitigate extreme heat issues in Makkah, several integrated strategies are recommended as follows:

(1) Expanding low-emission public transport: Electric vehicles such as buses, metro systems, and trams should be prioritized to reduce dependency on petrol and diesel engine private vehicles and minimize transport-related emissions.

(2) Retrofitting buildings with energy-efficient systems: In Makkah, a significant proportion of electricity consumption is driven by air conditioning and ventilation, especially in the residential, commercial, and hospitality sectors. Retrofitting existing buildings with energy-efficient systems such as smart HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) technologies, thermal insulation, and solar-reflective materials can drastically reduce peak electricity loads and associated greenhouse gas emissions. Smart systems allow dynamic adjustments based on occupancy and ambient conditions, improving energy efficiency while maintaining indoor comfort.

(3) Addressing construction-related emissions and unsealed surfaces: Construction activities are a major source of coarse particulate matter (e.g., PM_{10}) in urban environments due to soil disturbance, material handling, and vehicular movement on unpaved surfaces. In Makkah, ongoing urban expansion and seasonal infrastructure scaling to accommodate pilgrims exacerbate this issue. Therefore, improving construction site practices such as regular dust suppression, material covering, limiting work during high-wind conditions, and enforcing on-site emission controls can significantly reduce dust generation.

(4) Vegetation: A particularly impactful recommendation is the strategic integration of vegetation into urban infrastructure planning. Urban greening through tree plantations, green belts, and vegetated buffers around roads and buildings can significantly mitigate air pollution by intercepting $PM_{2.5}$, absorbing nitrogen dioxide and ozone, and reducing ambient temperatures through shade and evapotranspiration. Given Makkah's arid climate, adopting drought-resistant native species and using treated wastewater for irrigation can ensure sustainability without overburdening limited water resources. These green interventions are especially beneficial along busy roads and near industrial zones, where pollutant concentrations are highest.

(5) Urban redesign: Narrow streets flanked by high-rise buildings limit air circulation, resulting in pollutant accumulation and intensified thermal stress. Urban redesign strategies such as widening road corridors, reducing building density, incorporating ventilation pathways,

and adopting step-back building forms can enhance air flow, which disperse air pollution and create a cooling effect. These measures would be vital in improving environmental comfort and air quality in the most congested zones.

(6) Waste management: Unregulated waste disposal and open burning contribute to elevated levels of PM, VOCs, and toxic pollutants such as dioxins. Implementing centralized, smart waste collection and treatment systems including recycling, composting, and waste-to-energy technologies can reduce emissions and improve sanitation.

(7) Public education and awareness: Informing residents, workers, and pilgrims about the health risks of air pollution and encouraging environmentally responsible behavior can foster a culture of shared accountability. This may be achieved through mobile applications, signage, media campaigns, Friday sermon (Khutbah), and pilgrim engagement programs.

(8) Renewable energy: Given Makkah's high solar irradiance, clear skies, and minimal rainfall throughout most of the year, the city holds tremendous potential for harnessing solar energy as a sustainable power source. The deployment of solar photovoltaic systems can significantly reduce dependence on fossil fuels, particularly for cooling applications, which constitute a major share of energy demand in the region. Moreover, solar-powered transport infrastructure, including the integration of solar charging stations for electric buses and trams, can further enhance the sustainability of public transit systems. Promoting solar energy not only aligns with Saudi Arabia's Vision 2030 clean energy goals but also leverages Makkah's natural climatic advantage to lower carbon emissions and operational energy costs across sectors.

(9) Targeted interventions: A strategic focus should be placed on enhancing environmental comfort and reducing emissions at major pilgrimage sites, including Arafat, Mina, and Muzdalifah. These areas experience intense crowding during Hajj, which elevates localized temperatures due to human metabolic heat, dense structures (like tents), and transport congestion. To mitigate these effects, authorities should consider introducing passive cooling strategies such as high-albedo surfaces, solar-reflective tent materials, shaded walkways, and expanded green canopies where feasible. Furthermore, encouraging solar-powered alternatives including fans, lighting, and cooling systems can significantly reduce both heat and pollution exposure. Implementing mobile misting stations with treated water and ensuring adequate spacing and ventilation between tents can also improve thermal comfort. As these sites are temporary yet critical zones of exposure, targeted interventions here will have significant impacts on both public health and the spiritual experience of millions of pilgrims.

(10) Park-and-ride systems: To curb traffic-related emissions in the Makkah city center, particularly around Al-Haram, strict regulations should be enforced to restrict access to fossil-fuel-powered public transport and private vehicles. Only electric mobility options such as trams, trains, and electric buses should be permitted near the Holy Mosque, especially during Hajj. Peripheral transport hubs supported by park-and-ride systems can facilitate stress free access while minimizing vehicular intrusion into the sacred city. This recommendation aligns with Saudi Arabia's Vision 2030 goals to promote clean energy and sustainable urban growth.

In conclusion, the integration of source apportionment and UHI findings with smart, green and emission-reducing infrastructure strategies provides a robust pathway to improving air quality and reducing temperature in Makkah. By addressing the dominant anthropogenic emission sources, particularly traffic and secondary aerosol formation and implementing holistic urban planning solutions, the city can transition towards a more resilient, health-conscious, and sustainable future.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the Custodian of the Two Holy Mosques Institute for Hajj and Umrah Research at Umm Al-Qura University, Makkah, for their valuable support and collaboration in facilitating this study. We also extend our sincere thanks to the National Center for Meteorology, Jeddah, for providing essential data and technical assistance that contributed significantly to the success of this research.

References

- Al-Ghamdi, S. G., et al. (2019). Sustainable urban planning strategies for the Holy City of Makkah. Cities, 91, 123–132.

- Borrego, C., et al. (2006). The impact of urban planning on air quality. Science of the Total Environment, 363(1-3), 5–26.

- CDSI (2020). Central Department of Statistics and Information of Saudi Arabia, 2020. Available online: https://www.stats.gov.sa/en (accessed on 19 March 2025).

- 23. Seroji, A. Particulates in the Atmosphere

- Creutzig, F., et al. (2015). Transport: A roadblock to climate change mitigation? Science, 350(6263), 911–912.

- Deng, X., Yu, W., Shi, J., Huang, Y., Li, D., He, X., Zhou, W., & Xie, Z. (2024). Characteristics of surface urban heat islands in global cities of different scales: Trends and drivers. Sustainable Cities and Society, 107, 105483. https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105483.

- European Commission (2020). Urban Vehicle Access Regulations (UVARs) in Europe: Overview of Low-Emission Zones.

- General Authority for Statistics (GASTAT). (2025, June 5). Total number of pilgrims performing Hajj 1446H (2025) reaches 1,673,230. Retrieved from the General Authority for Statistics website: https://www.stats.gov.sa/en/w/news/49?

- Habeebullah, T. M., Munir, S., Zeb, J., & Morsy, E. A. (2022). Source apportionment of atmospheric PM_{10} in Makkah, Saudi Arabia by modelling its ion and trace element contents with Positive Matrix Factorization and Generalised Additive Model. Toxics, 10(2), 119. https://doi.org/10.3390/toxics10020119

- Hijmans, R. J. (2023). terra: Spatial data analysis. R package version 1.7-65. https://CRAN.R-project.org/package=terra.

- IEA (2021). Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. International Energy Agency.

- Jaschinsky, K., 2024. How traffic increases urban heat stress. VCÖ – Mobilität mit Zukunft. (2024). Available online: https://vcoe.at/publikationen/vcoe-factsheets/detail/how-traffic-increases-urban-heat-stress.

- Khreis, H., et al. (2017). Health impacts of traffic-related exposures in urban areas: Understanding and managing the evidence. Environment International, 103, 1–7.

- Nayebare, S. R., Aburizaiza, O. S., Siddique, A., Carpenter, D. O., Hussain, M. M., Zeb, J., Aburizaiza, A. J., & Khwaja, H. A. (2018). Ambient air quality in the holy city of Makkah: A source apportionment with elemental enrichment factors (EFs) and factor analysis (PMF). Environmental Pollution, 243, 1791–1801. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.09.086.

- Nowak, D. J., & Dwyer, J. F. (2007). Understanding the benefits and costs of urban forest ecosystems. In Urban and Community Forestry in the Northeast (pp. 25–46).

- Pebesma, E. (2018). Simple features for R: Standardized support for spatial vector data. The R Journal, 10(1), 439–446. https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009.

- Pebesma, E. (2023). stars: Spatiotemporal arrays, raster and vector data cubes. R package version 0.6-3. https://CRAN.R-project.org/package=stars.

- Pierce, D. (2019). ncdf4: Interface to Unidata netCDF (version 4 or earlier) format data files. R package version 1.17. https://CRAN.R-project.org/package=ncdf4.

- R Core Team. (2024). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/.

- Shishegar, N. (2013). The impacts of green space on environmental health in urban areas. International Journal of Environmental Research, 7(1), 255–260.

- UNEP (2019). Electric Mobility: Taking the Pulse in Latin America and the Caribbean. (Relevant for global best practices in EV deployment.)

- USEPA (2014). EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 Fundamentals and User Guide. U.S. Environmental Protection Agency.

- Vardoulakis, S., et al. (2003). Modelling air quality in street canyons: A review. Atmospheric Environment, 37(2), 155–182.

- Watson, J. G., & Chow, J. C. (2007). Receptor models for source apportionment of suspended particles. Environmental Science & Technology, 39(16), 637–642.

- WHO (2016). Urban green spaces and health: A review of evidence. World Health Organization Regional Office for Europe.

- Wickham, H. (2016). ggplot2: Elegant graphics for data analysis. Springer-Verlag. https://ggplot2.tidyverse.org.

- Wickham, H., & Girlich, M. (2023). tidyr: Tidy messy data. R package version 1.3.0. https://CRAN.R-project.org/package=tidyr.

- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L. D. A., François, R., Grolemund, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T. L., Miller, E., Bache, S. M., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D. P., Spinu, V., … Yutani, H. (2019). Welcome to the tidyverse. Journal of Open Source Software, 4(43), 1686. https://doi.org/10.21105/joss.01686.

- Wickham, H., François, R., Henry, L., & Müller, K. (2023). dplyr: A grammar of data manipulation. R package version 1.1.3. https://CRAN.R-project.org/package=dplyr.

- Zhu, R., Wong, M. S., Guilbert, É., & Chan, P.-W. (2017). Understanding heat patterns produced by vehicular flows in urban areas. Scientific Reports, 7(1), 14323. https://doi.org/10.1038/s41598-017-14654-9.

محـــور

التحـــول نحـــو الحـــــج الأخضـــــر
(Green Pilgrimage)

نظام مبتكر لتخزين البرودة الحرارية العميقة ومياه جليدية لحفظ الأضاحي نحو حج مستدام وأخضر

جهاد حسن السادة - قسم الفيزياء، مركز الابحاث البينية للتنقية والكيماويات المتقدمة، جامعة الملك فهد للبترول والمعادن

A Novel Deep Cold Thermal Storage and Ice Slurry System for Green Sustainable Adahi Preservation Toward Sustainable and Green Hajj

Jihad Hassan Al-Sada - Physics Department, Interdispicnary research center for refining and advanced chemicals, King Fahd University of Petroleum and Minerals

*Corresponding author: E-mail (jhalsadah@kfupm.edu.sa)

الملخص

يولّد موسم الحج طلبًا مرتفعًا ومكثفًا على التبريد لحفظ لحوم الأضاحي، مما يخلق تحديات لوجستية وطاقية قد تؤدي إلى التلف وخسائر اقتصادية كبيرة. تقترح هذه الدراسة وتقيّم استراتيجية تخزين الطاقة الحرارية الباردة (TES) ذات مرحلتين، تهدف إلى فصل التبريد عن الطلب من خلال الشحن على مدى 120 يومًا والتفريغ خلال 4 أيام. تتضمن المرحلة الأولى تخزينًا عميق البرودة عند حرارة –10°م باستخدام محلول ملحي بتركيز 14% كلوريد الصوديوم كوسط لتغيير الطور، مخزنًا في وحدات مغلفة ومعزولًا لتحقيق فقد حراري موسمي لا يتجاوز 5%. أما المرحلة الثانية فتنتج طيناً جليديًا قابلًا للضخ (بنسبة جليد تقارب 50% عند 0°م) ليُستخدم في سلسلة تبريد متكاملة تشمل الغسل والتبريد (Rinse & Chill)، والتحفيز الكهربائي (ES)، والتبريد بالغمر. من المتوقع أن يختصر هذا النهج زمن الوصول إلى درجات الحرارة الآمنة مقارنة بالتبريد الهوائي التقليدي، مع تقليل المناولة اليدوية وتحسين مستوى النظافة، بينما يُحتفظ بالتبريد الهوائي كخيار احتياطي فقط. أظهرت الحسابات الأولية لتغطية 10% من إجمالي افتراض قدره مليوني أضحية أن حجم التخزين المطلوب يقارب 2,800–3,000م³، مع معامل عزل ≈ 0.04 W·m⁻²·K⁻¹، وتحقيق خفض فعلي في سعة الضواغط يبلغ 30 ضعفًا من خلال تحويل الحمل من أربعة أيام إلى أربعة أشهر. وتشير الدراسة الاقتصادية المبدئية إلى أن هذا النهج يمكن أن يكون مجدياً من الناحية الاقتصادية، ويُسهم في خفض ذروة الطلب الكهربائي، ويدعم دمج الطاقة المتجددة عبر الشحن خارج الموسم. كما يتيح التصميم إمكانية الموقع البعيد مع نقل الطاقة الباردة عبر أنابيب معزولة لتقليل متطلبات المساحة في منى

النطاق: تتناول الدراسة صياغة الأهداف، وتقديم النماذج الحرارية والاقتصادية لتحديد حجم التخزين والعزل وتحويل القدرة، مع مناقشة مسارات التنفيذ والتكامل مع عمليات الذبح القائمة. تحديدات: تعتمد النتائج على التحليل الهندسي والافتراضات؛ وتُعد التجارب الميدانية والتحقق على نطاق تجريبي خطوات أساسية مطلوبة لاحقاً ، كما أن الأداء المستهدف يُطرح كأهداف بانتظار التحقق التجريبي. الأهمية: يعالج هذا النهج تحديات حفظ لحوم الأضاحي في الحج، ويقدم نموذجًا قابلاً للتوسع لتقليل ذروة الأحمال وتحقيق التبريد المستدام في السياقات الموسمية أو ذات الطلب المؤقت.

Abstract

Hajj generates a short, intense cooling demand to preserve sacrificial meat (Adhiyah), creating logistical and energy challenges that can lead to spoilage and economic loss. This study proposes and evaluates a two tier cold thermal energy storage (TES) strategy that decouples cooling supply from demand by charging over ~120 days and discharging over ~4 days. The first tier uses a deep cold TES at –10 °C with a 14% NaCl brine as the phase change medium, stored in macro encapsulated modules and insulated to target ≤ 5% seasonal loss. The second tier generates pumpable ice slurry (≈ 50% ice fraction at 0 °C) as a service fluid for a packaged chilling train combining rinse and chill, electrical stimulation (ES), and immersion cooling. This integrated approach is expected to shorten time to safe core temperatures relative to conventional blast air chilling, reduce manual handling, and improve hygiene; blast air is retained only as a contingency/backup rather than the primary mode.

A preliminary sizing for 10% of an assumed 2 million Adhiyah indicates a storage volume on the order of ~2,800–3,000 m³, a design U value ≈ 0.04 W·m⁻²·K⁻¹, and an effective ~30× reduction in peak compressor capacity by shifting load from four days to four months. A techno economic screen suggests the approach can be cost competitive, reduce peak electrical demand, and facilitate renewable integration via off season charging. The system architecture also supports remote siting with

insulated piping to minimize space requirements near Mina.

Scope— We formulate objectives; present thermal and economic models for storage sizing, insulation, and power shifting; and outline implementation pathways and integration with existing slaughter operations. Limitations— Results are based on engineering analysis and assumptions; field trials and pilot scale validation are identified as essential next steps, and performance claims are framed as targets pending empirical verification. Significance— The approach directly addresses Hajj meat preservation logistics and offers a scalable template for peak shaving and sustainable cooling in seasonal or event driven contexts.

Keywords: cold thermal energy storage; phase change materials; ice slurry; immersion cooling; Adhiyah; Hajj logistics; peak shaving; food cold chain.

1. Introduction

The Hajj season creates an exceptional, short duration peak in slaughtering and meat preservation demand, with the Kingdom's Adahi project processing on the order of ~2 million animals within ~84 hours during peak operations. This scale compresses chilling, storage, and distribution tasks into a narrow time window and places intense, localized stress on utilities and logistics near Mina. In parallel, regulatory hygiene frameworks require carcasses to reach ≤ 7 °C (carcass meat) and ≤ 3 °C (offal) through a continuous temperature decline prior to market placement, targets that are challenging to meet at scale with conventional blast air chilling alone; (EU, 2004). Gulf guidance is even stricter for chilled meat core temperature ≤ 4 °C ((GSO), 2015). (SPA, 2025) (AlAwsat, 2025) (SFDA, 2021).

1.1. Problem.

Conventional chilled air systems are difficult to size economically for Hajj's compressed peak: very large chiller capacities are required for only a few days per year, creating under utilized assets, high peak electrical demand, and logistical bottlenecks on the slaughter floor and in cold rooms. Moreover, air only chilling provides relatively low heat transfer coefficients compared with liquid contact, prolonging time to target core temperatures and increasing handling complexity (Savell, 2012).

1.2. Proposed approach.

We propose a two tier cold thermal energy storage (CTES) architecture that decouples cooling supply from the Hajj demand peak. Tier 1 is a deep cold store at –10 °C using a 14% NaCl brine phase change medium, charged gradually over ~120 days to shift compressor work off season; Tier 2 generates pumpable ice slurry (~0 °C) during Hajj as a service fluid for a packaged chilling train combining: vascular rinsing (rinse and chill), electrical stimulation (ES), and immersion cooling, with blast air retained as a contingency only. This integration aims to accelerate heat removal, improve hygiene, and reduce manual handling compared with air only systems (Rashid, et al., 2023), (Yang, et al., 2021).

Evidence from seafood and poultry processing shows that ice slurry enhances convective and latent heat transfer at the product surface, often shortening cooling times and improving quality relative to flake ice or chilled water, which supports its role as a high power "service" coolant in Tier 2. In addition, rinse and chill has been reported to enhance blood removal, modulate early post mortem metabolism, and facilitate faster internal temperature decline, while ES helps manage rigor onset and mitigate cold shortening—together enabling more robust, regulation compliant chilling kinetics when paired with immersion cooling. Finally, a NaCl brine PCM is attractive at this temperature range because freezing point depression enables sub zero storage with substantial latent heat, and relevant property data (freezing point, density, latent heat) are tabulated for engineering design, (Ntzimani, et al., 2022), (Rowe, 2016), (Hwang, et al., 2022), (Hwang & Claus, 2020), (Bakker, et al., 2021), (IWS, 2019).

1.3. Theoretical framework

Our design rests on three pillars. (1) Load shifting via CTES: using phase change storage to move compressor work from a four day event to a multi month charging period, reducing required compressor capacity and peak electrical demand.(2) Phase change thermodynamics of brine: freezing point depression of NaCl solutions permits compact storage at –10 °C with recoverable latent heat for on demand ice slurry generation.(3) Heat transfer intensification at the carcass interface: ice slurry immersion provides high surface heat flux and uniform wetting; when combined with rinse and chill (vascular heat removal and hygiene) and Electric Stimulation, ES, (rigor mortis management), it is expected to shorten time to safe core temperatures relative to air only chilling—subject to pilot validation under Hajj conditions.

1.4. Objectives & scope

This paper (i) formulates the objectives and methodological framework for a two tier CTES solution tailored to Hajj meat preservation; (ii) sizes the storage and ice slurry generation requirements for a representative 10% of sacrifices; (iii) estimates insulation performance and seasonal losses for long term storage; (iv) analyzes peak load reduction and off season compressor sizing; and (v) outlines implementation pathways (including remote siting with insulated piping and priorities for pilot scale validation.

1.5. Contributions

The study's contributions are: (1) a system level design that integrates deep cold CTES with a packaged chilling train(rinse and chill + ES + ice slurry immersion) for Hajj; (2) an engineering economic screen indicating the potential for ~order of magnitude peak capacity reduction via seasonal load shifting; and (3) a practical roadmap for field trials to convert analytical findings into operational guidelines for Mina adjacent facilities.



Figure 6: Schematic of the two tiers temperatures thermal storage system

2. Methodology

2.1. Study design and assumptions

This study evaluates a two tier cold thermal energy storage (CTES) solution tailored to Hajj's intensifed processing window of 4 days.

- Tier 1 is a deep cold store at –10 °C using 14 % NaCl brine as the phase change medium, charged over ~120 days off season.

- Tier 2 converts stored cold to pumpable ice slurry (~0 °C) during Hajj to service a packaged chilling train: rinse and chill (vascular rinsing) ⊠ electrical stimulation (ES) ⊠ immersion cooling; blast air is retained as a contingency rather than primary mode.

This integration aims to achieve regulation compliant core temperatures more rapidly than air only chilling, with improved hygiene and reduced manual handling.

Target (base case). 10% of an assumed 2,000,000 sacrifices or 200,000 carcasses total over ~4 days; average carcass mass 25 kg; slaughter temperature 38 °C; preservation target ≤ 7 °C (carcase meat); Gulf guidance: ≤ 4 °C for chilled meat core within 24 h.

Ambient boundary condition. Summer conditions representative of Mina/Mecca (dry bulb ~30–41 °C; wet bulb ~20–32 °C) are used for insulation sizing and storage loss analysis (monthly ranges per national climate reports).

Storage media properties. Brine properties at 14% NaCl (density, freezing point depression, latent heat) are taken from standard brine tables and engineering data.

2.2. Objectives and theoretical framework

Objectives. (i) Quantify the cooling duty to bring carcasses from ~38 °C to regulation compliant temperatures; (ii) size Tier 1 storage volume and Tier 2 ice slurry service; (iii) estimate insulation U value to limit seasonal losses to ≤ 5%; (iv) quantify load shifting and compressor capacity reduction from 4 day to 120 day operation; (v) outline an implementation and pilot plan for field validation.

Framework. The methodology couples:

- Load shifting via CTES: Store latent cold off season and discharge at high power during Hajj.

- Phase change thermodynamics: NaCl brine at –10 °C provides sub zero storage with recoverable latent heat for on demand ice slurry generation.

- Heat transfer intensification: Ice slurry immersion provides high surface heat flux; rinse and chill accelerates internal cooling and improves hygiene; ES mitigates cold shortening and supports more aggressive chilling

Figure 7 gives a visual account of a CTES system located a few kilometers from Mina and delivers the cooling fluids to the meat facilities in Mina



Figure 7 Visualization of a remote a brine ice thermal storage that is located away from Mina .with heat transfer fluids' connection to the final use facilities or slaughterhouses

2.3. Utility and Utilization of Thermal Energy Storage

The primary objective of thermal energy storage (TES) is to decouple the timing and power levels of cooling from energy consumption. By accumulating energy over an extended period, the system can use smaller, more efficient cooling units that operate continuously. This significantly reduces the required equipment capacity and peak electrical power, with the reduction factor being approximately the ratio of the long charging period to the

short discharge period.

$$Capacity\ Saving = \frac{Charging\ Period}{Discharging\ Period} = \frac{120days}{4\ days} = 30X$$

The factor could be increased by lengthening the charging period (up to 87X=350/4). This reduction factor also applies for the peak electrical power used.

This approach offers several key advantages for the national Saudi power grid and the Hajj cooling operation:

2.5. - Delivers High Cooling Power on Demand: The stored thermal energy can be discharged in a short time to provide the very high cooling power needed during the Hajj season, a logistical requirement that conventional systems struggle to meet.

- Increases Efficiency: A smaller, highly efficient cooling system can be used for continuous operation, allowing for the use of more energy-efficient compressors and other measures. The system can also utilize lower ambient temperatures, by buffering the rejected heat, which further improves energy efficiency.

- Reduces Electrical Peak Load: By shifting the majority of the cooling energy demand to the off-season, the system significantly lowers the peak electrical load on the power grid during Hajj. This can lead to lower energy costs, as power demand is typically lower during the off-season.

- Enables Green Energy: The continuous, long-term charging period allows for the integration of intermittent renewable sources, such as solar power, to make the cooling process more sustainable. The solar energy is sourced through the national power grid and buffered in a local one-day battery buffer.

2.4. Economic Perspective of the System

The value proposition hinges on (i) the value of avoided spoilage and (ii) the capital and operating savings from downsized primary compressors and peak demand reduction. Reported processing capacities for the Adahi program highlight the extreme peak intensity (up to ~2 million animals over ~4 days), underscoring the need for seasonal shiftingrather than building massive, underutilized peak plants. A simple analysis compares:

- With CTES: smaller, efficient compressors run off season; insulated store; ice slurry generators; distributed immersion tanks; limited batteries to buffer daily PV variability.

- Without CTES: very large peak chilling plant sized for 4 day maximum, carrying low annual utilization and higher risk of part year degradation.

The economic cost of building such a system must be justified by the financial benefits of the saved meat. The announced numbers do not explicitly state the loss fraction of the sacrifices. There is an announced number of Adhahi utilized/exported to the needy which is around 820 thousand during 1446 AH season when the pilgrims were around 1,670,000 (SPA, 1446). These numbers suggest 50% utilization but one cannot conclude that the lost/spoiled fraction is as much since some fraction is locally distributed or privately processed. Therefore, this study conservatively assumes a 10% loss rate to estimate the value of the saved sacrifices. Table 1 provides an economic breakdown of the losses that the proposed cooling system aims to mitigate.

Table 1 Economic Estimate of the Saved Sacrifice

Parameter	Unit	Value
Assumed pilgrims in Hajj Season	#	2 million
Sacrifice per pilgrim	-	1
Cost of Sacrifice	SAR, ﷼	800
Assumed loss due to spoilage	%	10%
Total Value of Lost Sacrifices	SAR, ﷼	160,000,000
Total Value of Lost Sacrifices	USD, $	43,000,000
Target for Daily Processing	Animal/day	٥٠,٠٠٠

2.5. Remote siting and fluid conveyance

To relieve land constraints near Mina, the Tier 1 store can be remotely sited with insulated Heat Transfer Fluids (like glycol water blend) pipelines feeding slaughter complexes. This reduces congestion and permits industrial park siting of compressors, insulation works, and maintenance. The packaged chilling train remains near the slaughter lines, supplied by ice slurry headers with return lines to re chill the carrier fluid. This makes the proposed project in alignment with the Adahi program's centralized/clustered operations model and supports practicality.

2.6. Cooling Load Model

To size the thermal storage system, we first determine the total thermal energy that must be removed from the carcasses to cool them from slaughter temperature of 38°C to the cold storage temperature of 7°C, (James & James, 2002) (Hui, 2012). Specific heat of the meat is used with and accounting for losses in cooling delivery and storage delivery gives the total thermal eneryg, in meg jouls MJ,:

$$Q_{cooling} = N_{animal} * m_a * (T_f - T_i) * c_{meat} * (1 + Loss_{delivery}) * (1 + Loss_{storage})$$

This energy is then converted into the required volume of brine based on its latent heat.

Assuming a 60% fill factor for ice within the total storage volume—a realistic estimate that accounts for the spherical containers, pumps, and other structural elements—we can calculate the required dimensions of the storage building. In geometry, the smallest surface to volume ratio is the sphere followed by the cube. Cube has flat surfaces, which are easy to manufacture. However, a practical design with a square footprint is chosen due to limitations like a 10-meter height. As could be seen from Table 2, the resulting size is comparable to a three-story small villa, which is reasonable for a system covering 10% of the total Adahi sacrifices. The assumed thermal loss from the storage surface will determine the required insulation level.

2.7. Storage media

The selection of a phase-change medium is crucial for a compact and energy-dense thermal storage system. While water has a very large latent heat of freezing, its 0°C phase change temperature is not ideal for the deep cooling required by this system. For this reason, an inexpensive salt like sodium chloride NaCl is used to make the brine as the storage medium. The heat transfer fluid that charges or discharges the thermal energy is typically a glycole water mixture. Adding salt to water depresses its freezing point, making it suitable for lower-temperature storage applications. The latent heat is slightly lowered as a result, a property that is well-modeled in numerous studies (Devireddy, et al., 2002). To initiate freezing, the cooling temperature must drop 5-7°C below the phase change point to overcome sub-cooling (Lu, et al., 22-25 August 2018). In this study, I have used tabulated freezing and density data, (Haynes, et al., 2017) .

For the physical storage format, this study recommends encapsulating the brine solution in polyethylene or stainless steel spheres, as shown in Figure 9. This design facilitates a fast discharge of the stored cold thermal energy, and the gas space within each ball accommodates the volume expansion that occurs upon freezing. Ice on coil format is more common, but the discharging power could be insufficient. Bench test should confirm the adequacy of thermal power density, kW/m3, is adequate.

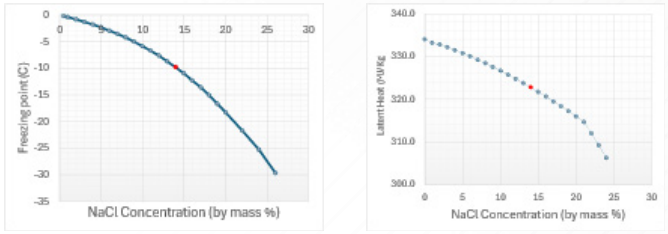


Figure 8 Left: Lowering the freezing point by salt concentration (Haynes, et al., 2017); Right: Small decrease of the latent heat (The Engineering ToolBox (2007), n.d.)

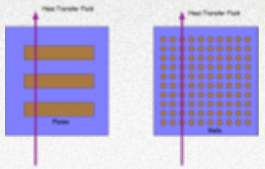


Figure 9 Left: Module storage system: plate modules & ball modules; Right: Macro-encapsulated PCM (Stadler, 2019)

Table 2 Sizing up the long term Deep Thermal Storage

Parameter	Unit	Value	Notes
Assumed number of Sacrifices	Animal	200,000	10% of assumed total
Average weight	Kg	25	
Specific heat capacity	kJ/kg/C	3.2	Less than water of 4.2
Initial Temperature	C	38	Life temperature
Final Temperature	C	7	Preservation temperature
Theraml Energy	MJ/carcass	2.457	-see storage media-
Latent heat per kg of 14% NaCl Brine	kJ/kg	287	-see storage media-
Density of the Brine	kg/liter	1.1198	-see storage media-
Latent heat per liter	kJ/liter	322	-see storage media-
Total cooling thermal energy	MJ	496000	
Loss during the cooling delivery	%	10%	For piping for example
Total cooling thermal energy (Q)	MJ	545600	
(compressors in real time)	Ton of Ref	1623.8	If cooling done in real time, 4 days
Loss from storage surface	%	5%	During the 120 days
Total cooling thermal energy	MJ	572880	
Compressors for storage	Ton of Ref	56.8	During the 120 days
Compressor reduction factor	X	28.6	
Ice volume	m3	1779.1	
Ice fraction from total volume	%	60%	(ice + pumps/heat exchangers)
Thermal Storage	m3	2846.6	
Cube side	m	14.2	Least flat surface area
Square area for 10m high building	m2	284.7	Practical building consideration
Square side for 10m high building	m	16.9	Internal side

2.8. Insulation System & Seasonal Storage Efficiency

Any thermal storage system suffers from slow heat losses over the storage period, a factor even more critical for the long-term system proposed here. To estimate the required insulation level, we assume a 5% thermal loss (or 95% storage efficiency, ϵ) over the entire 120-day storage period. This is a demanding standard, given that other seasonal systems, (Yang, et al., 2024), have efficiencies of 88%-93% but it is chosen to address the unique challenge of an extremely short, 4-day discharge duration. The analysis assumes an external ambient temperature of 40°C and an internal temperature of (-10°C), a gradient based on the average temperatures of Mina Valley; see Table 3. The external temperature could be lowered, to 30°C, using cooling jacket at wet-bulb temperature powered by evaportive cooling, but a simpler model is used for this analysis. The required insulation value (u-value of 0.0448 W/m2/K), as shown in the following analysis, is demanding.

$$Loss\ Fraction = \frac{Power * time}{cold\ Energy} = \frac{TemperatureGradient * Area * thermalConductivity/wall.thickness * time}{Stored\ Thermal\ energy}$$

$$\%_{loss} = 1 - \epsilon = \frac{Q_{loss}}{Q_{store}} = \frac{\Delta T * A * \kappa/L * t}{Q_{store}} =$$

$$U.Value = \left[\frac{\kappa}{L}\right] = \frac{\%_{loss} * Q_{store}}{\Delta T * A * t} = \frac{5\% * 572880MJ}{50 * 1244m^2 * 120 * 24 * 60^2 S} = 0.0448\ Wm^2/K$$

However, such an insulation value is achievable because the thermal storage operates at ambient pressure, unlike the pressurized Liquified Natural Gas, LNG, storage systems that have similar U-value requirements. The storage, which must be structurally sound to hold a large volume of encapsulated brine and the heat transfer fluids. This insulation can be done and with with locally sourced materials.

The large thermal gradient also creates a significant vapor pressure gradient, which must be addressed in the design. A continuous metallic vapor barrier should be installed to prevent moisture from building up within the insulation, as moist insulation has a shorter life and a much lower thermal performance (Tariku, et al., 2023). Given the long-term design lifetime of say 50 years, polyisocyanurate (PIR) is the preferred insulation material over polyurethane (PUR) for its superior moisture resistance and a 50-year service life when well-protected. Aereated autoclaved concrete, AAC, is a solid insulation with unlimited lifetime if well-protected, (Chen, et al., 2021). The two could be combined to achieve the required insultion.

The required insulation thickness is nearly one meter, but this could be drastically reduced (by 5-10X) by using vacuum insulation panels (VIPs). VIPs are highly efficient but have a limited lifespan of 10-20 years and are vulnerable to puncture failure during installation unless well protected and the vacuum actively maintained with intermittent vacuum equipment.

2.9. Electrical model and compressor sizing (Tier 1 charging)

To estimate the electrical load for the refrigeration equipment, one can use the Carnot coefficient of performance (COP) and derate it to real COP by the common 45% factor. This calculation shows the compressor requires a 90kW load. This electrical energy can be sourced from a grid that is powered by solar-charged batteries, making the entire cooling process sustainable. This is a key benefit for both the local power grid and the overall environmental impact. Some cost analysis of cooling equipmet and the batteries has been performed and contrasted to non-storage cooling equipment. This prelimanry analysis favors the proposed system.

Spreading the thermal enery Q over 120 days gives an average electric demand of ⊠90 kW⊠50TOR charging (excluding auxiliaries). Off season charging enables renewable integration (e.g., PV via the grid plus daily battery buffer) while shaving peak during Hajj. The average cooling rate needed over 4 days for Tier 2 service is ~470 TR. This nearly 30X reduction means large saving in equipment cost and peak electrical demand.

Table 3: Monthly Climate Averages: Mina Valley vs. Mecca (https://beta.ncm.gov.sa, n.d.)

Month	Mina DBT (C)	Mina WBT (C)	RH (%)	Mecca DBT (C)	Mecca WBT (C)	RH (%)
Jan	22–25	14–17	45–55%	23–25	15–17	40–50%
Feb	24–27	15–18	40–50%	25–27	16–18	35–45%
Mar	27–30	17–20	35–45%	28–31	18–21	30–40%
Apr	31–34	20–23	30–40%	32–35	22–25	25–35%
May	35–38	23–26	25–35%	36–39	25–28	20–30%
Jun	37–40	24–28	20–30%	38–41	27–30	15–25%
Jul	38–41	26–30	25–35%	39–42	28–32	20–30%
Aug	37–40	25–29	30–40%	39–42	28–32	25–35%
Sep	35–38	23–27	35–45%	37–40	26–30	30–40%
Oct	32–35	20–24	40–50%	33–36	23–27	35–45%
Nov	27–30	17–21	45–55%	28–31	19–22	40–50%
Dec	23–26	15–18	50–60%	24–26	16–18	45–55%

Table 4: Computing the insulation value to achieve 5% maximum loss over the storage period

Parameter	Unit	Value	Notes
Storage height	m	10	h, from Table 2
Square side	m	16.9	s, from Table 2
Volume	m3	2847	V=s*s*h
Surface Area	m2	1244	A.tot=h*s*4 + s*s*2
Ambient Temperature	C	40	T.h, Table 4
Internal Temperature	C	-10	by design
Latent heat per kg of 14% NaCl Brine	kJ/kg	322	see text
Total cooling thermal energy	MJ	572880	Table 2
Loss from storage surface	%	5%	assumed
Total cooling thermal energy	MJ	578348.2	revised up
Loss during the storage duration	MJ	28917.41	based on 5%
Storage duration	days	120	assumed
U-Value	W/m2/K	0.0448	computed, see text
AAC Conductivity	W/m/k	0.12	Literature, (Pihelo & Kalamees, 2025)
Polyisocyanurate (PIR) conductivity	W/m/k	0.022	Literature, (Tariku, et al., 2023)
AAC thickness	cm	50.0	
PIR thickness	cm	45.0	
Total u-value	W/m2/K	0.0406	
AAC specific cost	$/m3	65.0	Assumed cost now
PIR specific cost	$/m3	360.0	Assumed cost now
Insulation material cost	Millon $	0.242	Area*thick* cost
Insulation material cost	Million SAR	0.907	
COP.Carnot	1	4.926	$COP_{C,R} = T_{low}/\Delta T$
COP.real	1	2.22	$COP_{real} = 0.45 * COP_{C,R}$
Electrical load per day	kwh/day	2153.7	$E_{el} = Q_{day}/\mathrm{COP}_{real}$
Electrical power	kW	89.7	$P_{el} = \mathrm{E}_{el}/\mathrm{day}$
Battery specific cost -system level	$/kWh	300	Assumed cost now
Battery cost	M$	0.646	
TOR specific cost in large systems	$/TOR	14,000.00	Assumed cost now
Cooling system cost - with storage	M$	0.796	
Cooling system cost (no storge)	M$	22.733	
Insulation, refregeration & batteries	M$	1.684	Partial cost
Insulation, refregeration & batteries	Million SAR	6.314	Partial cost



Figure 10 Immersion Cooling Schematic

2.10. Ice slurry generation and packaged chilling train (Tier 2)

During discharge, brine cooled heat exchangers generate a pumpable ice slurry at ~0 °C (target ~50% ice fraction) to feed an immersion tank with controlled agitation. Literature across seafood and poultry processing shows ice slurry systems achieve higher heat transfer coefficients and faster chilling vs. flake ice/water, supporting their use as a high power "service" coolant.

We propose the continuous temperature decline, the primary chilling sequence :

1. Rinse and Chill (vascular rinsing) immediately post exsanguination to enhance blood removal, hygiene, and early internal cooling kinetics;

2. Electrical Stimulation (ES) to accelerate pH decline and mitigate cold shortening, enabling more aggressive chilling without tenderness penalties;

3. Immersion cooling in ice slurry with agitation to rapidly remove sensible heat;

4. Blast air held as a contingency/backup step for load levelling or line balancing—not the primary mode.

Evidence indicates that rinse and chill improves quality and food safety attributes, and ES allows more rapid chilling while managing rigor; the combined train is expected to shorten time to target temperatures versus air only approaches, pending pilot validation under Hajj conditions.

The deep cooling system is designed to produce ice slurry during the Hajj season. Ice slurry is highly effective for cooling shrimp and fish tanks (Ntzimani, et al., 2023). Its flowable nature allows pumping through pipes, eliminating manual handling. Direct contact with the carcass provides superior heat transfer compared to still air and is expected to outperform the blast-chilled air. The slurry's ice flakes, with their large surface area,

cool the carcass at 0 °C while melting, offering faster heat removal than ice blocks or cubes (Qiu, et al., 2025). Figure 10 illustrates a cylindrical tank filled with slurry and equipped with a helical agitator near the inner wall, driven by a motor via an upper or lower ring. The carcass is lowered from the top and agitated until its core temperature approaches the target level. This method is one option. Alternatively, the -10 °C fluid could power blast-chilled air, maintain storage walls at 0 °C, or serve other freezing and cooling applications.

2.11. Implementation and Field Validation Plan

Because current results are engineering analyses based on assumptions, we specify a staged validation plan:

1. Bench scale: Property verification for 14% NaCl brine (latent capacity, density, effective subcool margin), encapsulation discharge tests to confirm kW·m-3; coupon level U value measurements for the PIR + AAC + vapor barrier assembly.

2. Pilot at a slaughter line: Compare packaged train (rinse and chill + ES + ice slurry immersion) to blast air baseline; instrument core and surface temperatures, pH, drip, and microbiological outcomes; verify continuous decrease to regulatory targets.

3. Operational trial (Hajj window): Validate throughput, manpower, cleaning/sanitation, and robustness of remote siting with pipeline conveyance.

4. Techno economic update: Replace assumptions with measured COPs, U values, and duty cycles; refine peak/average power profiles and confirm grid impact benefits.

3. Results and Discussion

3.1. Key quantitative outcomes

Using the base (10% of 2 million caracasses) at 25 kg each, cooled from 38 °C → 7 °C, with 10% delivery losses and ≤5% seasonal storage loss—the total sensible cooling requirement is:

$$Q_{gross} \approx 5.73 \times 10^5 \text{ MJ}.$$

If discharged uniformly over *4 days (96 h)*, the *average cooling rate* is:

$$\bar{P}_{cool,discharge} = \frac{Q_{gross} * \epsilon}{4\ days} \approx 1.66\ MW_{th} \approx \mathbf{472}\ \text{TR}$$

$$\bar{P}_{cool,charge} = \frac{Q_{gross}}{120\ days} \approx 199\ kW_{th} \approx \mathbf{57}\ \text{TR} \rightarrow 90 kW_{el}$$

Storage volume and geometry. With a *14% NaCl* phase-change medium (latent ≈ 287 kJ/kg; density ≈ 1.1198 kg/L) and a *60%* effective energy-packing fraction, the required *net* storage volume is:

$$V_{store} \approx 2.8\text{–}3.0 \times 10^3 m^3 = (core: 16.9\ \text{m} \times 16.9\ \text{m} \times 10\ \text{m}) = (building: \sim 20\ \text{m} \times 20\ \text{m} \times 10\ \text{m}$$

Insulation performance. To cap seasonal loss at ≤5% over *120 days* with *−10 °C* internal and *~40 °C* ambient, the target *overall U-value* is:

$$U_{target} = 0.0401 W/m^2/K \rightarrow (30cm_{AAC} + 45cm_{PIR} + 20cm_{AAC} + vapor\ barrier)$$

It is achievable with a multi layer assembly stated in the equation including a continuous metallic vapor barrier. Vacuum insulation panels could reduce thickness but at higher handling and lifecycle risk; the ambient pressure PIR/AAC approach is robust and locally sourcable.

Load shifting, compressor savings. Seasonal charging over 120 days and discharging over 4-days yeilds a ~30X saving in compressor stocks and peak electrical demand. The compressor work is shfited off season which flattens Hajj-season electrical peaks and allow high efficiency equipment selection.

3.2. Process performance of the packaged chilling train

During discharge, Tier 2 converts stored cold to pumpable ice slurry (~0 °C; ~50% ice) that services a packaged sequence:

1. Rinse and Chill (vascular rinse) to improve hygiene and accelerate early internal cooling;

2. Electrical Stimulation (ES) to manage rigor and mitigate cold shortening, enabling more

3. assertive chilling;

4. Immersion cooling in agitated slurry to intensify surface heat transfer;

5. Blast air retained only as a contingency/backup for line balancing.

This integration is expected to shorten time to target core temperatures versus air only chilling, reduce manual handling, and support regulatory compliance (continuous temperature decrease to ≤ 7 °C carcass. We intentionally avoid claiming specific hour scale times until pilot data are collected under Hajj conditions .

3.3. Economic signal and grid implications

A conservative 10% spoilage assumption implies an avoided loss value ≈ SAR 160 million per season. The indicative partial capital for insulation, refrigeration, and batteries in this study is ~SAR 6.3 million (see Table 4), excluding site/civil works and balance of plant. Compared with a conventional peak plant sized for the full 4 day demand, the CTES solution:

1. Eliminates most peak compressor capacity, replacing it with continuous off season charging;

2. Reduces peak electrical demand during Hajj;

3. Facilitates renewable integration (off season charging via grid connected PV and modest battery buffering). A full techno economic model should incorporate equipment counts, auxiliaries, CIP, labor, and contingencies; the prospect remains favorable given the magnitude of avoided losses and peak shaving benefits.

3.4. Implementation notes and limitations

- Remote siting: Locating Tier 1 storage outside Mina with insulated fluid pipelines to slaughter complexes reduces on site land needs and centralizes maintenance.

- Operations: The packaged train (rinse and chill + ES + immersion) remains line side, minimizing carcass movement and manual handling.

- Limitations: Results are based on engineering analysis and assumptions; performance claims are targets pending validation.

- Validation pathway: (i) Bench tests for brine module discharge power and insulation U values; (ii) Pilot line trials instrumenting core temperature trajectories, pH, drip, and microbiology against a blast air baseline; (iii) Operational trial during Hajj to verify throughput, sanitation, manpower, and reliability; (iv) Model updatewith measured COPs, losses, and duty cycles to finalize techno economics. In summary, the proposed CTES architecture can deliver ~472 TR average cooling over the Hajj window with a ~3,000 m^3 store and U ≈ 0.045 W m-2 K-1, while shifting compressor work off season (~30×). Coupled with the packaged chilling train, it offers a practical pathway to reduce spoilage, lower peak grid demand, and improve hygiene, subject to pilot scale validation. Figure 11 Left illustrates the temperature and time scales associated with the proposed TES strategy, highlighting the two-tier cooling approach. Figure 11 Right compares the electrical power demand of the proposed TES-based system with that of a conventional cooling system. The results indicate a substantial reduction in peak electrical load, which can enable the use of high-efficiency equipment and facilitate integration with renewable energy sources.

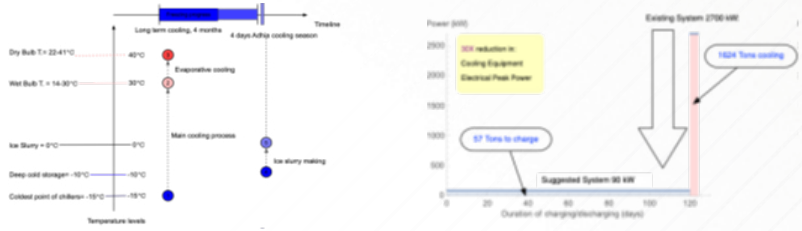


Figure 11: Left: Temperature and time scales vision of the system; Right: Plot of electrical power levels by the proposed system and the conventional cooling system

Conclusions

This study presented the design and scaling of a cold thermal energy storage (TES) system to meet approximately 10% of the cooling demand for Adhiyah during a typical Hajj season serving two million pilgrims. The proposed system employs a two-tier thermal storage strategy. The first tier consists of a long-term storage unit operating at –10 °C, utilizing a 14% NaCl brine solution as the phase-change medium. This approach offers a cost-effective solution with spherical encapsulations immersed in a glycol-water bath to enable rapid discharge. The second tier converts the stored cold energy into ice slurry at 0 °C, which is then used in an immersion cooling process. The slurry can be pumped through insulated pipelines, allowing for automation and flexibility in cooling operations.

The estimated storage volume (20 m × 20 m × 10 m) and insulation requirements (U-value of 0.04 $W/m^2 \cdot K$) were calculated to maintain a loss fraction of approximately 5% over 120 days of storage. Such an insulation level can be achieved using conventional, locally available materials. The system design achieves a 30-fold reduction in peak cooling capacity by leveraging a long charging period (4 months) against a short discharging period (4 days).

This significant reduction in primary cooling equipment size enables the use of high-efficiency chillers and creates the potential for integrating solar energy as the primary energy source when combined with battery storage.

Future work should include detailed techno-economic analysis, optimization of system components, and pilot-scale implementation to validate performance under real Hajj operating conditions.

Recommendations

1. Conduct a comprehensive economic assessment of the additional cooling capacity required now or for future Hajj seasons, including:

   a. Charging and discharging periods of thermal storage.

   b. Required cooling capacity and peak demand scenarios.

   c. Optimal location of cooling facilities and insulated piping routes for cooling capacity transfer.

   d. Identification of other potential applications that could benefit from cold thermal energy storage.

2. Perform a detailed technical and economic feasibility study for the proposed thermal storage systems, focusing on:

a. Design of deep thermal storage structures, including storage media, insulation, and expected lifetime (30–50 years).

b. Cooling levels and methods suitable for different applications (e.g., fine-tuning at –10 °C and 0 °C as used in this study).

c. Integration of cooling equipment with renewable energy sources (e.g., solar power and battery storage) to minimize impact on the grid.

d. Evaluation of ice slurry machines, immersion cooling systems, and other equipment for rapid carcass cooling during Adhya processing.

3. Develop and implement a pilot system as an additional cooling resource, incorporating:

a. Thermal storage with appropriately sized cooling equipment.

b. Strategic location (e.g., outside Mina) with insulated piping to service key areas.

c. Ice slurry machines powered by deeply chilled fluids.

d. Immersion systems for rapid chilling processes.

e. Optional battery storage to enable remote solar energy utilization.

References

- THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION,, 2004. REGULATION (EC) No 853/2004 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL. [Online], Available at: https://eur-lex.europa.eu/legal content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32004R0853&qid=1754380290557, [Accessed 08 2025].

- The Engineering ToolBox (2007), n.d. Sodium Chloride Water Solutions. [online]. [Online], Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/sodium-chloride-water-d_1187.html, [Accessed 19 08 2025].

- Devireddy, R. V., Leo, P. H., Lowengrub, J. S. & Bischof, J. C., 2002. Measurement and numerical analysis of freezing in solutions enclosed in a small container. International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 45, p. 1915–1931.

- Stadler, M. S. a. I., 2019. Handbook of Energy Storage. Berlin: Springer-Verlag.

- Lu, W., Guizhi, L., Xianghai, X. & Wong, H., 22-25 August 2018. Investigation on Ternary Salt-Water Solutions as Phase Change Materials for Cold Storage. Hong Kong, s.n.

- James, S. J. & James, C., 2002. Meat refrigeration. s.l.:Woodhead Publishing Limited.

- Hui, Y. H., 2012. Handbook of Meat and Meat Processing, Second Edition (2012, CRC Press) - libgen.li. s.l.:CRC.

- Anon., n.d. CRC Standard Mathematical Tables. s.l.:s.n.

- Haynes, W. M., Lide, D. R. & Bruno, T. J., 2017. CRC handbook of chemistry and physics. s.l.:CRC.

- https://beta.ncm.gov.sa, n.d. Saudi National Center for Meteorology, Hajj health studies, s.l.: s.n.

- Yang, T., Worlitschek, J. & Fiorentini, M., 2024. Techno-economic optimization and feasibility of PCM-based seasonal thermal energy storage systems for district heating and cooling. Energy & Buildings, Volume 324, p. 114925.

- Tariku, F., Shang, Y. & Molleti, S., 2023. Thermal performance of flat roof insulation materials: A review of temperature, moisture and aging effects. Journal of Building Engineering, Volume 76, p. 107142.

- Ntzimani, A. et al., 2023. Slurry ice as an alternative cooling medium for fish harvesting and transportation: Study of the effect on seabass flesh quality and shelf life. Aquaculture and Fisheries, Volume 8, p. 385–392.

- Qiu, Y. et al., 2025. Energy-efficient chilling and storage of beef using slurry ice: Assessing of chilling efficiency and quality changes. International Journal of Refrigeration, Volume 174, p. 127–137.

- Pihelo, P. & Kalamees, T., 2025. Performance evaluation and development of prefabricated insulation elements for renovation of apartment buildings with autoclaved aerated concrete external walls. Energy & Buildings, Volume 332, p. 115439.

- (GSO), G. S. O., 2015. Slaughtering Animals According to Islamic Rules, Riyadh: Gulf Standardization Organization.

- SPA, 2025. Kingdom›s Adahi Project Achieves Full Operational Readiness for Hajj 1446 AH. [Online], Available at: https://www.spa.gov.sa/en/N2333193, [Accessed 18 08 2025].

- AlAwsat, A., 2025. Saudi Arabia›s Adahi Aims to Carry out 950,000 Sacrifices within 84 Hours. [Online], Available at: https://english.aawsat.com/gulf/5151752-saudi-arabia's-adahi-aims-carry-out-950000-sacrifices-within-84-hours, [Accessed 18 08 2025].

- SFDA, 2021. Guidelines of Meat Safety and Preservation, Riyadh: Saudi Food and Drug Adminsteration.

- Savell, J. W., 2012. Beef Carcass Chilling: Current Understanding, Future Challenges, s.l.: Texas A&M AgriLife Extension Service.

- EU, 2004. Regulation (EC) No 853/2004 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 laying down specific hygiene rules for food of animal origin, Luxembourg: Publications Office of the European Union.

- Rashid, F. L. et al., 2023. Recent Advances on The Applications of Phase Change Materials in Cold Thermal Energy Storage: A Critical Review. Journal of Composites Science, 7(8), p. 338.

- Ntzimani, A. et al., 2022. Seasonal Pattern of the Effect of Slurry Ice during Catching and Transportation on Quality and Shelf Life of Gilthead Sea Bream. Journal of Marine Science and Engineering, Volume 10, p. 443.

- Yang, T., King, W. P. & Miljkovic, N., 2021. Phase change material-based thermal energy storage: Perspective. Cell Reports Physical Science, Volume 2, p. 100540.

- Rowe, E., 2016. INITIAL INVESTIGATION OF ICE SLURRY AS AN ALTERNATE CHILLER MEDIUM IN POULTRY PROCESSING, s.l.: Georgia Institute of Technology.

- Hwang, K. et al., 2022. Vascular rinsing and chilling carcasses improves meat quality and food safety: a review. Journal of Animal Science and Technology, 64(3), pp. :397-408.

- Hwang, K. E. & Claus, J. R., 2020. Vascular Rinsing and Chilling Carcasses Improves Meat Quality and Food Safety, s.l.: MPSC Inc.

- Bakker, C., Underwood, K., Grubbs, J. K. & Blair, A., 2021. Low-Voltage Electrical Stimulation of Beef Carcasses Slows Carcass Chilling Rate and Improves Steak Color. Foods MDPI, Volume 10, p. 1065.

- IWS, 2019. Sodium-Chloride-Brine-Table, Indianapolis, USA: Industrial Water Solutions.

- Chen, G. et al., 2021. Effect of Pore Structure on Thermal Conductivity and Mechanical Properties of Autoclaved Aerated Concrete. Materials MDPI, Volume 14, p. 339.

- SPA, 1446. Adahi Concludes Hajj Season with Distribution of over 360,000 Kg of Meat. [Online], Available at: https://www.spa.gov.sa/en/N2339208#, [Accessed 12 8 2025].

إطار عمل تحفيزي باستخدام تقنية البلوك تشين لتعزيز الممارسات البيئية المستدامة في مدن الحج الذكية

صابرين أحمدجي*[1]، هنوف الغانمي[2] - قسم الامن السيبراني، جامعة ام القرى*[1] - قسم نظم المعلومات، جامعة الملك عبدالعزيز[2]

A Blockchain-Based Reward Framework to Promote Sustainable Behaviour in Smart Hajj Cities

Sabreen Ahmadjee*1, Hanouf Al Ghanmi2 - 1*Department of Cybersecurity, Umm Al-Qura University - 2Information Systems Department, King Abdulaziz University

*Corresponding author: E-mail (smahmadjee@uqu.edu.sa)

الملخص

يُعد موسم الحج من أكبر التجمعات البشرية الدورية في العالم، وله تأثير كبير على مرافق مدينتي مكة المكرمة والمدينة المنورة، لا سيما في إنتاج النفايات واستهلاك الطاقة وانبعاثات النقل. يُعدّ تعزيز الممارسات المستدامة بين الحجاج أمرًا بالغ الأهمية لتخفيف الضغط البيئي وتعزيز مفهوم المدن الذكية والصديقة للبيئة. يسعى هذا البحث إلى توفير إطار عمل تحفيزي قائم على تقنية سلسلة الكتل (البلوك تشين)، حيث يشجع على ثلاثة سلوكيات مستدامة أساسية بين الحجاج: إعادة التدوير، وترشيد استهلاك المياه والكهرباء، واستخدام وسائل النقل العام.

ويهدف إلى الاستفادة من الحوافز الرقمية والبيانات الحالية لتعزيز السلوكيات البيئية الصحية خلال موسم الحج. يجمع الحل المقترح بين مصادر البيانات المدعومة بإنترنت الأشياء، بما في ذلك صناديق النفايات الذكية، وعدادات المرافق، ونقاط عبور الاتصالات قريبة المدى مع إطار عمل قائم على تقنية البلوك تشين. تعمل تقنية حوافز السلوك، المدعومة بالعقود الذكية، على أتمتة توزيع ثلاثة أنواع من الرموز: رموز إعادة التدوير، ورموز الطاقة الخضراء، ورموز الحركة البيئية. يكسب الحجاج هذه الرموز ويحتفظون بها في محفظة رقمية مرتبطة ببطاقة هوية الحج الخاصة بهم، والتي يمكن استبدالها بمزايا مثل الخصومات، وحقوق النقل، أو الإقرار. تركز تطبيقات الحج الحالية بشكل رئيسي على إدارة الحشود، والتعليم الديني، والتنسيق اللوجستي، مع تكامل محدود أو غائب لأطر الاستدامة القائمة على الحوافز. على الرغم من أن بعض مبادرات السياحة والمدن الذكية تشير إلى تكامل تقنية البلوك تشين، إلا أنه على حد علمنا، لم يتم إنشاء إطار عمل شامل وعملي للبلوك تشين لتعزيز الممارسات المستدامة خلال الحج

يُعالج هذا المشروع هذه الفجوة من خلال تقديم إطار عمل لحوافز تقنية البلوك تشين، وإظهار جدواه التكنولوجية وأثره الاجتماعي من خلال دراسة حالة. ومن خلال توافقه مع رؤية السعودية 2030، لا يقتصر المشروع على تعزيز المسؤولية البيئية فحسب، بل يُحسّن أيضًا تجربة الحجاج، ويُسهم في الاستدامة الحضرية طويلة الأمد في المدن المقدسة.

Abstract

The Hajj season is among the greatest periodic mass gatherings globally, exerting a major impact on the city facilities of Makkah and Madinah, especially with waste production, consumption of energy, and transportation emissions. Promoting sustainable practices among pilgrims is essential for alleviating environmental pressure and advancing the concept of smart and eco-friendly cities.

This research seeks to provide a blockchain-based incentive framework that encourages three essential sustainable behaviours among pilgrims: recycling, reducing water and electricity consumption, and utilising public transportation. The objective is to utilise digital incentives and real-time data to promote healthy environmental behaviours during Hajj.

The suggested solution combines IoT-enabled data sources, including smart bins, utility meters, and NFC transit points, with a blockchain framework. A behaviour-incentive layer, driven by smart contracts, automates the distribution of three token varieties: RecycleTokens, GreenEnergyTokens, and EcoMoveTokens. Pilgrims earn and keep these tokens in a digital wallet associated with their Hajj ID, which can be redeemed for advantages like as discounts, transportation rights, or acknowledgement. Current Hajj applications mainly focus on crowd management, religious instruction, and logistical coordination, with minimal or absent integration of incentive-driven sustainability frameworks. Although certain tourist and smart city initiatives reference blockchain integration, to our knowledge, no extensive, operational blockchain framework has been established to promote sustainable practices during Hajj.

This project addresses that gap by presenting a blockchain incentive framework and demonstrating its technological viability and social impact through a case

study. By aligning with Saudi Vision 2030, the project not only promotes environmental responsibility but also enhances the pilgrim experience and contributes to long-term urban sustainability in the Holy Cities.

Keywords: Blockchain, Hajj, sustainability, smart cities, IoT, reward system, green behaviour, pilgrims

1. Introduction

The Hajj, one of the greatest annual mass gatherings globally, imposes significant environmental pressure on the city of Makkah, especially during the five peak days of the pilgrimage. Recent reports highlight a significant increase in solid waste production, water consumption, and greenhouse gas emissions during this period [1]. Sustainability during Hajj has become a national priority as millions of pilgrims annually generate more than 42,000 tonnes of waste across Mina, Arafat, and Muzdalifah alone [2], alongside surges in water and energy use [3].

Despite the implementation of many technological solutions for managing Hajj logistics, crowd flow, and religious instruction, environmental sustainability and behavioural incentivization are still insufficiently addressed [4] [5]. Current solutions predominantly depend on top-down approaches, like infrastructural enhancements and regulatory enforcement, with minimal involvement from individual pilgrims.

This paper proposes a blockchain-based incentive framework that integrates IoT-enabled data collection with smart contract–driven reward tokenization. Pilgrims earn redeemable tokens when they engage in three verified behaviours: recycling, saving water and electricity, and using public transport. These tokens are stored in wallets linked to digital pilgrim IDs and can be redeemed for eco-conscious services or products.

This framework›s innovation is in the integration of real-time behavioural validation, decentralised token issuance, and a secure digital economy designed to accommodate the spiritual and practical demands of Hajj. This study presents a scalable, auditable, and incentive-compatible approach that enables pilgrims to act as sustainability agents, in contrast to previous research that suggested generic green pilgrimage program [4].

2. Methodology (Materials and methods)

2.1 Proposed Framework

This part shows a modular structure for a blockchain-based reward system meant to encourage people to behave in environmentally friendly ways during the Hajj journey. The framework combines Internet of Things (IoT) data sources, blockchain technology, digital identity management, and mobile access interfaces so that eco-reward tokens can be issued automatically and in a way that can be checked. It targets three key behaviours: recycling, reducing electricity and water usage, and opting for public transportation.

2.1.1 System Architecture

The proposed framework consists of six primary components:

• IoT and Sensing Layer: The sensing infrastructure includes smart bins with weight and material sensors, smart meters for tracking electricity and water use, and devices with NFC and GPS for monitoring transportation. These devices collect real-time behaviour data that is connected to each pilgrim.

• Data Validation Engine: A middleware layer checks raw data and makes sure that activities are sustainable depending on set thresholds (for example, 500g of recycling, 20% less energy use, or a validated public transit journey). Token issuance only happens when activities are validated.

• Blockchain and Smart Contracts: A smart contract on a scalable blockchain platform controls the minting and burning of three types of ERC-20 tokens: RecycleToken, GreenEnergyToken, and EcoMoveToken. Each transaction is recorded immutably to ensure transparency and traceability.

• Digital Identity and Wallet Management: Pilgrims are given custodial blockchain wallets that are linked to their Hajj IDs. Users can access wallets through a mobile app or an NFC wristband, which makes it safe and easy for everyone to participate without needing to know how to use blockchain.

• Mobile Application Layer: The app supports multiple languages and lets users check their token balances, see how their actions affect the environment, and trade tokens for rewards.

• Reward Redemption Layer: A group of certified businesses and service providers will take tokens in exchange for real-world rewards like cheaper meals or faster service. When you redeem tokens, they are burned on-chain to show that the acts have been done.

2.1.2 Process Flow

Figure 12 illustrates the interactions among the components of the system. This is a sequence diagram illustrating the temporal evolution of the framework. An IoT device logs an event when a pilgrim engages in environmentally beneficial actions and transmits it to the certification engine. A smart contract is activated to create a token and transfer it to the pilgrim›s digital wallet upon the fulfillment of specific requirements. The smartphone

application displays the token balance in real time, enabling the pilgrim to utilize it for purchases in the reward marketplace. If the activity fails validation, the procedure concludes without issuing a reward.

2.2 Technical Methodology

This section outlines the system design and theoretical validation methodology adopted for the proposed blockchain-based sustainability reward framework. It includes a conceptual case study, system thresholds, smart contract design, wallet architecture, and underlying assumptions. This framework is evaluated through a proof-of-concept simulation. Synthetic data was used to reflect realistic pilgrim behaviour under assumed conditions in a smart Hajj city. This clarification ensures transparency about the non-empirical nature of the simulation and evaluation.

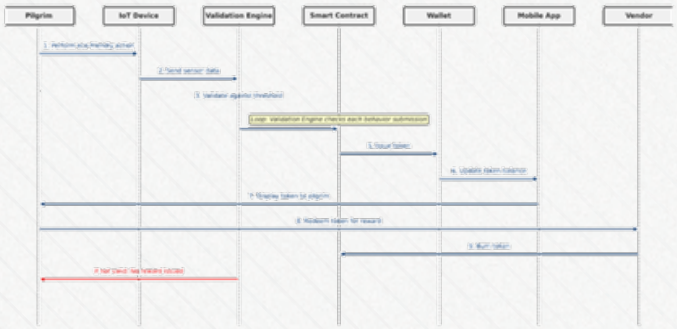


Figure 12 : Sequence Diagram of the Blockchain-Based Sustainability Reward Framework

2.2.1 Theoretical Case Study

To assess the feasibility of the proposed framework, we simulate a five-day Hajj journey in which a pilgrim engages in three types of sustainable behaviour: (1) recycling solid waste, (2) reducing electricity and water consumption, and (3) using public transportation. Smart devices detect these actions and send data to a validation engine, which verifies thresholds and triggers a smart contract to issue tokens.

During the simulation, the pilgrim:

- Recycles 2.5 kg of plastic waste 5 ⊠ RecycleTokens
- Maintains energy-efficient consumption for 3 days 3 ⊠ GreenEnergyTokens
- Uses public buses 4 times 4 ⊠ EcoMoveTokens

The tokens are delivered to the pilgrim's custodial wallet and later redeemed with registered vendors in exchange for reusable goods or service enhancements.

2.2.2 Behaviour Thresholds and Validation Logic

Thresholds are defined as:

- Recycling: 1 token per 500g of verified recyclable material
- Energy and Water: 1 token per day if consumption is under 80% of average
- Public Transport: 1 token per verified trip via NFC or QR scan

Data is processed through a validation engine that checks:

- Device authenticity and location
- Time constraints and behaviour frequency
- Linkage to a unique pilgrim ID

2.2.3 Smart Contract

The system uses a generalized ERC-20 smart contract written in Solidity. Key functions include:

- issueToken(address to, TokenType, amount): Mints tokens upon behaviour validation
- redeemToken(TokenType, amount, rewardItem): Burns tokens upon redemption

2.2.4 Wallet Implementation

To reduce user friction, pilgrims are allocated custodial blockchain wallets associated with their Hajj ID. Wallets are administered by the system and accessed via a smartphone application or NFC wristband. The system is accessible to non-technical users as they do not manage private keys.

2.2.5 Assumptions

The theoretical design assumes:

- IoT infrastructure is fully deployed across smart Hajj zones
- Pilgrims have digital IDs and access to mobile applications
- Vendors accept and validate token redemption via a shared platform
- The blockchain platform (e.g., Ethereum) supports low-cost transactions

These assumptions allow for proof-of-concept modeling without requiring full-scale deployment.

2.2.6 Smart Contract Design

To support transparent, secure, and decentralized reward management for sustainability behaviours, we developed a lightweight smart contract called Sustainability_Token. It is based on the ERC-20 standard and leverages OpenZeppelin libraries for secure token issuance, redemption, and ownership control. The contract defines three main behaviour types and manages lifecycle events through blockchain transactions.

Behaviour Token Classification

The contract introduces an enum called TokenType, which defines three categories of sustainable behaviours:

• Recycle: Actions related to waste recycling and sorting

• GreenEnergy: Reduction in electricity and water usage

• EcoMove: Adoption of public or low-emission transport

enum TokenType {Recycle, GreenEnergy, EcoMove}

Event Logging for Auditability

Upon issuing and redeeming tokens, the contract generates structured logs to guarantee transparency and allow external tracking through blockchain explorers or decentralized applications:

event Token_Issued(address indexed to, TokenType tokenType, uint256 amount);

event Token_Redeemed(address indexed user, TokenType tokenType, uint256 amount, string rewardItem);

Contract Initialization

The constructor initializes the contract with a token name and symbol:

constructor(string memory name, string memory symbol) ERC20(name, symbol){}

Token Minting Upon Behaviour Validation

The issueToken() function mints new tokens to a user›s address upon successful validation of a sustainable behaviour. Only the contract owner can invoke this function.

function issueToken(address to, TokenType tokenType, uint256 amount) external

onlyOwner {

_mint(to, amount);

emit TokenIssued(to, tokenType, amount);

}

Token Redemption for Rewards

Pilgrims can redeem tokens to receive rewards such as discounts or digital vouchers. This function ensures that the user has a sufficient balance, burns the redeemed tokens, and logs the transaction.

function redeemToken(TokenType tokenType,

uint256 amount, string memory rewardItem)

external {

require(balanceOf(msg.sender) >= amount, «

Insufficient token balance»);

_burn(msg.sender, amount);

emit TokenRedeemed(msg.sender, tokenType,

amount, rewardItem);

}

A verified and tamper-resistant incentive system is made possible by this smart contract design, which satisfies major sustainability objectives. Throughout the lifespan of behaviour-driven incentives, each transaction is recorded on-chain, providing transparency and traceability.

Tokens for sustainability (ERC-20 compliant) can be issued and redeemed using this comprehensive Solidity smart contract. As pilgrims reach certain behavioural milestones, they are rewarded with tokens, which are then burnt upon redemption.

```
contract SustainabilityToken is ERC20,
    Ownable {
    enum TokenType { Recycle, GreenEnergy,
        EcoMove }

    event TokenIssued(address indexed to,
        TokenType tokenType, uint256 amount)
        ;
    event TokenRedeemed(address indexed user
        , TokenType tokenType, uint256
        amount, string rewardItem);

    constructor(string memory name, string
        memory symbol) ERC20(name, symbol)
        {}

    // Mint tokens to user after validation
    function issueToken(address to,
        TokenType tokenType, uint256 amount)
         external onlyOwner {
        _mint(to, amount);
        emit TokenIssued(to, tokenType,
            amount);
    }

    // Burn tokens when user redeems for
        rewards
    function redeemToken(TokenType tokenType
        , uint256 amount, string memory
        rewardItem) external {
        require(balanceOf(msg.sender) >=
            amount, "Insufficient token
            balance");
        _burn(msg.sender, amount);
        emit TokenRedeemed(msg.sender,
            tokenType, amount, rewardItem);
    }
}
```

Listing 1: SustainabilityToken Smart Contract

3. Results and Discussion

3.1 Analysis and Results

A theoretical case study was employed to evaluate the proposed blockchain-based sustainability incentive scheme. The case study simulates the operation of a standard five-day Hajj pilgrimage. The analysis employs rule-based modeling and simulated behavioural data to examine the issuance of tokens, the interaction of wallets, and the redemption of tokens, rather than utilizing a live system.

3.2 Validation Environment

The simulation code displayed a model pilgrim exhibiting three distinct behaviours: recycling, resource conservation, and utilizing public transportation. The actions were validated via IoT infrastructure linked to a middleware engine. Upon reaching the established limitations, the smart contract functionalities initiated the token issuance process. A custodial wallet associated with the pilgrim›s digital identity contained these tokens.

We evaluated the smart contract, developed in Solidity utilizing the OpenZeppelin ERC-20 standard, within a local blockchain environment. The minting and burning operations were validated, and all event logs were accurately recorded on-chain. This demonstrates that the system ensures transactions are transparent, verifiable, and secure throughout the behaviour-reward duration.

The contract›s «redeemToken» function was invoked to simulate token redemption, resulting in the destruction of tokens and the documentation of the claimed reward. This strategy resembles the manner in which pilgrims exchange tokens for services or durable commodities in the real world.

To ensure transparency and reproducibility, the comprehensive, thoroughly tested smart contract employed in this simulation has been released to GitHub . The repository contains scripts for deployment, test cases, and documentation. It is important to note that this validation is conceptual in nature and was executed within a simulated, local blockchain environment. The purpose of this simulation is to demonstrate the technical soundness and feasibility of the framework prior to any real-world deployment or empirical evaluation.

3.3 Discussion

The call for a more sustainable and environmentally responsible Hajj has grown increasingly urgent. Hajj places immense pressure on the environment and infrastructure of Makkah as one of the world's largest annual mass gatherings, especially in areas such as waste management, transportation and energy consumption. Although various sustainability efforts have been introduced, a lack of unified coordination and limited engagement with pilgrims themselves remains a challenge [4].

Based on a targeted review of recent literature, this section reflects on how our proposed framework addresses critical gaps in sustainability efforts during Hajj — particularly in the areas of waste management, transportation, and utility (energy and water) conservation. We conducted a focused literature investigation using a combination of keywords, including: «Blockchain» AND («sustainability» OR «waste management» OR «energy» OR «utilities» OR «incentive systems» OR «smart contract»). Searches were performed across IEEE Xplore, the ACM Digital Library, and Google Scholar. Due to the novelty of blockchain-based incentive mechanisms and the rapidly evolving nature of this domain, we found a limited number of peer-reviewed academic articles, particularly in the context of real-time sustainability applications. As a result, most of the selected studies were published between 2019 and 2025 Our inclusion criteria focused on peer-reviewed works that presented blockchain-driven incentive systems related to at least one of the three behavioural pillars targeted in our framework.

Previous studies have explored a variety of technological and policy approaches, ranging from educational campaigns to AI-based monitoring and isolated blockchain prototypes. For example, the use of artificial intelligence (AI) applications in Hajj and Umrah for crowd control, health monitoring, and traffic optimisation to reduce emissions [6]. In addition, the study by Abalkhail et al. [7] employs a descriptive-analytical approach, emphasizing the Kingdom's strategic integration of AI technologies—such as smart bracelets, mobile applications, and surveillance robots—to enhance safety, health, and logistics during the Hajj and Umrah. Also, researchers have proposed transforming Makkah into a smart city, especially to cope with Hajj crowds. The study by Aljabri et al. [8] outline a comprehensive IoT framework using LoRa wireless technology for Makkah's urban management. Their plan involves deploying a city-wide network of low-power sensors to monitor parameters such as air quality, waste bin levels, and water flow in real time. These efforts indicate a growing shift toward leveraging technology in Hajj management which opens new opportunities for embedding sustainability into the pilgrim experience.

To better contextualize our contributions, we compare our work with a diverse set of prior studies based on their domain coverage, incentive mechanisms, and relevance to the Hajj. Table 5 encapsulates this comparative analysis and demonstrates how our methodology distinctively integrates real-time data, smart contracts, and multi-domain incentives within a context that is both religious and environmentally sensitive.

Table 5 Comparative Analysis of Related Work

Study	Waste Mgmt	Transport	Energy	Hajj Context	Incentive Method
[8]	✓	✗	✗	✗	Token-based Incentives based on waste weight
[9]	✓	✗	✗	✗	Tokens Rewards/Penalties
[10]	✓	✗	✗	✗	Incentives for waste bin providers
[11]	✗	✗	✓	✗	Incentives based on energy consumption
[12]	✓	✓	✓	✗	Token-based Incentives
This study	✓	✓	✓	✓	Token-based Incentives for mass gatherings

3.3.1 Comparative Analysis with Prior Work

A growing body of work has applied blockchain to encourage eco-friendly actions across transportation, waste, and energy sectors. In waste management, Barkule et al. [12] propose a reward-based framework that leverages IoT-enabled smart bins and smart contracts on an Ethereum network to detect recyclable waste and issue token-based incentives to individuals. Another study presents a blockchain-based system that rewards users for depositing recyclable waste into IoT-equipped smart garbage bins, with incentives based on the weight of the waste. This approach aims to encourage proper disposal practices and reduce littering and landfill use by motivating citizens to separate and recycle waste responsibly [8]. Moreover. Patkari et al. propose a blockchain-based waste management system built on Ethereum to promote responsible waste disposal. The system uses smart contracts to provide rewards for compliant behaviour and penalties for violations [9]. Moreover, an innovative approach to public waste disposal is proposed through a blockchain-based incentive system aimed at increasing the availability of public trash bins, particularly in contexts like Japan where security and incentive concerns limit their deployment [10]. This study highlights the potential of combining physical infrastructure with decentralized incentives to address real-world waste management challenges.

Efforts targeting transportation and energy remain limited. The study by Barkule et al. [9] proposes a blockchain-based incentive model to promote eco-friendly transportation behaviour, where users engaging in sustainable mobility choices are rewarded with tokens recorded on the blockchain. Additionally, another study introduces a real-time incentive-based energy management system that integrates reinforcement learning and blockchain to reduce peak-hour consumption and incentivize end-users, thereby enhancing participation and optimizing energy use within smart grids [11].

While the reviewed blockchain-based initiatives effectively address individual sustainability domains, most solutions remain domain-specific and tailored to long-term urban settings not for the Hajj and mass context. In contrast, our framework integrates three core pillars of sustainable behaviour: eco-friendly transportation, responsible waste disposal, and conscious utility (water and energy) consumption. This holistic approach is specifically designed for the unique context of Hajj, where behavioral interventions must be short-term, scalable, and adaptable to high-density populations.

Our theoretical framework and implement smart contract code simulation suggest that blockchain-based reward systems are technically feasible for promoting sustainable behaviours in the context of Hajj. The use of ERC-20 tokens, smart contracts, and custodial wallets creates a transparent and accountable mechanism for incentivizing actions such as recycling, resource conservation, and public transport use. The simulation demonstrated that the system could operate with minimal user intervention, reducing the need for technical expertise among pilgrims.

From a privacy standpoint, the model is designed with user protection in mind. While behavioral data must be collected and linked to individual digital identities for validation, the use of hashed IDs and on-chain transparency reduces the risk of data misuse. Furthermore, since custodial wallets are system-managed, pilgrims are not exposed to

private key risks.

Several challenges remain. One of the primary technical obstacles is the requirement for reliable IoT infrastructure across high-density and dynamic environments. Devices must accurately detect and transmit data under conditions of crowding, heat, and limited bandwidth. Moreover, smart contract deployment must be optimized for gas efficiency and security, especially if deployed on public chains like Ethereum.

The strategy presents a feasible approach for promoting environmental accountability on a large scale, while acknowledging the cultural and logistical contexts of the Hajj journey. Subsequent efforts should investigate prototype the system in smaller events or communities prior to its expansion to the complexity of Hajj.

The suggested framework directly facilitates the environmental and digital transformation objectives delineated in Saudi Arabia's Vision 2030. The system encourages sustainable practices, utilizes innovative technologies such as blockchain and IoT, and enhances the pilgrim experience, thereby contributing to the development of smart, eco-friendly communities and boosting the efficiency of Hajj services. It signifies a dedication to innovation, environmental stewardship, and scalable public service infrastructure within the Kingdom›s wider national transformation strategy.

4. Conclusions

This research provides a blockchain-based incentive architecture with IoT-enabled data gathering and smart contract–powered reward tokenization. Pilgrims receive tokens for recycling, conserving water and electricity, and taking public transportation. Our framework's novelty lies in its fusion of real-time behaviour validation, decentralized token distribution, and a secure digital economy specifically tailored to the Hajj context. This approach illustrates how blockchain and IoT can move beyond traditional awareness campaigns to provide immediate, tangible incentives that promote sustainable behaviour during pilgrimage.

5. Recommendations

To enhance the effectiveness and adoption of the proposed framework, several recommendations are offered. First, to see how well the system works, how well people utilise it, and how it impacts the environment in real life, pilot installations should first happen at smaller religious gatherings or local government events. These pilots can help with IoT calibration, make smart contract execution faster, and improve middleware connectivity in controlled conditions before the more difficult Hajj. These pilots will serve as an empirical validation step, allowing the framework to be tested in real-world environments and addressing key operational, behavioural, and technical factors beyond conceptual simulation.

Second, a complete public awareness campaign needs to be set up to allow pilgrims and service providers know about the incentive system, how it works, and how to take part without getting in the way of their spiritual experience. Third, interoperability with existing Hajj platforms such as e-bracelets and mobile apps should be explored to streamline digital identity verification, behaviour tracking, and token distribution. This integration would reduce system redundancy and improve user experience.

Future work will focus on integrating real-time IoT data streams using a real case environment. In doing so, further empirical testing can help refine both the technical implementation and behavioural effectiveness of the framework. Additional attention will be given to the development of a mobile front-end interface for users and administrators, incorporating multilingual support and accessibility features. Researchers should also look into cutting-edge privacy-preserving technologies like differential privacy or zero-knowledge proofs. This will help people trust the system and make sure that people are held responsible for what they do. Ultimately, economic modeling is essential to determine optimal token issuance rates, redemption prices, and funding mechanisms to ensure the longevity of the incentive economy.

References

[1] A. Abonomi, T. De Lacy, and J. Pyke, "Environmental impact of the hajj," International Journal of Religious Tourism and Pilgrimage, vol. 10, no. 1, p. 12, 2022.

[2] M. Alotaibi, M. Alsaigh, and M. Yamin, "Blockchain for controlling Hajj and Umrah permits," IJcSNS, vol. 19, no. 4, pp. 69–78, 2019.

[3] A. Raihan, S. M. Rahman, and T. Sarker, "Saudi Arabia's path to carbon neutrality: Analysis of the role of Hajj pilgrimage, energy consumption, and economic growth," Innovation and Green Development, vol. 4, no. 1, p. 100203, 2025.

[4] I. Elgammal and G. T. Alhothali, "Towards green pilgrimage: A framework for action in Makkah, Saudi Arabia," International Journal of Religious Tourism and Pilgrimage, vol. 9, no. 1, p. 5, 2021.

[5] A. Fairuz, "Environmental Sustainability in the Hajj Pilgrimage".

[6] A. A. Shah, "Enhancing Hajj and Umrah Rituals and Crowd Management Through AI Technologies: A Comprehensive Survey of Applications and Future Directions," IEEE Access, vol. 12, pp. 161820–161841, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3487923.

[7] A. A. A. Abalkhail and S. M. A. Al Amri, "Saudi Arabia's management of the Hajj

season through artificial intelligence and sustainability," Sustainability, vol. 14, no. 21, p. 14142, 2022.

[8] Y. Sen Gupta and S. Mukherjee, "A Reward-based Framework for Recovery and Utilization of Recyclable Wastes using Blockchain," 2022, pp. 609–613. doi: 10.1109/OCIT56763.2022.00118.

[9] S. Patkari, P. Pawale, N. Dharurkar, S. Bhale, and P. M. Shelke, "Waste Management Using Ethereum Blockchain," 2024, pp. 1923–1928. doi: 10.1109/ICETSIS61505.2024.10459512.

[10] S. K. T. Utomo, T. H. Koshizuka, and N. Koshizuka, "Blockchain-based Incentive System for Public Trash Bin," in 2020 IEEE 9th Global Conference on Consumer Electronics, GCCE 2020, 2020. doi: 10.1109/GCCE50665.2020.9291925.

[11] A. Kumari et al., "Blockchain-Driven Real-Time Incentive Approach for Energy Management System," Mathematics, vol. 11, no. 4, 2023, doi: 10.3390/math11040928.

[12] S. Barkule, P. Shelke, C. Shewale, S. Dedgoankar, P. Wawage, and P. Kulkarni, "Incentivizing Sustainable Behaviour using Blockchain for Ecofriendly Transportation," 2024, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICBDS61829.2024.10837535.

الاسترداد المستدام للمواد والطاقة من النفايات البلدية في مكة المكرمة، المملكة العربية السعودية

حسن الفيفي[1*]، زكيه رحمت الله[2]، محمد عبدالله[3] و هنادي الفيفي[1] - [1]معهد تقنيات إدارة وتدوير النفايات، مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية، [2]قسم الهندسة المدنية، جامعة أوتاوا، [3]قسم الهندسة المدنية والبيئية، جامعة الشارقة، ، الإمارات العربية المتحدة

Sustainable Recovery of Material and Energy from Municipal Waste in Makkah, Saudi Arabia

Hassan Alfaifi1*, Zakiya Rahmat Ullah2, Mohamed Abdallah3 and Hanadi Alfaifi1 - *1Waste Management and Recycling Technologies Institute, King Abdulaziz City for Science and Technology (KACST) - 2Department of Civil Engineering, University of Ottawa, Canada - 3Department of Civil and Environmental Engineering, University of Sharjah, UAE

الملخص

تشهد مدينة مكة المكرمة تقلبات سكانية استثنائية نتيجة تدفق ملايين الحجاج والمعتمرين خلال مواسم الحج والعمرة، مما يؤدي إلى زيادات حادة وموسمية في كميات النفايات البلدية الصلبة المنتجة شهرياً ، ويشكل ذلك ضغطاً كبيراً على البنية التحتية الحالية لإدارة النفايات. ويُعد الاعتماد الدائم على المرادم خياراً ا غير مستدام لمواجهة التحديات البيئية والاقتصادية الناجمة عن هذا التباين.

وبناءً على ما سبق، يهدف هذا البحث إلى تطوير وتقييم استراتيجيات مستدامة لإدارة النفايات تتناسب مع السياق الديموغرافي والديني الفريد لمدينة مكة المكرمة، مع التركيز على مبادئ الاقتصاد الدائري. وقد تم اقتراح عدد من الطرق والسيناريوهات المتكاملة لإدارة النفايات، تجمع بين استرداد المواد وتحويل النفايات إلى طاقة. وتعتمد جميع السيناريوهات على نظام تجميع موحد (حاوية واحدة)، ليعكس التحديات اللوجستية المرتبطة بفرز النفايات الناتجة عن الزوار القادمين من خلفيات وثقافات متنوعة.

وقد تم تقييم الاستراتيجيات المقترحة من حيث استرداد المواد والطاقة، والأداء البيئي، وتكاليف دورة الحياة. وتعزز هذه الاستراتيجيات الاستدامة والاقتصاد الدائري من خلال الحفاظ على الموارد الطبيعية، وتقليل الانبعاثات البيئية الناتجة عن استخراج وتصنيع المواد الخام، إلى جانب استغلال القيمة الحرارية الكامنة في النفايات.

Abstract

Makkah is the holiest city in Islam that experiences exceptional fluctuations in population due to the influx of millions of pilgrims during the Hajj and Umrah seasons. These sharp seasonal variations can cause up to 30% increase in monthly municipal solid waste generation and impose significant pressure on the existing waste infrastructure. The predominant reliance on landfilling is no longer sufficient to meet the environmental and economic challenges posed by this variability. This study evaluated integrated waste management strategies tailored to demographic and religious context of Makkah. Six scenarios were formulated, combining material recovery, waste-to-energy, incineration, and landfilling with or without gas recovery.

The results showed that incineration achieved the highest energy recovery of 50.2 billion kWh over 20 years. Whereas the material recovery and landfill gas recovery pathway achieved the lowest greenhouse gas emissions of 15,873 Gg CO2-eq. Economically, the integration of material recovery with conventional landfilling yielded the highest net present value of 692 million USD.

The comparative analysis concluded that the integrated approach combining material recovery, incineration, and landfilling is the most sustainable solution for Makkah, providing a balance between economic viability (NPV of 223 million USD), energy recovery (24,400 GWh), and material reuse (20,511 Gg). These findings underline the importance of integrating resource recovery with energy valorization for long-term waste management sustainability.

Keywords: Waste to Energy, Resource Recovery, Solid Waste Management, Circular Economy, Pilgrimage.

1. Introduction

Religious tourism has grown significantly in recent decades (Hassan et al., 2023), among the most notable examples is the pilgrimage of Muslims to the Kingdom of Saudi Arabia (KSA), which is recognized as the world's oldest and largest religious gathering (Nizami et al., 2017). The two main pilgrimage types are Hajj and Umrah, both performed in the holy city of Makkah. Hajj, the major pilgrimage, is performed during the 12th month of the Islamic lunar calendar and lasts for six days. Umrah, on the other hand, may be performed throughout the year and is typically completed in a single day, although many pilgrims extend their stay to perform additional religious rites (Alkhuzai, 2014). Annually, around two million Muslims from more than 180 countries gather in Makkah for Hajj (Yezli et al., 2024). The holy month of Ramadan also witnesses a sharp rise in Umrah visitors, given the spiritual importance of this period. In 2024, approximately 30 million people visited Makkah during Ramadan alone, a number that exceeded the entire Umrah pilgrim count of 2023, which was about 26.9 million (General Authority for Statistics, 2023). The Saudi Vision 2030 aims to expand the capacity for Umrah pilgrims from 8 to 30 million per year (Vision 2030, 2020), thus KSA would face an even more dynamic flow of visitors in the near future.

Currently, landfilling remains the dominant method for municipal solid waste (MSW) disposal in Makkah, with limited recovery of materials or energy (Rabeiy et al., 2023). Moreover, most landfills are non-engineered, which creates serious environmental risks, including groundwater contamination and soil pollution. The increasing and irregular waste flow during pilgrimages places further burden on the sustainability of this system (Rabeiy et al., 2023). As a result, Saudi Arabia has set ambitious goals under Vision 2030 to diversify its economy and energy sources. Waste valorization, including recycling and waste-to-energy (WTE) technologies, offers an opportunity to simultaneously reduce the environmental burden of landfilling and contribute to renewable energy generation (Abdallah et al., 2021a).

Several studies have investigated sustainable alternatives for waste management in KSA. For instance, Goren et al. (2022) discussed waste management strategies tailored to seasonal variations, emphasizing the need to adapt collection, treatment, and disposal systems to fluctuations in pilgrim populations. Osra et al. (2021) applied LandGEM model to Kakia landfill in Makkah, and estimated that one ton of waste could generate up to 83.5 m3 of methane. Rashid and Shahzad (2021) evaluated food waste composting and concluded that such strategy could produce approximately 0.32 Mt of compost annually, while also reducing methane emissions and generating significant revenues. Although these studies demonstrate the technical potential of waste valorization in Makkah, important gaps remain. Previous work has focused on either a single technology or assuming steady waste flows and composition. Such assumptions do not reflect the highly dynamic nature of waste generation in Makkah, which is strongly shaped by monthly fluctuations in pilgrim numbers. Long-term planning that ignores this variability may overestimate or underestimate the effectiveness of proposed solutions.

To address these gaps, this study investigates different integrated solid waste management (ISWM) strategies for Makkah. The analysis is carried out based on material and energy recovery potentials, along with lifecycle costing (LCC). Considering the unique and fluctuating conditions of the city, this study aims to provide practical insights for designing sustainable waste management systems tailored to pilgrimage-driven urban dynamics. The specific objectives are to 1) characterize the seasonal variation in waste generation in Makkah, 2) develop and evaluate ISWM strategies that include different valorization options, including mixed-waste processing, incineration, and landfilling with/without gas recovery, and 3) assess the resource recovery and financial performance of these strategies in order to optimize sustainable waste management in Makkah. The outcomes of this research are intended to support policymakers, planners, and waste management authorities in formulating robust and adaptable strategies for Makkah. Broadly, the study contributes to the global efforts on sustainable waste management in cities that experience frequent population fluctuations.

2. Methodology

This study examines the waste characterization of Makkah and the local conditions that shape waste management plans. A detailed techno-economic assessment was carried out to evaluate the feasibility of various waste valorization options for the city. Multiple ISWM strategies were developed and analyzed against key sustainability indicators, including LCC, material recovery potential (MRP), and energy recovery potential (ERP).

2.1. Waste Characteristics

Makkah, located in western Saudi Arabia, is globally one of the most visited cities, attracting millions of Muslims annually for the pilgrimages of Hajj and Umrah. In 2022, the resident population was about 2.4 million, growing at an annual rate of 4.3% (General Authority for Statistics, 2022). Alongside the permanent residents of Makkah, the city hosted nearly 26.9 million Umrah pilgrims in 2022, increasing annually at a rate of 1.3% (General Authority for Statistics, 2023). During 2023, approximately 6.6 million pilgrims performed Umrah in Ramadan, while nearly 1.85 million participated in Hajj (General Authority for Statistics, 2023). These figures are projected to continue rising at 8.7% and 1.2% annually, respectively (General Authority for Statistics, 2022; Rehan and Ismail, 2015). The sharp

increase of visitors leads to considerable seasonal fluctuations in MSW generation, which remains largely dependent on landfilling. Table 6 presents the characteristics of solid waste in Makkah, retrieved from (Abdul Aziz et al., 2000; Abdullah et al., 2022; Jabra et al., 2023; Rehan and Ismail, 2015). Waste quantity and composition vary according to source and season. Ramadan and Hajj seasons experience higher waste generation, with food waste rising to 44%, largely due to communal dining and animal sacrifices.

Table 6. Waste characteristics of Makkah city.

Source	Waste Generation (kg/capita/day)	Paper (%)	Plastic (%)	Glass (%)	Metals (%)	Food (%)	Textiles (%)	Wood (%)	Others (%)
Residents	1.4	18.0	30.0	3.0	5.0	29.0	6.0	3.0	6.0
Umrah Pilgrims (Regular)	0.9	18.0	42.0	1.2	1.4	15.5	0.0	0.0	21.9
Umrah Pilgrims (Ramadan)	1.5	16.0	23.0	1.2	1.4	44.0	2.0	0.0	12.4
Hajj Pilgrims	2.2	16.0	23.0	1.2	1.4	44.0	2.0	0.0	12.4

Waste characteristics data retrieved from Abdul Aziz et al. (2000); Abdullah et al. (2022); Jabra et al. (2023); Rehan and Ismail (2015).

Management Strategies .2.2

To determine the most suitable MSW management approach for Makkah, six valorization strategies were formulated and assessed. The scenarios incorporated different combinations of a mixed-waste processing facility (MWPF), incineration, and landfilling with or without gas recovery (LF/LFGR). A single-bin collection system was assumed for all strategies, considering the difficulties of source separation due to the diverse cultural and socio-economic backgrounds of pilgrims (Parker and Gaines, 2024). In these scenarios, recyclable materials recovered from the MWPF are sold to generate revenues, while incineration ash is disposed of in landfill. Both the incinerator and LFGR serve as waste-to-energy (WTE) facilities, producing electricity from MSW. Figure 13 illustrates the proposed waste management strategies for Makkah. The baseline scenario S1 (LF) involves landfilling all MSW without recovery. S2 (LFGR) includes landfilling with gas recovery for energy generation. S3 (INC) incinerates all MSW, with ash sent to landfill. S4 (MR/LF) processes all MSW in an MWPF, sells the recovered materials, and landfills the residuals. S5 (MR/LFGR) is similar, however the scenario sends residuals to LFGR for energy recovery. Finally, S6 (MR/INC/LF) processes MSW in an MWPF, markets recovered materials, incinerates part of the rejects, and landfills .both incineration ash and excess residuals

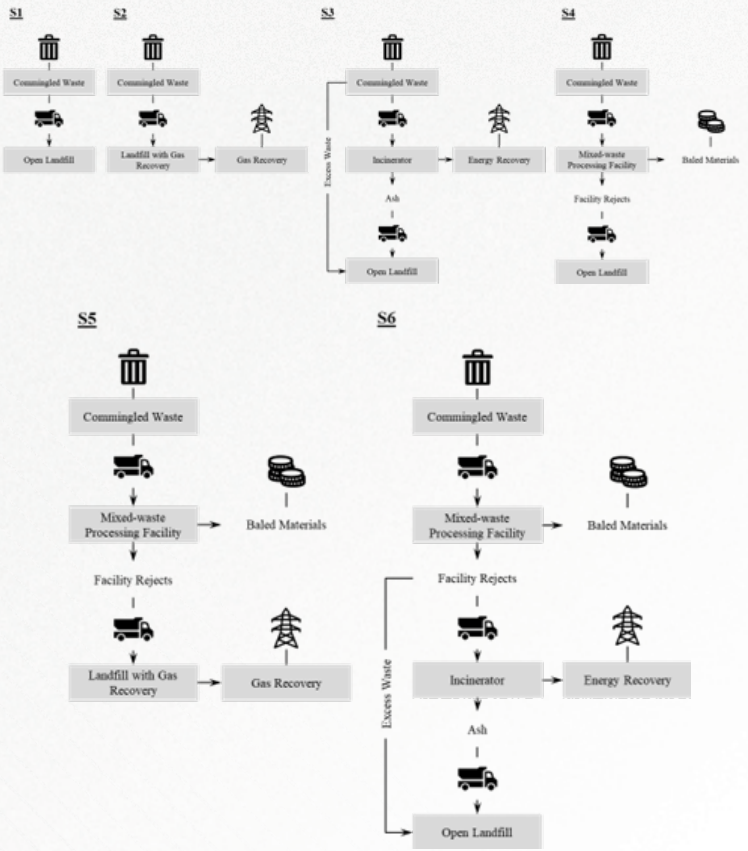


Figure 13. Proposed waste management strategies for the holy city of Makkah.

Assessment Framework .2.3

The following subsections outline the assessment parameters used to evaluate the proposed waste management strategies, covering resource recovery and lifecycle .costing

Resource Recovery .2.3.1

Resource recovery plays a key role in sustainable waste management by conserving natural resources, converting waste into valuable materials and energy, and supporting the circular economy. In this study, resource recovery was evaluated using two

indicators: MRP and ERP. MRP was determined by quantifying the recyclable fractions obtained from MWPFs, with recovery efficiencies of 60% for paper, 70% for plastics, 80% .for glass, and 90% for metals (Abdallah et al., 2018)

ERP was assessed for WTE systems, which harness the energy content of waste through different pathways. ERP values for all WTE systems were calculated following the methodology described by Abdallah et al. (2021).

2.3.2. Lifecycle Costing

To perform a comprehensive financial analysis of the proposed waste management strategies, cost and revenue streams were identified for each facility. Costs were categorized into capital expenditure (CAPEX) and operational and maintenance expenditure (OPEX). On the revenue side, the main sources include electricity generation, tipping fees, and sales of recyclables recovered from MWPFs.

The projected revenues from electricity generation in incineration and LFG recovery were estimated using the methodology adopted by Abdallah et al. (2021c), with the local electricity tariff set at 0.08 $/kWh (Saudi Electricity Company, 2025).

The market prices of baled paper, plastic, glass, and metal were considered as 6, 300, 10, and 290 $/ton, respectively (Metro Waste Authority, 2018). The financial performance of each strategy was evaluated using LCC over a 20-year assessment period, with the net present value (NPV) employed as the primary indicator. NPV was calculated following the approach of Abdallah et al. (2021c), where CAPEX and OPEX estimates were primarily drawn from the literature as shown in Table 7. The local discount rate was adopted as 5% (SAMA, 2024).

Facility	Capital Cost	Operational Cost	Reference
Mixed-waste processing facility	$125/ton	$20	(Tchobanoglous and Kreith, 2002)
Incinerator	$3500/kW	3.2% of capital costs	(IRENA, 2015)
Landfill	$10/ton	$1.8/ton	(EPA, 2020; Movahed et al., 2020)
Landfill with gas recovery	$50/ton	$6.5/ton	(EPA, 2014; Yedla and Parikh, 2001)

Figure 13. Proposed waste management strategies for the holy city of Makkah.

2.4. Sensitivity Analysis

In order to account for the cost uncertainties on the financial feasibility of the proposed strategies, a sensitivity analysis was performed. Construction and operation costs of waste management technologies may vary due to fluctuations in material prices, labor, and other regional market conditions. Thus, the CAPEX, OPEX, and other annual streams were adjusted by ±10% to compare the NPVs across the proposed cases. Such analysis provides decision-makers with insight into the economic resilience of each scenario.

3. Results and Discussion

This section presents the results of the waste management analysis in Makkah, where the strategies were assessed in terms of MRP, ERP, LCC.

3.1. Resource Recovery

The results showed that scenarios with full material recovery, including MR/LF, MR/LFGR, and MR/INC/LF, achieved the highest and equal MRP exceeding 20.5 million tons, which corresponds to 38.2% of the total generated waste. These strategies contribute to resource conservation and reduce environmental emissions linked to raw material extraction and manufacturing.

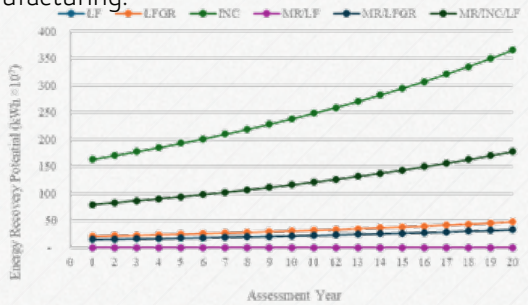


Figure 14 presents the ERP of the examined waste management scenarios in Makkah across the 20-year operational period. The INC scenario achieved the highest ERP, generating more than 50,100 GWh, attributed to the high efficiency of incineration in converting MSW to renewable energy.

By contrast, MR/LFGR produced the lowest ERP among energy-generating strategies (~4,519 GWh), reflecting the limited capacity of landfill gas recovery compared with thermal treatment. Considering the per capita electricity consumption in KSA of 10,267 kWh/yr (World Bank, 2014), the achieved ERP from INC alone is capable of supplying electricity for over 4.9 million people, highlighting the significance of waste-to-energy solutions for Makkah's sustainability.

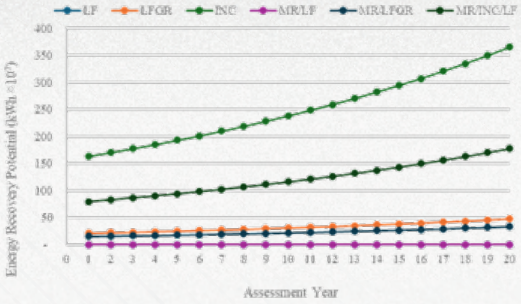


Figure 14. Energy recovery potential of the examined waste management strategies.

3.2. Lifecycle Costing

Figure 8 illustrates the cumulative NPV of the assessed waste management strategies in Makkah across the operational period. The periodic decline observed every five years reflects the expansion of treatment facilities to match projected waste growth. Among the strategies, LFGR exhibited the weakest performance, with a cumulative NPV of –1.76 billion USD and an IRR of –7.4%, largely due to high capital and operating costs, coupled with limited revenues. In contrast, MR/LF achieved the strongest economic outcome, reaching an NPV exceeding 691 million USD and an IRR of 19.1%, with breakeven in year 7. This was mainly driven by revenues from recyclables and the lower costs of open landfilling. MR/INC/LF also performed well, recording a cumulative NPV of 223 million USD and an IRR of 9.2%. Incineration alone (INC) yielded poor returns with an NPV of –445 million USD and IRR of –3.1% despite high energy output, reflecting the high costs and lack of material recovery. However, integrated approach, MR/INC/LF, proved financially viable. Overall, strategies incorporating MWPF with landfill provided the most favorable financial outcomes.

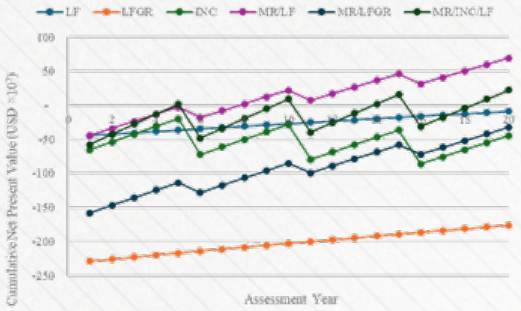


Figure 15. The net present value of the examined waste management strategies.

The cost breakdown of the analyzed waste management scenarios over the 20-year horizon showed that LFGR is the least viable, requiring nearly 2.7 billion USD in capital costs and 268 million USD in operations, while generating only 520 million USD in electricity revenues. LF, although the cheapest option with capital and operational costs of 537 and 97 million USD, was limited by reliance on tipping fees, which accumulated at 805 million USD, and lacked other revenue streams. In contrast, MR/LF showed strong profitability, yielding 4.1 billion USD in material sales and 1.3 billion USD in tipping fees against 2.1 billion USD in capital and 1.1 billion USD in operations, highlighting the economic advantage of material recovery.

INC had substantial high expenditures of 4.5 billion USD in capital investments offset by 4.0 billion USD electricity revenues and 937 million USD in tipping fees. MR/INC/LF enhanced the profitability through combined revenues of 4.1 billion USD from material sales, 1.95 billion USD from electricity, and 1.4 billion USD in tipping fees, confirming that strategies coupling material recovery with energy generation deliver the strongest outcomes.

3.3. Sensitivity Analysis

Table 3 demonstrates the effect of ±10% variations in CAPEX, OPEX, and annual revenues on the financial performance of the evaluated waste management strategies. The findings show that most scenarios retain their relative ranking despite cost fluctuations, indicating robustness of the comparative outcomes.

The NPVs of LF and LFGR remained negative under both low and high-cost conditions, indicating their lack of long-term economic viability. LFGR was significantly affected by cost increases, with NPV declining from –1.57 billion USD at –10% costs to –1.95 billion USD at +10%.

INC exhibited strong energy recovery (50.2 TWh), however, remained financially unfeasible, with NPV ranging from –370 million USD to –527 million USD. In contrast, strategies integrating material recovery demonstrated resilience. MR/LF consistently achieved the highest profitability, with NPV improving from 623 million USD at –10% costs to 761 million USD at +10%. MR/INC/LF also remained financially viable, showing stable performance with NPV values of 220–223 million USD.

However, MR/LFGR remained negative under all conditions due to the high expenditure on gas recovery integration relative to its revenues. Overall, MR/LF and MR/INC/LF are less sensitive to cost variability and provide economically feasible solutions for Makkah.

Condition	Scenario	Energy Production (kWh)	Material Recovery (kg)	Net Present Value ($)
-10%	LF	-	-	-80,674,087
	LFGR	6,500,233,362	-	-1,571,635,447
	INC	50,155,545,762	-	-370,333,815
	MR/LF	-	20,510,481,980	622,605,048
	MR/LFGR	4,519,766,876	20,510,481,980	-279,480,438
	MR/INC/LF	24,400,452,371	20,510,481,980	219,615,826
+10%	LF	-	-	-98,601,662
	LFGR	6,500,233,362	-	-1,952,054,068
	INC	50,155,545,762	-	-526,876,693
	MR/LF	-	20,510,481,980	760,961,725
	MR/LFGR	4,519,766,876	20,510,481,980	-360,835,358
	MR/INC/LF	24,400,452,371	20,510,481,980	223,123,772

4. Proposed Implementation Plan

To ensure the practical realization of the proposed strategies, a phased implementation plan is recommended. The process suggests beginning with a pilot stage led by the Makkah Municipality in collaboration with the National Center for Waste Management and the Saudi Investment Recycling Company (SIRC), testing the integration of material recovery and waste-to-energy facilities on a smaller scale. Following successful trials, the system can be gradually expanded to handle larger waste streams, supported by strategic public-private partnerships with entities such as the Saudi Electricity Company (SEC) for energy distribution and local contractors for infrastructure development. In parallel, investments in infrastructure upgrades, including engineered landfills with gas recovery, modern incinerators with emission controls, and advanced material recovery facilities, will be required. This stepwise approach not only reduces financial risks but also builds institutional capacity and public acceptance, paving the way for a fully integrated and resilient waste management system in Makkah.

5. Limitations

Despite the valuable insights, this study is subject to several limitations. The waste generation and composition data were obtained from literature and local sources, which may not fully represent the real-time data, Future studies should rely on continuous and localized field measurements. Additionally, the financial estimates of CAPEX, OPEX, and revenues were derived from international benchmarks and market assumptions, which, although tested under ±10% sensitivity, may not reflect the exact conditions of Saudi Arabia. The analysis also assumed a single-bin collection system, which simplifies logistics, however, overlooks potential improvements through source segregation initiatives. Moreover, environmental impacts beyond greenhouse gas emissions, such as air pollutants, leachate, and ecological effects, were not quantified. Finally, institutional, regulatory, and social factors, including public acceptance of incineration and coordination among local entities, were not incorporated, yet they play a crucial role in practical implementation.

6. Conclusion

This study assessed multiple waste management strategies for Makkah, including LF, LFGR, material recovery integrated with landfilling MR/LF, INC, and a combined approach of MR/INC/LF. The evaluation framework incorporated MRP, ERP, and LCC, ensuring a comprehensive sustainability assessment aligned with the unique waste challenges of Makkah. The results demonstrated that LFGR, despite contributing modestly to energy recovery, was economically the least viable, with high capital and operational expenditures outweighing its limited revenues. LF remained the most cost-efficient in terms of expenditures, however the reliance on only tipping fees limited long-term sustainability. MR/LF achieved the strongest economic returns from material recovery, supported by additional tipping fee revenues. Among all strategies, MR/INC/LF emerged as the most favorable, achieving a balanced performance by combining strong material recovery revenues with energy generation and consistent tipping fee contributions.

7. Recommendations

Based on the findings of this study, several recommendations can be drawn to support sustainable municipal solid waste management in Makkah:

1. Adopt Integrated Waste Management Approaches: Authorities should prioritize the combined strategy of material recovery, incineration, and landfilling, as it provides the most balanced outcome in terms of economic viability, energy recovery, and material reuse.

2. Strengthen Material Recovery Infrastructure: Given the significant financial and environmental benefits, establishing advanced material recovery facilities (MRFs) should be considered a cornerstone of Makkah's waste management system. This will also reduce dependency on raw material imports and support the circular economy.

3. Invest in Waste-to-Energy Technologies: Incineration, despite its high capital costs, offers substantial energy recovery potential. Strategic investment in WtE infrastructure, complemented by effective emission control systems, can enhance energy security and

contribute to Vision 2030 renewable energy targets.

4. Upgrade Landfilling Practices: Although landfilling will remain part of the system, engineered landfills with gas recovery should be implemented to minimize greenhouse gas emissions and generate additional revenues from methane utilization.

5. Plan for Seasonal Waste Surges: Waste management capacity should be dynamically scaled to account for the sharp increases during Hajj and Ramadan. Temporary facilities, flexible collection schedules, and advanced monitoring can ensure resilience during peak periods.

6. Policy and Institutional Support: Decision-makers should develop clear policies, regulatory frameworks, and incentive mechanisms to promote recycling markets, attract private sector participation, and ensure sustainable financing of integrated waste management projects.

7. Capacity Building and Public Awareness: Training programs for waste management personnel and awareness campaigns targeting residents and pilgrims can enhance waste segregation practices, improve system efficiency, and reduce overall waste generation.

References

- Abdallah, M., Hamdan, S., Shabib, A. (2021a). A multi-objective optimization model for strategic waste management master plans. J. Clean. Prod. 284, 124714. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124714.

- Abdallah, M., Hamdan, S., Shabib, A. (2021b). Development of a dynamic optimization framework for waste management systems. MethodsX 8, 101203. Available at: https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.101203.

- Abdallah, M., Rahmat-Ullah, Z., Metawa, A. (2021c). Dynamic Multi-Objective Optimization of Integrated Waste Management using Genetic Algorithms, in: Soft Computing Techniques in Solid Waste and Wastewater Management.

- Abdallah, M., Shanableh, A., Shabib, A., Adghim, M. (2018). Financial feasibility of waste to energy strategies in the United Arab Emirates. Waste Manag. 82, 207–219. Available at:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.029

- Abdul Aziz, H., Isa, M.H., Abdul Kadir, O., Mohd. Nordin, N., Wan Daud, W.R., Alsebaei, A.F., Abu-rizaiza, A.S. (2000). Study on the Baseline Data of Solid Waste Management in the Holy City of Makkah during Hajj 1427.

- Abdullah, N., Al-wesabi, O.A., Mohammed, B.A., Al-Mekhlafi, Z.G., Alazmi, M., Alsaffar, M., Baklizi, M., Sumari, P. (2022). IoT-Based Waste Management System in Formal and Informal Public Areas in Mecca, International Journal of Environmental Research and Public Health. Available at: https://doi.org/10.3390/ijerph192013066

- Alkhuzai, K.A. (2014). Use of Life Cycle Assessment (LCA) to Develop a Waste Management System for Makkah, Saudi Arabia. The University of Leeds.

- EPA. (2020). Project Economics and Financing 1–18.

- EPA. (2014). Municipal Solid Waste Landfills: Economic Impact Analysis for the Proposed New Subpart to the New Source Performance Standards 1–62.

- General Authority for Statistics. (2023). Annual Report.

- General Authority for Statistics. (2022). Population [WWW Document]. Available at: https://database.stats.gov.sa/home/indicator/535 (accessed 1.28.25).

- Goren, S., Almahdawi, A.Y., Alqamawi, J.A., Alqormati, A.M. (2022). Solid Waste Management in Makkah: Case Study. Int. J. Environ. Waste Manag. 1, 1. Available at: https://doi.org/10.1504/ijewm.2022.10035057

- Hassan, T., Carvache-Franco, M., Carvache-Franco, O., Carvache-Franco, W. (2023). Sociodemographic relationships of motivations, satisfaction, and loyalty in religious tourism: A study of the pilgrimage to the city Mecca. PLoS One 18, 1–17. Available at: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283720

- IRENA. (2015). Renewable power generation costs in 2014.

- Jabra, M., Algarni, M., Mirza, W., Balkhi, A. (2023). Determination of Waste Content 8, 16–27.

- Metro Waste Authority. (2018). Materials Recovery Facility (MRF) 23–94.

- Movahed, Z.P., Kabiri, M., Ranjbar, S., Joda, F. (2020). Multi-objective optimization of life cycle assessment of integrated waste management based on genetic algorithms : A case study of Tehran. J. Clean. Prod. 247, 119153. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119153

- Nizami, A.S., Shahzad, K., Rehan, M., Ouda, O.K.M., Khan, M.Z., Ismail, I.M.I., Almeelbi, T., Basahi, J.M., Demirbas, A. (2017). Developing waste biorefinery in Makkah: A way forward to convert urban waste into renewable energy. Appl. Energy 186, 189–196. Available at: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.116

- Osra, F.A., Ozcan, H.K., Alzahrani, J.S., Alsoufi, M.S. (2021). Municipal solid waste characterization and landfill gas generation in kakia landfill, makkah. Sustain. 13, 1–13. Available at: https://doi.org/10.3390/su13031462

- Parker, S., Gaines, J. (2024). Saudi Arabia: Hajj & Umrah Pilgrimages [WWW Document].

Available at: https://wwwnc.cdc.gov/travel/yellowbook/2024/itineraries/saudi-arabia-hajj-and-umrah-pilgrimages (accessed 4.7.25).

- Rabeiy, R., Almutairi, S., Birima, A., Kassem, L., Nafady, A. (2023). A Cross-Sectional Study of Knowledge, Practice, and Management of Solid Waste Segregation in Higher Educational Institutes: A Case Study in KSA. Sustain. 15. Available at: https://doi.org/10.3390/su15065516

- Rashid, M.I., Shahzad, K. (2021). Food waste recycling for compost production and its economic and environmental assessment as circular economy indicators of solid waste management. J. Clean. Prod. 317, 128467. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128467

- Rehan, M., Ismail, I. (2015). Waste Biorefinery in Makkah: A Solution to Convert Waste produced during Hajj and Umrah Seasons into Wealth. 15th Sci. Symp. Hajj, Umr. Madinah Visit. Available at: https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4303.6560

- SAMA (2024). Economic Indicators [WWW Document]. Available at: https://www.sama.gov.sa/en-US/pages/default.aspx?utm.com (accessed 1.31.25).

- Saudi Electricity Company. (2025). Consumption Tariffs [WWW Document]. Available at: https://www.se.com.sa/en/Ourservices/ColumnC/Bills-and-Consumption/ConsumptionTariffs (accessed 1.31.25).

- Tchobanoglous, G., Kreith, F. (2002). Handbook of Solid Waste Management, Second. ed. McGraw-Hill Companies, Inc.

- Vision 2030, 2020. Government of Saudi Arabia, Government of Saudi Arabia.

- World Bank. (2014). Electric power consumption (kWh per capita) [WWW Document]. Available at: https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.ELEC.KH.PC (accessed 2.7.25).

- Yedla, S., Parikh, J.K. (2001). Economic evaluation of a landfill system with gas recovery for municipal solid waste management: A case study. Int. J. Environ. Pollut. 15, 433–447. Available at: https://doi.org/10.1504/IJEP.2001.004834

- Yezli, S., Ehaideb, S., Yassin, Y., Alotaibi, B., Bouchama, A. (2024). Escalating climate-related health risks for Hajj pilgrims to Mecca. J. Travel Med. Available at: https://doi.org/10.1093/jtm/taae042

نموذج مبتكر لجمع النفايات في موسم الحج: توظيف الذكاء الاصطناعي لدعم الاقتصاد الدائري في ضوء الخبرات الدولية

تهاني سعود الغامدي - قسم الابتكار وتطوير الأعمال، هدية الحاج والمعتمر

An innovative model for waste collection during the Hajj season: using artificial intelligence to support the circular economy in the light of international experiences

Tahani Saud Al-Ghamdi - Innovation and Business Development Department, Hajj and Umrah Hadia
*Corresponding author: E-mail (tahani.gh.359@gmail.com)

الملخص

هدف البحث الحالي إلى تقديم نموذج مبتكر لجمع النفايات في الحج باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي لدعم الاقتصادي الدائري في ضوء الخبرات الدولية، كما هدف البحث إلى التعرف على دور الذكاء الاصطناعي في جمع النفايات، وإلى دور الاقتصاد الدائري في جمع النفايات، وإلى التعرف على الخبرات الدولية في تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي في جمع النفايات، ولتحقيق أهداف البحث استخدمت الباحثة المنهج الوصفي التحليلي،

وتوصل البحث إلى عدد من النتائج، أهمها: تقديم نموذج مبتكر يعتمد على منتج ذكي لجمع النفايات بواسطة تقنيات الذكاء الاصطناعي، والتقليل من الاعتماد على العمالة البشرية، ورفع الكفاءة التشغيلية في جمع النفايات، بالإضافة إلى توفير الطاقة بواسطة الخلايا الشمسية، وإلى تمكين القدرة على جمع النفايات في الأماكن المزدحمة، والتقليل من الانبعاثات الكربونية بما يدعم أهداف التنمية المستدامة

كما توصل البحث إلى عدد من التوصيات، أهمها: تبني تطبيق النموذج المبتكر لجمع النفايات في موسم الحج، وتطوير حاويات ذكية مخصصة للحج من خلال نشر حاويات ذكية مزودة بمستشعرات إنترنت الأشياء في المشاعر المقدسة لمراقبة الامتلاء وإرسال إشعارات فورية لمراكز التحكم لتقليل التكدس، وتعزيز الشراكات الدولية لخدمة موسم الحج من خلال الاستفادة من الخبرات العالمية في جمع النفايات الذكية لتطوير حلول خاصة ببيئة الحج.

الكلمات الدالة: الابتكار - الذكاء الاصطناعي – جمع النفايات - الخبرات الدولية – موسم الحج.

Abstract

The present study aims to propose an innovative model for waste collection during the Hajj season, utilizing artificial intelligence (AI) technologies to support the circular economy, drawing upon international experiences. The research investigates the role of AI in waste collection, the contribution of the circular economy to waste management, and international practices in applying AI technologies to optimize waste collection processes. To achieve these objectives, the researcher employed the descriptive-analytical methodology.

The study yielded several key findings, most notably the development of a novel model based on a smart AI-powered system that reduces reliance on manual labor, enhances operational efficiency, and incorporates solar energy to optimize power consumption. The model also enables effective waste collection in densely crowded areas and contributes to reducing carbon emissions, thereby aligning with sustainable development goals.

The study concludes with several recommendations, including the adoption of the proposed model during the Hajj season, the design and deployment of smart waste bins equipped with Internet of Things (IoT) sensors in the holy sites to monitor fill levels and send real-time notifications to control centers, and the promotion of international partnerships to develop Hajj-specific smart waste management solutions based on global best practices.

Keywords: Artificial Intelligence, Waste Collection, International Experiences, Hajj Season.

1. المقدمة

تعتبر إدارة النفايات عنصرًا أساسيًا في حماية البيئة وتعزيز التنمية المستدامة، حيث تُعد قضية عالمية تتطلب اهتمامًا متزايدًا وحلولًا مبتكرة، ومع تزايد عدد السكان والتوسع الصناعي، تزداد مشكلة تراكم النفايات، مما يجعل المجتمعات تواجه تحديات بيئية، واقتصادية، واجتماعية، لذلك لم تعد الإدارة الفعالة للنفايات مجرد خيار، بل أصبحت ضرورة قصوى.

وفي ظل التحديات البيئية المتزايدة، أصبحت إدارة النفايات الصلبة من القضايا العالمية التي تستدعي حلولاً مستدامة وفعالة، لا سيما مع الارتفاع المستمر في معدلات التمدن والاستهلاك، إذ تشير التقديرات إلى أن العالم ينتج نحو ملياري طن من النفايات سنويًا، ومع استمرار هذا النمط، من المتوقع أن يتضاعف هذا الرقم ليصل إلى 4 مليارات طن بحلول عام 2050م، هذا النمو المتسارع يفرض ضغوطًا هائلة على البيئة، مما يجعل من الضروري تبني استراتيجيات شاملة ومبتكرة لإدارة النفايات (Kaza et al., 2018)

وتشير الدراسات إلى أن الأنظمة التقليدية لجمع النفايات، التي تعتمد على مسارات محددة وجداول زمنية ثابتة، أصبحت غير فعالة في مواجهة النمو المتسارع في حجم النفايات وتعقيد مصادرها، إذ تعد هذه الأنظمة غير قادرة على تلبية الاحتياجات المتزايدة للمدن الحديثة، مما يستدعي تبني حلول أكثر ذكاءً ومرونة .(Guerrero et al., 2013)

ومن هذا المنطلق، برز الذكاء الاصطناعي كأحد أهم الممكنات التقنية الداعمة للتحول نحو نظم ذكية لإدارة النفايات، حيث تُسهم تطبيقاته في التنبؤ بكميات النفايات، وتخطيط المسارات المثلى، وتشغيل الحاويات الذكية، وتحسين عمليات الفرز والمعالجة، مما يرفع الكفاءة التشغيلية ويُعزز التحول نحو الاقتصاد الدائري، الذي يُعيد دمج النفايات كمواد خام في الدورة الاقتصادية بدلًا من إرسالها إلى المدافن أو المحارق (Macarthur, & Heading, 2019،Yazdani et al., 2021)

وتؤكد التجارب الدولية أن دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي بعمليات جمع النفايات قد أحدث نقلة نوعية في العديد من المدن المتقدمة، مثل مدينة سونغدو التي ألغت شاحنات القمامة تمامًا، واعتمدت نظامًا هوائيًا ذكيًا لجمع النفايات من المنازل إلى محطات المعالجة تلقائيًا باستخدام شبكة أنابيب تحت الأرض وإنترنت الأشياء (Wolfenden, 2020)،كما نفّذت دبي حاويات نفايات تعمل بالطاقة الشمسية مزوّ دة بخاصية الضغط الذاتي والذكاء الاصطناعي، بما يُمكّن من التحرك الذاتي للحاويات استجابةً لمستويات الامتلاء، كما تعمل في بيئات مكتظة من حيث الكثافة البشرية والضغط الزمني (Bigbelly, n.d, Mohamed et al., 2024))

وفي هذا السياق، يُمكن لتقنيات الذكاء الاصطناعي أن تُحدث تحولًا جذريًا في مجال إدارة النفايات، من خلال استخدامها في تحسين كفاءة أنظمة الجمع، والفرز، والمعالجة، والتتبع، كما هو الحال في تجربة مؤسسة ZenRobotics الفنلندية، التي استخدمت الذكاء الاصطناعي لتحليل النفايات وفرزها تلقائيًا، مما أدى إلى رفع كفاءة عمليات التدوير وتحقيق مستويات أعلى من الأداء البيئي (برغوث ومعوشي، 2023)

وفي الإطار المحلي، تُمثل مكة المكرمة خلال موسم الحج نموذجًا فريدًا من التحديات البيئية المعقدة، إذ تستقبل ما يزيد عن مليوني حاج خلال أيام معدودة، ففي عام 2025 م بلغ إجمالي عدد الحجاج حوالي 1,673,230، ما يؤدي إلى تولّد كميات ضخمة من النفايات في وقت وجيز وفي مناطق يصعب الوصول إليها بسهولة، مثل منى، ومزدلفة، وعرفات (الهيئة العامة للإحصاء، 2025، Abonomi et al., 2022)

وبالرغم من الجهود المؤسسية القائمة فقد أشارت دراسة Abdullah et al (2022) إلى أن النظم الحالية لا تزال تعتمد على الجهد البشري والآليات التقليدية، مما يؤدي إلى اختناقات تشغيلية وبيئية خلال الموسم، كما خلصت الدراسة إلى أن هناك حاجة ماسة إلى حلول ذكية متنقلة لجمع النفايات، خصوصًا في المناطق ذات الكثافة العالية والطرق الضيقة والمسارات المحدودة.

ووفقًا لدراسة ميدانية أجريت في مكة المكرمة والتي أشارت فيها إلى أن كمية النفايات المنتجة اليومية في الأيام العادية تتراوح ما بين 1800-2000 طن يوميًا، وترتفع هذه الكمية إلى نحو 3000 طن يوميًا خلال شهر رمضان، وفي موسم الحج تصل كمية النفايات إلى ما يقارب 4500 طن يوميًا، حيث يتركز الحجاج في نطاق جغرافي محدود، مما يشكل ضغطًا هائلًا على البنية التحتية لنقل النفايات (Aziz et al., 2007)، كما كشفت دراسة Alsebaei (2014) أن النفايات المنتجة خلال موسم الحج بلغت ما يقارب 17 ألف طن من النفايات الصلبة، مما يشير إلى حجم الضغط التشغيلي خلال فترة زمنية قصيرة، في حين أوضح تقرير أمانة العاصمة المقدسة أن كمية النفايات التي جمعت خلال موسم الحج تجاوزت 68 ألف طن خلال 12 يومًا فقط (Saudi Gazette, 2023)، كما أكدت دراسة (2022) Abdullah et al أن إجمالي النفايات في مكة خلال موسم الحج بلغت أكثر من 68 ألف طن، وفي هذا السياق، فقد توصلت دراسة Addas et al (2024) أنه يمكن إدارة النفايات بأنظمة إنترنت الأشياء مما يسهم في تحسينات تشغيلية ملموسة، كتحسن الكفاءة بنسبة 32%، وخفض الوقود والانبعاثات بنسبة 29%، وزيادة أداء المعالجة للنفايات بنسبة 33%.

ويشكل هذا التفاوت الموسمي في حجم النفايات تحديًا تشغيليًا كبيرًا، يتضمن مشكلات في الوصول، وزيادة زمن الدورة، وتكرار التشغيل، مما يقلل من كفاءة الأنظمة التقليدية مقارنة بالأنظمة الذكية (Al Yarubi, 2025)، كما تشير الأدبيات إلى أن التحديات التشغيلية في إدارة النفايات خلال موسم الحج ليست محصورة في حجم النفايات وحده، بل تمتد إلى قصور النظم التقليدية، وضعف قدرتها على التكيف مع الكثافة البشرية العالية (Alsebaei, 2014)، كما أكدت الأدبيات أن كثافة الحشود يمثل عائقًا تشغيليًا بارزًا، حيث تتطلب تخطيطًا دقيقًا للتحكم في حركة المشاة والمركبات، ومنع الازدحام، والحد من أي حوادث قد تقع، لذلك ظهرت الحاجة إلى استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي (Owaidah, 2022, Gazzawe, & Albahar, 2024)، ويمكن القول إن التحديات التشغيلية في إدارة النفايات خلال موسم الحج تشمل قصور النظم التقليدية، وكثافة الحشود، الأمر الذي يفرض الحاجة إلى حلول تقنية متقدمة، وقد أثبتت أنظمة إنترنت الأشياء، والروبوتات الذكية، والتعلم العميق قدرتها تحسين الاستجابة ودقة الفرز، وتقليل الزمن والتكلفة مما ينعكس إيجابًا على كفاءة

جمع النفايات

وبالرغم من النجاحات الدولية في دمج الذكاء الاصطناعي في جمع النفايات، فإننا لا نزال نفتقر إلى نموذج ذكي متنقل لجمع النفايات خلال موسم الحج، بحيث يكون لديه القدرة على التحرك بطريقة ذاتية في المناطق المزدحمة، والتعرف على النفايات وجمعها باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي، مع تقليل الاعتماد على الموارد البشرية، وتعزيز الاستدامة البيئية ضمن إطار الاقتصاد الدائري

وتأسيسًا على ما سبق، جاء هذا البحث للخروج بنموذج مبتكر لجمع النفايات في موسم الحج بواسطة توظيف الذكاء الاصطناعي لدعم الاقتصاد الدائري في ضوء الخبرات الدولية

أهداف البحث:

هدف البحث الحالي إلى الخروج بنموذج مبتكر لجمع النفايات في موسم الحج بواسطة توظيف الذكاء الاصطناعي لدعم الاقتصاد الدائري في ضوء الخبرات الدولية، بالإضافة إلى الأهداف الآتية:

1. التعرف على دور الذكاء الاصطناعي في جمع النفايات.
2. التعرف على دور الاقتصاد الدائري في جمع النفايات.
3. التعرف على الخبرات الدولية في تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي لجمع النفايات.
4. التعرف على عن النموذج المبتكر لجمع النفايات.

أهمية البحث:

تكمن أهمية البحث من خلال نتائجه التي قد تفيد فيما يلي:

1. قد تُسهم الدراسة في إثراء المكتبة المحلية والعربية من المعارف التي تفتح بدورها آفاق جديدة للمهتمين بالتكنولوجيا الحديثة لجمع النفايات.

2. قد تفيد القائمين على التخطيط والتطوير في أمانة العاصمة المقدسة، بحيث تقدم نموذجًا مبتكرً ا لجمع النفايات في المشاعر المقدسة، ليتمكنوا من اتخاذ الإجراءات اللازمة في ضوء ذلك النموذج

3. قد تسهم في تحقيق الاستدامة البيئية والتحول نحو الحج الأخضر وفق رؤية 2030.

2. منهجية وطرق البحث

اعتمد هذا البحث على المنهج الوصفي التحليلي لما له من ملاءمة في دراسة الظواهر الإدارية والتقنية الحديثة المرتبطة بتوظيف الذكاء الاصطناعي والاقتصاد الدائري في مجال إدارة النفايات، وقد استندت الدراسة إلى المراجعة المنهجية للأدبيات العلمية من أبحاث، ودراسات محكمة، وتقارير دولية، وإحصاءات رسمية صادرة عن منظمات محلية وعالمية، بهدف بناء إطار نظري متكامل يوضح واقع وتوجهات إدارة النفايات الذكية، وقد دعّمت الباحثة هذه المنهجية بالرجوع إلى الدراسات السابقة ذات الصلة؛ إذ تناولت دراسة Chaudhari & Bhole (2018) تطوير نظام لتحسين جمع النفايات اعتمادً ا على إنترنت الأشياء من خلال تطبيقات إلكترونية مرتبطة بالهواتف الذكية، وأظهرت دراسة Kamm et al (2020) إمكانية إعادة تصميم عمليات الجمع التقليدية لتحقيق كفاءة أعلى وتقليل الانبعاثات، بينما ركزت دراسة Ali et al (2020) على الحاويات الذكية من حيث قدرتها على التنبؤ بالكميات المستقبلية، كما بيّنت دراسة Páez-Ubieta et al (2023) فعالية الروبوتات المزودة بأنظمة الرؤية واللمس في جمع النفايات بدقة عالية، وفي السياق العربي أبرزت دراسة تكواشت (2023) دور الذكاء الاصطناعي في دعم الاقتصاد الدائري.

فيما تناولت دراسة برغوث ومعوشي (2023) حالة مؤسسة ZenRobotics كنموذج ناجح في توظيف الذكاء الاصطناعي لرفع كفاءة إعادة التدوير، وأكدت ملاس (2025) في دراستها حول تجربة دبي أن الذكاء الاصطناعي يسهم في خفض التكاليف البيئية والاقتصادية وتحقيق الاستدامة، أما الدراسات الأحدث مثل Lakhouit (2025) ودراسة Fotovvatikhah et al (2025) ودراسة Dawar et al (2025) فقد أظهرت أن تطبيقات التعلم الآلي والتعلم العميق تعزز دقة التصنيف، وتزيد من استرداد الموارد، وتدعم مبادئ الاقتصاد الدائري، كما تم توظيف التحليل المقارن لاستعراض الخبرات الدولية الرائدة مثل تجربة أمستردام، كوريا الجنوبية، الصين، ودبي، واستخلاص الدروس المستفادة منها بما يخدم السياق المحلي، كما اعتمد البحث على النمذجة النظرية لتقديم نموذج مبتكر يتمثل في الحاوية الذاتية المتحركة، والتي تتناسب مع البيئات ذات الكثافة البشرية العالية مثل موسم الحج، وقد تمثلت خطوات البحث في: مراجعة المفاهيم الرئيسة، والدراسات السابقة، ودراسة الخبرات الدولية، ثم صياغة النموذج المقترح ومناقشة نتائجه في ضوء أهداف التنمية المستدامة، أما حدود البحث فقد انحصرت في النطاق المكاني بالمملكة العربية السعودية، وبالأخص موسم الحج، مع التركيز الموضوعي على الذكاء الاصطناعي، والاقتصاد الدائري، وجمع النفايات

3. النتائج والمناقشة

أولًا - دور الذكاء الاصطناعي في جمع النفايات

أظهرت نتائج هذا البحث أن السنوات الأخيرة شهدت تحولات جوهرية في إدارة النفايات الصلبة مدفوعة بالتطورات المتسارعة في الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء، حيث أسهم هذا التقارب التقني في إحداث ثورة على الأساليب التقليدية التي كانت تعتمد على جداول ثابتة للمرور وآليات يدوية للفرز، موجهًا القطاع نحو حلول أكثر كفاءة، واستدامة، وملاءمة للبعد البيئي، والاقتصادي، والاجتماعي (Bibri et al., 2024; Zyoud & Zyoud, 2025)، وقد أظهرت النتائج أن اعتماد أساليب ذكية لجمع النفايات أصبح من الأولويات في إطار التنمية المستدامة، حيث اتجهت الدول المتقدمة إلى دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي لرفع الكفاءة وتقليل التكلفة المادية والبيئية، فآلية الجمع لها تأثير مباشر على عمليات الفرز وإعادة التدوير وصولاً إلى المعالجة النهائية، الأمر الذي يجعلها إحدى الحلقات الأهم في سلسلة إدارة النفايات (ملاس، 2025)، كما بينت النتائج أن الذكاء الاصطناعي يمثل تحولًا جذريًا في هذا المجال، إذ يتيح الاستفادة من البيانات الضخمة، وأجهزة الاستشعار، وتقنيات التعلم الآلي في تحسين الأداء.

فقد أشارت دراسة Fang et al (2023) إلى أن دمج الذكاء الاصطناعي أدى إلى تقليص مسافات النقل بنسبة 36.8% وتوفير الوقت بما يقارب 28.22%، فضلًا عن خفض التكاليف التشغيلية بنسبة 13.35%، ومن أبرز المخرجات أن التكامل بين الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء يمكن المدن من مواجهة التحديات المعقدة المرتبطة بعمليات الجمع، والفرز، وإعادة التدوير، إذ تُعد الحاويات

الذكية المزودة بمستشعرات وخوارزميات تحسين المسارات المعتمدة على التحليل التنبئي من الابتكارات البارزة التي تقدم نموذجًا متكاملًا لإدارة النفايات في ظل التوسع الحضري (Bibri et al., 2024; Zyoud & Zyoud, 2025)، كما وضحت النتائج أن هذه الحاويات قادرة على تحديد مستوى الامتلاء، وإرسال إشعارات فورية إلى مراكز التحكم؛ مما يمنع تكدس النفايات ويساعد على ترشيد الجهود التشغيلية (Qurashi et al., 2025)، كما أن الروبوتات المستقلة تمثل أحد التطبيقات المتقدمة التي تقوم بجمع وفرز النفايات في البيئات المعقدة دون الحاجة إلى تدخل بشري مباشر (Kundavaram et al., 2025)، كما بيّنت النتائج أن تحسين مسارات جمع النفايات يعد من أهم مجالات تطبيق الذكاء الاصطناعي، إذ أسهمت الخوارزميات الحديثة في تقليل الوقت، والانبعاثات، وتحقيق استدامة أعلى للعملية، حيث تعتمد هذه الأنظمة على بيانات لحظية تشمل تقنية GPS وحالة المرور لتعديل المسارات بشكل ديناميكي (Agrawal et al., 2021; Ahmad et al., 2020)، كما ساعدت تقنيات التعلم العميق في التنبؤ بأنماط الازدحام المروري والاستجابة الفورية للتغيرات، مما يعزز المرونة التشغيلية (Ghoreishi & Happonen, 2020; Anh Khoa, 2020)، وتوكد هذه النتائج أن توظيف الذكاء الاصطناعي في جمع النفايات ليس مجرد أداة لتحسين الكفاءة التشغيلية، بل هو رافعة أساسية لتحقيق أهداف التنمية المستدامة، من خلال خفض الانبعاثات الكربونية، وتقليل استهلاك الطاقة، وتعزيز جودة الحياة في البيئات الحضرية

ثانيًا- الاقتصاد الدائري في جمع النفايات

أظهرت نتائج هذا البحث أن الاقتصاد الدائري يمثل أحد النماذج الاقتصادية الحديثة التي تسعى إلى تقليل الضغط على الموارد الطبيعية وتعزيز النمو المستدام من خلال إعادة تصميم دورة حياة المنتجات (Deal, 2020) ، وتبين أن عملية جمع النفايات تمثل المرحلة الأولى والمفتاحية في تطبيق مبادئ الاقتصاد الدائري، حيث تؤثر كفاءة الجمع بشكل مباشر في جودة المواد القابلة لإعادة التدوير واستدامة النظام البيئي، وقد أكدت دراسة Lundin et al (2017) أن دمج أنظمة المراقبة الذكية في عمليات الجمع يُسهم في زيادة كمية النفايات الموجهة لإعادة التدوير، كما بينت دراسة Fang et al (2023) أن تطوير أنظمة جمع النفايات القائمة على البيانات الفورية والتنبؤ الذكي ساعد في إعادة إدخال المواد في سلاسل الإنتاج بدلًا من التخلص النهائي منها؛ مما يعزز القيمة الاقتصادية للنفايات، وتشير النتائج كذلك إلى أن إدارة النفايات الذكية تمثل ركيزة أساسية لدعم الاقتصاد الدائري، إذ تُسهم التقنيات الحديثة في عمليات الجمع الفعال والفرز الدقيق، وهو ما يفتح المجال لتعزيز فرص إعادة التدوير وتقليل النفايات الموجهة إلى المدافن، وتدعم هذه النتائج ما أشار إليه هبري (2019) و Abdullah et al (2022) من أن التحول نحو الاقتصاد الدائري يُسهم في تحويل النفايات من عبء بيئي إلى مورد اقتصادي عبر الابتكار في تقنيات الجمع والمعالجة، وتبرز أهمية تطبيق الاقتصاد الدائري في جمع النفايات في تقليل النفايات الموجهة إلى المدافن عبر تعزيز إعادة التدوير (Macarthur & Heading, 2019)، وخفض الأثر البيئي والتكاليف التشغيلية للعمليات الصناعية (Deal, 2020) ، وتوفير فرص عمل جديدة في مجالات إعادة التدوير والتصنيع الأخضر (Ghisellini et al., 2016) ، ودعم أهداف التنمية المستدامة من خلال تحقيق التوازن بين الأبعاد البيئية، والاقتصادية، والاجتماعية (هبري، 2019).

كما تشير التجارب الدولية إلى نجاح هذا النهج، حيث تمكنت هولندا والسويد من رفع معدلات إعادة التدوير إلى أكثر من 60% بفضل تبني الاقتصاد الدائري، مما أسهم في تقليل الاعتماد على المدافن وزيادة إنتاج الطاقة من النفايات (Macarthur & Heading, 2019)،كما أوضحت النتائج أن هناك عدة نماذج عملية لتطبيق الاقتصاد الدائري في جمع النفايات، ومنها: نموذج الحاويات الذكية المزودة بمستشعرات لقياس الامتلاء وإرسال بيانات لحظية، مما يقلل من جولات شاحنات الجمع ويخفض الانبعاثات (Mousavi et al., 2023) ، وكذلك نموذج التجميع الانتقائي الذي يعتمد على فصل النفايات في حاويات مختلفة، مما يحسن جودة المواد المعاد تدويرها ويرفع من الكفاءة الاقتصادية (Ghisellini et al., 2016)، بالإضافة إلى نموذج تحويل النفايات إلى طاقة من خلال استغلال النفايات العضوية لإنتاج الطاقة، وهو ما ساعد في بعض الحالات على رفع معدل إعادة التدوير إلى 76% (Wolfenden, 2020)، وتدل هذه النتائج على أن الجمع بين إدارة النفايات الذكية ومبادئ الاقتصاد الدائري يسهم في تحقيق أهداف الاستدامة، من خلال خفض النفايات، وإعادة إدخالها في الدورة الإنتاجية، وتعزيز الابتكار في تحويلها إلى موارد اقتصادية، وهو ما يشكل تحولاً استراتيجيًا في طرق إدارة النفايات الحديثة

ثالثًا- الخبرات الدولية

أظهرت الخبرات الدولية في مجال توظيف الذكاء الاصطناعي في جمع النفايات أن هذا المجال يشهد تحولات نوعية مدفوعة بتكامل تقنيات الاستشعار، وإنترنت الأشياء، والروبوتات الذكية، وقد عكست التجارب التطبيقية في كل من أمستردام، وكوريا الجنوبية، والصين، ودبي نماذج متقدمة يمكن الاستفادة منها في صياغة طرق واستراتيجيات محلية لجمع النفايات بكفاءة واستدامة أعلى، ففي تجربة أمستردام برزت كنموذج رائد في دمج الذكاء الاصطناعي مع الروبوتات ذاتية الحركة لجمع النفايات، حيث اعتمدت على أنظمة ملاحة متقدمة، وخريطة بيئية متكاملة، كما زُوّدت الروبوتات بوحدات استشعار لرصد الملوثات الهوائية، وربطها بمنصات ذكاء محيطي تقوم بتحليل البيانات وإرسالها لمراكز اتخاذ القرار (Örebro University, 2022) ، كما أن هذه التجربة أظهرت إمكانات الروبوتات في جمع النفايات ورصد التلوث البيئي، بالإضافة إلى تجربة كوريا الجنوبية التي تمثلت في مدينة سونغدو الذكية، حيث طُبّق نظام الأنابيب المضغوطة الذي ينقل النفايات مباشرة من المنازل إلى محطات مركزية للفرز والمعالجة، دون الحاجة للشاحنات التقليدية (Datta, 2015; Envac, 2025) هذا النظام المعتمد على إنترنت الأشياء يمكّن من تحليل البيانات الفورية المرتبطة بالكميات وأنماط الاستهلاك، وأسهم في تقليل العمالة البشرية إلى سبعة موظفين فقط يديرون كامل العملية من مركز تحكم مركزي (Harrison et al., 2010) ، وكذلك التجربة الصينية التي تركزت على الحاويات الذكية المزودة بأجهزة استشعار لقياس الامتلاء، وربطها بخوارزميات الذكاء الاصطناعي لتحسين مسارات الجمع وتقليل الرحلات غير الضرورية، مما خفّض من استهلاك الوقود والانبعاثات الكربونية، كما دمجت الصين تطبيقات رقمية لتحفيز المواطنين على المشاركة عبر نظام مكافآت، في إطار رؤيتها للمدن الذكية (Li & Lau, 2023)

وفي تجربة دبي التي بدأت عام 2019 بتطبيق حاويات نفايات تعمل بالطاقة الشمسية مزودة بأنظمة ضغط داخلي ومستشعرات للامتلاء، حيث ساهمت هذه الأنظمة في زيادة السعة التخزينية بمقدار 6–8 مرات مقارنة بالحاويات التقليدية، وخفض عمليات الجمع غير الضرورية

بنسبة 80%، وتقليل البصمة الكربونية بما يقارب 70% (Bigbelly, n.d.; Mohamed et al., 2024; Bigbelly, 2024)، كما توكد الخبرات الدولية على عدة نتائج أخرى يمكن الاستفادة منها، وهي كالاتي: تعزيز استخدام الطاقة المتجددة من خلال دمج الحاويات الذكية المعتمدة على الطاقة الشمسية، مما يُعزز الاستدامة ويقلل من البصمة الكربونية، إضافةً إلى جمع البيانات وتحليلها باستخدام أجهزة الاستشعار الذكية لمراقبة مستويات امتلاء الحاويات، مما يُحسن العمليات ويزيد الكفاءة، كذلك تحفيز السلوكيات الإيجابية من خلال تطبيقات رقمية تشجع إعادة التدوير عبر أنظمة المكافآت، مما يُحفز المواطنين على المشاركة الفعّالة، والمساهمة في تحقيق الاستدامة البيئة عبر مشاريع مبتكرة تُظهر قدرة الروبوتات الذكية على العمل في بيئات مكتظة، بالإضافة إلى الدمج بين تقنيات الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء لتعزيز كفاءة العمليات وتسهيل اتخاذ القرارات المستندة إلى البيانات، كذلك تعزيز التعاون الدولي بين الدول في تبني تقنيات جديدة لتبادل المعرفة والخبرات، مما يُسهم في تطوير أنظمة إدارة نفايات أكثر فعالية.

رابعًا-النموذج المبتكر لجمع النفايات

أظهرت نتائج هذا البحث أن النموذج المبتكر للحاوية الذاتية المتحركة يمثل نقلة نوعية في جمع النفايات مقارنة بالخبرات الدولية السابقة، وذلك لما يتميز به من خصائص متقدمة تتناسب مع البيئات شديدة الازدحام مثل موسم الحج، ويتميز النموذج المبتكر عن الخبرات الدولية السابقة بأنه لديه القدرة على التحرك بطريقة ذاتية، حيث يعد حلًا مبتكرًا لجمع النفايات في موسم الحج، وهو عبارة عن حاوية ذكية متحركة ذو ذراع لاقط، تعمل من خلال دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي، واستخدام الطاقة الشمسية، مما يساعد في تحقيق كفاءة عالية في جمع وفرز النفايات ضمن بيئة شديدة الازدحام، ويُسهم النموذج في التقليل من تكدّس النفايات، ودعم الاقتصاد الدائري، وتوليد بيانات قابلة للتحليل لتحسين التخطيط البيئي.

كما يعزز من الاستدامة ليواكب مستهدفات رؤية المملكة 2030م نحو مدن ذكية ومستدامة، كما تتملك القدرة على التعرف البصري على النفايات، وآلية التصرف وسط الحشود، بالإضافة إلى قدرتها على العودة تلقائيًا إلى نقطة الانطلاق عند بلوغ نسبة الامتلاء إلى 90%، ويساعد النموذج بدوره في خفض مسافات النقل، والتقليل من زمن بقاء النفايات على الأرض، كما يسهم في رفع جودة الفرز الأولي بما يعزز من معدلات التدوير، وتخفيض الانبعاثات الكربونية ضمن إطار الاقتصاد الدائري، فقد أشارت دراسة Fang et al (2023) إلى أن استخدام الذكاء الاصطناعي في منظومة النفايات يمكن أن يسهم في تقليص مسافات النقل إلى 36%، ويعزز من رفع كفاءة الفرز بدقة تتجاوز 90%

أ) مكونات النموذج المبتكر: تتكون آليات النظام للنموذج المبتكر من عدة وظائف أساسية، منها: التعرف على النفايات باستخدام خوارزميات (CNN/ResNet, YOLO) مدعومة بالاستشعار الطيفي للأشعة تحت الحمراء، والملاحة وسط الحشود عبر دمج خوارزميات ORCA و Social-LSTM للتنبؤ بحركة المشاة وتجنب الاصطدامات، والمعالجة الطرفية والسحابية لتوفير لوحات مراقبة لحظية وخرائط حرارية للنفايات، وتكامل الاقتصاد الدائري عبر تقسيم الحاوية إلى أقسام للنفايات القابلة وغير القابلة للتدوير وربطها بمراكز إعادة التدوير، بالإضافة إلى المكونات العتادية التي تشمل: منصة متحركة بعجلات، وذراع روبوتية خفيفة الوزن مزودة بقبضة مطاطية، وحساسات متنوعة، ومدعومة بألواح شمسية وبطاريات قابلة للشحن، مما يجعل النظام مناسبًا للظروف البيئية في موسم الحج.

إضافةً إلى برمجيات الذكاء الاصطناعي التي تُسهم في تعزيز قدرة النموذج على اكتشاف النفايات بفعالية والتنبؤ بمسارات المشاة بدقة، مع منطق تشغيل يضمن العودة الذاتية للحاوية إلى نقطة الانطلاق عند بلوغ نسبة امتلاء 90%.، كما يراعي النموذج السلامة في البيئات المكتظة مثل الحج من خلال تحديد سرعات قصوى مناسبة، ومناطق حظر ديناميكية قرب مخارج الطوارئ، وتنبيهات منخفضة الإزعاج، وحواف آمنة

ب) تحليل جدوى مبدئي للنموذج المبتكر: تقدير الحاجة وحجم المشكلة: تشير بيانات المواسم السابقة إلى أن عبء النفايات في المشاعر المقدسة خلال فترة زمنية وجيزة إلى أكثر من 68 ألف طن (Abdullah et al., 2022)، مما يستدعي الحاجة إلى البحث عن حلول مبتكرة تتجاوز قدرة الأنظمة التقليدية

الجدوى التقنية والتشغيلية:

- تقنيات التنبؤ بمسارات المشاة Social-LSTM أثبتت فعاليتها في تنقل الروبوتات وسط الحشود (Alahi et al., 2016, Gao & Huang, 2022)

- أنظمة التصنيف بالتعلم العميق حسنت دقة فرز النفايات البلاستيكية بنسبة تزيد عن 30% مقارنة بالطرق اليدوية (Bobulski, & Kubanek, 2021)

- الروبوتات البيئية المستقلة تسهم في تقليل التلوث والانبعاثات في البيئات المعقدة (Kundavaram et al., 2025)

افتراضات كمية تقديرية:

- سعة الحاوية: 120 لتر.
- كثافة النفايات داخل الحاوية: 150كجم/م3.
- زمن الدورة: 15 دقيقة.
- التشغيل: 12 ساعة يوميًا.

الجدوى الاقتصادية:

- أنظمة الحاويات الذكية قللت من الرحلات التشغيلية بنسبة تصل إلى 40-46% (Abdullah et al., 2022)

- تقنيات الفرز الذكي بالتعلم العميق قللت الاعتماد على العمالة البشرية بنسبة تزيد عن 30% (Bobulski, & Kubanek, 2021)

افتراضات تقديرية:

- تكلفة الاستثمار الأولية للوحدة الواحدة: 8000-12000 دولار استنادًا إلى متوسط تكاليف

روبوتـات مشـابهة

التكاليف التشغيلية:

- منخفضة نسبيًا نظرًا للاعتماد على الطاقة الشمسية وتقليل الحاجة للوقود، مع مصاريف صيانة دورية للمستشعرات والذراع

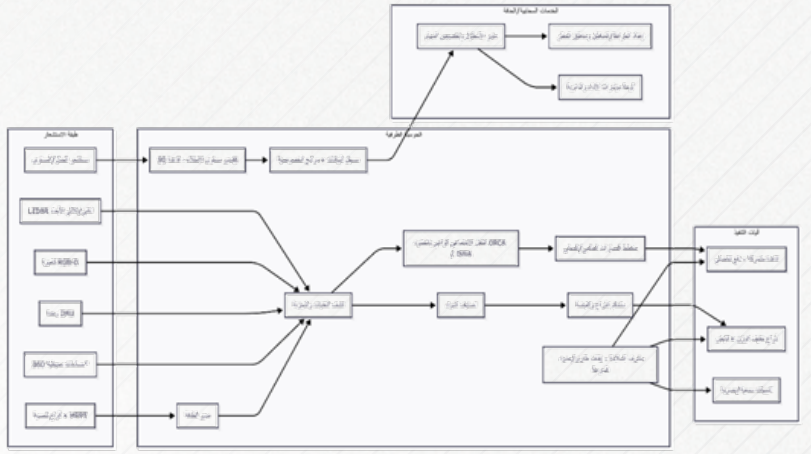
الأثر البيئي:

- إحلال روبوتات متنقلة داخل المساحات المزدحمة، مما يسهم في الحد من الضجيج مقارنة بالمركبات الثقيلة، ويحد من التلوث البصري من خلال جمع النفايات بطريقة سلسلة وسريعة، حيث لديها القدرة على العمل في البيئات المعقدة (Kundavaram et al., 2025)

- تقليل الأثر الكربوني من خلال تحسين عملية الفرز بواسطة التعلم العميق في تحسين معدلات التحويل إلى التدوير بدلًا من المدافن (Bobulski, & Kubanek, 2021)

ت) آلية تطبيق النموذج المبتكر: تتمحور فكرة النموذج المبتكر حول حاوية ذكية ذاتية الحركة تعمل بالطاقة الشمسية، ومزودة بذراع روبوت لاقط، تعمل في المشاعر المقدسة باستخدام نماذج التنبؤ بمسارات المشاة Social-LSTM للتنقل الاجتماعي الآمن، مع تقنية إنترنت الأشياء لمراقبة الامتلاء، فعند وصول الامتلاء إلى نسبة 90% كحد أقصى تعود الحاوية تلقائيًا إلى نقطة الانطلاق للتفريغ، ثم تعاود دورة العمل، ولرفع موثوقية التقاط النفايات يدمج حس اللمس والرؤية مع تصنيف بصري لأنواع النفايات الشائعة. موقع وزمن التجربة: في المشاعر المقدسة خلال أيام الذروة التشغيلية للمواسم لضمان تمثيل واقعي للحركة والنفايات

بنية النظام:



المصدر: من إعداد الباحثة

شكل (1): الشكل المعماري المقترح للنموذج المبتكر

الخطوات المقترحة العملية:

- تحديد المكان ومسارات الحركة بالتنسيق مع الجهات المعنية، ورسم خرائط نقاط التجمع ومخارج الطوارئ

- تركيب محطات الانطلاق والتفريغ مع نقاط شحن احتياطية، وضبط إعدادات العودة 90%.

- تشغيل الذراع اللاقط والتصنيف البصري للعناصر الشائعة.

- تفعيل منصة IOT لاستقبال تنبيهات الامتلاء، وإدارة دورات العمل.

- تشغيل تجريبي مراقب على مراحل يراعى فيه وقت الذروة مع فريق احتياطي للتدخل السريع.

مؤشرات الأداء الرئيسية وجمع البيانات:

- سلامة التنقل: معدل الحوادث الصفرية، عدد التوقفات غير المخططة، متوسط السرعة والمسافة وسط الحشود

- أداء الجمع: زمن الاستجابة من تنبيه الامتلاء حتى التفريغ، عدد دورات العمل اليومية.

- جودة الالتقاط: معدل العناصر الملتقطة لكل ساعة، نسبة نجاح الالتقاط من المحاولة الأولى مع الذراع البصري

- تنفذ التجربة المقترحة بالتنسيق مع الهيئة الملكية لمدينة مكة المكرمة والمشاعر المقدسة، وأمانة العاصمة المقدسة، وبشراكة مُشغل مدن ذكية معتمد لضمان تكامل البيانات ومطابقة أنماط التشغيل

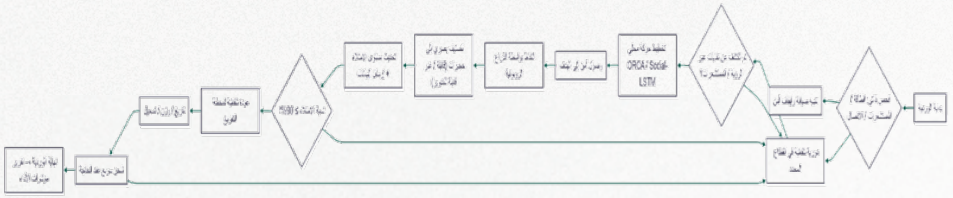
وستوفر هذه التجربة دليلًا ميدانيًا على جدوى الربط بين الحاوية الذكية ذاتية الحركة ومنصات IOT والملاحة الاجتماعية، مما يدعم قرار التوسع المرحلي، ويسهم في عملية التحول نحو إدارة رقمية ومستدامة في الحج

ث) التصور التخطيطي للنموذج المبتكر



المصدر: تم توليد الصورة باستخدام الذكاء الاصطناعي (برنامج: DALL.E)

شكل (2): صورة ثلاثية الأبعاد للحاوية الذكية المتحرّكة لجمع النفايات



المصدر: من إعداد الباحثة

شكل (3): المخطط الوظيفي لآلية العمل

ج) دور النموذج المبتكر في معالجة التحديات التشغيلية

أثبتت الدراسات السابقة أن إدارة النفايات في موسم الحج تتمثل في الجوانب الآتية: قصور النظم التقليدية، وكثافة الحشود، وضعف مرونة التشغيل، وأخيرًا الحاجة إلى حلول ذكية متقدمة، ويسهم هذه النموذج المبتكر في معالجة التحديات، من خلال ما يلي

- تجاوز قصور النظم التقليدية عبر الحركة الذاتية والعودة التلقائية عند الامتلاء.

- التكيف مع كثافة الحشود من خلال دمج خوارزميات Social-LSTM للتنبؤ بمسارات المشاة وتفادي الاصطدامات

- تعزيز مرونة التشغيل المبني على البيانات باستخدام أجهزة استشعار لإرسال بيانات لحظية حول الامتلاء

- تحسين دقة الجمع والفرز بواسطة الذراع اللاقط المدعوم بتقنيات الرؤية الحاسوبية والتعلم العميق.

ومما سبق، يتضح أن النموذج المبتكر يمثل حلًا عمليًا وذكيًا لجمع النفايات في البيئات ذات الكثافات البشرية العالية، إذ لا يقتصر دوره على الجمع والفرز فحسب، بل يمتد إلى تحسين التخطيط البيئي، ودعم الاستدامة، وتعزيز الاقتصاد الدائري من خلال تقنيات تحليل البيانات اللحظية

النتائج:

ومما سبق، يستعرض هذا الجزء ملخصًا لنتائج البحث على النحو الآتي:

- التحولات التقنية في جمع النفايات: حيث أظهرت النتائج أن توظيف الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء أحدثا نقلة نوعية في أساليب جمع وفرز النفايات، حيث تم الانتقال من العمليات التقليدية إلى النظم الذكية القائمة على المستشعرات والتحليل التنبئي، وقد انعكس ذلك على رفع كفاءة التشغيل وخفض مستويات الانبعاثات الكربونية، مما يعزز البعد البيئي والاقتصادي لمنظومة الإدارة (Bibri et al., 2024; Zyoud & Zyoud, 2025)

- الأثر الكمي للذكاء الاصطناعي على الكفاءة التشغيلية: تشير الأدلة التطبيقية إلى أن دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي في إدارة النفايات أسهمت في تقليص مسافات النقل بنسبة 36.8%، وتوفير الوقت بنسبة 28.22%، وخفض التكاليف التشغيلية بما يقارب 13،35%، مما يعكس الأثر المباشر لهذه التقنيات في رفع كفاءة استخدام الموارد (Fang et al., 2023)

- إمكانات الحاويات الذكية: أثبتت الحاويات المزودة بمستشعرات إنترنت الأشياء وخوارزميات التحسين فعاليتها في منع التكدس، وتحقيق كفاءة أعلى في استغلال الموارد التشغيلية، الأمر الذي أسهم في تعزيز الاستدامة البيئية وتقليل الهدر التشغيلي (Qurashi et al., 2025)

- الحاويات الذكية المتحركة كحل تشغيلي: أظهرت النتائج أن الروبوتات ذاتية الملاحة قادرة على جمع وفرز النفايات في البيئات المكتظة دون الحاجة إلى تدخل بشري مباشر، وهو ما يقلل من المخاطر التشغيلية ويعزز سرعة الاستجابة في البيئات ذات الكثافة العالية (Kundavaram et al., 2025)

- دور الاقتصاد الدائري في دعم الاستدامة: أوضحت النتائج أن تطبيق آليات الجمع الذكي للنفايات يحسن جودة المواد القابلة لإعادة التدوير، ويدعم استدامة المنظومة البيئية من خلال إدخال النفايات في دورة إنتاجية جديدة بدلًا من توجيهها إلى المدافن، مما يعكس تكاملًا مباشرًا بين الإدارة الذكية والاقتصاد الدائري (Lundin et al., 2017, Abdullah et al., 2022).

- الدروس المستفادة من الخبرات الدولية: أظهرت الخبرات الدولية في كلًا من أمستردام، وكوريا الجنوبية، والصين، ودبي نجاح تطبيق تقنيات متقدمة، مثل: الأنابيب المضغوطة لجمع النفايات، والحاويات الشمسية، والتطبيقات التحفيزية الرقمية، حيث أسهمت هذه النماذج في خفض عمليات الجمع غير الضرورية التي تؤدي إلى إهدار الوقت والموارد بنسبة تصل إلى 80% وتقليل البصمة الكربونية بما يقارب 70%، مما يظهر إمكانية الاستفادة من هذه النماذج في تطوير أساليب جمع وفرز النفايات (Envac, 2025, Bigbelly, 2024)

4. الخلاصة

خلص هذا البحث إلى أن توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي يمثل أحد أهم التحولات في مجال جمع النفايات، حيث أسهم في رفع كفاءة عمليات الجمع، والفرز، والمعالجة من خلال الاعتماد على البيانات الضخمة، وأجهزة الاستشعار، وخوارزميات التعلم الآلي، وقد أوضحت الدراسات السابقة أن دمج الذكاء الاصطناعي في جمع النفايات يسهم في تقليص مسافات النقل، وتوفير الوقت والتكاليف التشغيلية، إضافة إلى خفض الانبعاثات الكربونية، مما يجعله أداة أساسية لدعم أهداف التنمية المستدامة، كما بيّنت النتائج أن الاقتصاد الدائري يعد إطارًا محوريًا لتحويل النفايات من عبء بيئي إلى مورد اقتصادي، من خلال إعادة إدخال المواد في سلاسل الإنتاج وتقليل الاعتماد على المدافن، وقد أظهرت التجارب العالمية في دول مثل هولندا والسويد، والنماذج العملية مثل الحاويات الذكية، والتجميع الانتقائي، وتحويل النفايات إلى طاقة، أن تطبيق الاقتصاد الدائري يحقق آثارًا اقتصادية وبيئية إيجابية، ويوفر فرص عمل جديدة في مجالات التصنيع الأخضر، كما استعرض البحث الخبرات الدولية الرائدة في أمستردام، كوريا الجنوبية، الصين، ودبي، والتي أظهرت تنوع الحلول الذكية لجمع النفايات من الروبوتات ذاتية الحركة، والأنابيب المضغوطة، والحاويات الذكية، إلى أنظمة الطاقة الشمسية والضغط الذكي، وقد أكدت هذه التجارب أهمية الجمع بين

الابتكار التكنولوجي والتحفيز المجتمعي لتحقيق إدارة متكاملة ومستدامة للنفايات.

وانطلاقًا من ذلك، قدّم البحث النموذج المبتكر للحاوية الذاتية المتحركة كحل عملي متكامل لجمع النفايات في البيئات شديدة الازدحام مثل موسم الحج، ويتميز النموذج بقدرته على التعرف البصري على النفايات، والملاحة وسط الحشود، والعودة الذاتية عند الامتلاء، مدعومًا بالطاقة الشمسية وخوارزميات الذكاء الاصطناعي، كما يُسهم النموذج في رفع كفاءة الجمع والفرز، وتقليل الانبعاثات، ودعم الاقتصاد الدائري، بما يتوافق مع مستهدفات رؤية المملكة 2030 نحو مدن ذكية ومستدامة، وبناءً على ما سبق، يمكن القول إن هذا البحث يقدم رؤية فريدة لجمع النفايات تعتمد على التقاطع بين الذكاء الاصطناعي والاقتصاد الدائري، مدعومة بخبرات عالمية ونموذج مبتكر محلي، بما يعزز من فرص بناء أنظمة أكثر كفاءة، ومرونة، واستدامة

5. التوصيات

في ضوء النتائج التي تم التوصل إليها يوصي البحث بما يلي:

- تنفيذ تجربه ميدانية محددة في أحد قطاعات المشاعر المقدسة ذات الكثافة العالية بهدف التحقق من كفاءة النموذج المبتكر وقياس قدرته في جمع النفايات بكفاءة بناء على زمن دورة الجمع، وعدد الجولات، ومعدل الحوادث

- تشكيل لجنة تشغيلية مشتركة تضم الهيئة الملكية لمدينة مكة والمشاعر المقدسة، وأمانة العاصمة المقدسة، إلى جانب مشغلي المدن الذكية، وذلك لضمان الحوكمة الموحدة وتنسيق القرارات التشغيلية بشكل سريع وفعال

- إنشاء منصة بيانات مركزية تتكامل مع منظومة مكة الذكية، لعرض بيانات الامتلاء، والخرائط الحرارية، ومسارات الحاويات، والتنبيهات اللحظية، بما يعزز التشغيل المبني على البيانات

- تطبيق معايير السلامة والملاحة الذكية لضمان التنقل الآمن للحاويات وسط الحشود، من خلال اعتماد خوارزميات متقدمة تسهم في تحليل سلوك الحشود وتجنب الاصطدامات، ويتضمن ذلك وضع ضوابط للسرعات القصوى، وتحديد المناطق المحظورة، بالإضافة إلى إجراءات الطوارئ، بما يعزز سلامة التشغيل في البيئات المكتظة

- إعداد تقرير تقييم ما بعد الموسم يتضمن قياس الأثر التشغيلي والبيئي للنموذج من ناحية المسافة، الزمن، الانبعاثات، ومستوى السلامة، ومقارنته بالمرجعية السابقة، بما يتيح اتخاذ قرار مبني على الدليل بشأن التوسع المرحلي وتعميم التجربة تدريجيًا

المراجع

المراجع العربية

- الهيئة العامة للإحصاء، 2025م. نشرة إحصاءات الحج 2025. تم الاسترجاع من: https://www.stats.gov.sa/

- برغوث، أسامة، ومعوشي، بوعلام، 2023م. دور الذكاء الاصطناعي في تطوير الاقتصاد الدائري: دراسة حالة مؤسسة ZenRobotics الفنلندية. مجلة الإدارة والتنمية للبحوث والدراسات، المجلد 12، العدد 2، ص. 125–139.

- تكواشت، عيماد، 2023م. دور الذكاء الاصطناعي في تسريع الانتقال إلى الاقتصاد الدائري. مجلة الأصيل للبحوث الاقتصادية والإدارية، المجلد 7، العدد 2، ص. 460–474.

- ملاس، حسيبة، 2025م. نحو إدارة ذكية للنفايات الحضرية.. لمستقبل حضري مستدام في البلدان النامية-تجربة إمارة دبي في تسيير النفايات باستخدام الذكاء الاصطناعي. مجلة التميز الفكري للعلوم الاجتماعية والإنسانية، المجلد 2، العدد 6، ص. 1–10.

- هبري، نصيرة، 2019م. إعادة تدوير النفايات في ظل الاقتصاد الدائري وتحقيق التنمية المستدامة. مجلة الإصلاحات الاقتصادية والاندماج في الاقتصاد العالمي، المجلد 13، العدد 2، ص. 1–13.

المراجع الأجنبية

- Abonomi, A., De Lacy, T. & Pyke, J., 2022. Environmental impact of the hajj. International Journal of Religious Tourism and Pilgrimage, 10(1), p.12.

- Abdullah, N., Al-wesabi, O.A., Mohammed, B.A., Al-Mekhlafi, Z.G., Alazami, M., Alsaffar, M., Baklizi, M. & Sunar, P., 2022. IoT-based waste management system in formal and informal public areas in Mecca. International Journal of Environmental Research and Public Health, 20(2), pp.1–30.

- Addas, A., Khan, M.N. & Naseer, F., 2024. Waste management 2.0 leveraging internet of things for an efficient and eco-friendly smart city solution. PLOS ONE, 19(7), e0307608.

- Agrawal, P., Kaur, G. & Kolekar, S.S., 2021. Investigation on biomedical waste management of hospitals using cohort intelligence algorithm. Soft Computing Letters, 3, p.100008.

- Ahmad, S., Jamil, F., Iqbal, N. & Kim, D., 2020. Optimal route recommendation for waste carrier vehicles for efficient waste collection: A step forward towards sustainable cities. IEEE Access, 8, pp.77875–77887.

- Alahi, A., Goel, K., Ramanathan, V., Robicquet, A., Fei-Fei, L. & Savarese, S., 2016. Social LSTM: Human trajectory prediction in crowded spaces. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. pp.961–971.

- Ali, T., Irfan, M., Alwadie, A.S. & Glowacz, A., 2020. IoT-based smart waste bin monitoring and municipal solid waste management system for smart cities. Arabian Journal for Science and Engineering, 45(12), pp.10185–10198.

- Alsebaei, A.F., 2014. Solid waste management and recycling during Hajj pilgrimage in Mina. Doctoral dissertation, The University of Leeds.

- Al Yarubi, K.S., Khairy, S.O., Hossain, S.E. & Hayder, G., 2025. Internet of Things-driven

Robotics and AI, 8, p.721317.

- Gazzawe, F. & Albahar, M., 2024. Reducing traffic congestion in Makkah during Hajj through the use of AI technology. Heliyon, 10(1), pp.1–12.

- Ghoreishi, M. & Happonen, A., 2020. Key enablers for deploying artificial intelligence for circular economy embracing sustainable product design: Three case studies. AIP Conference Proceedings, 2233(1), p.050008.

- Ghisellini, P., Cialani, C. & Ulgiati, S., 2016. A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. Journal of Cleaner Production, 114, pp.11–32.

- Guerrero, L.A., Maas, G. & Hogland, W., 2013. Solid waste management challenges for cities in developing countries. Waste Management, 33(1), pp.220–232.

- Harrison, C., Eckman, B., Hamilton, R., Hartswick, P., Kalagnanam, J., Paraszczak, J. & Williams, P., 2010. Foundations for smarter cities. IBM Journal of Research and Development, 54(4), pp.1–16.

- Kamm, M., Gau, M., Schneider, J. & Vom Brocke, J., 2020. Smart waste collection processes: A case study about smart device implementation. [Journal details].

- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P. & Van Woerden, F., 2018. What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050. World Bank Publications.

- Kundavaram, R.R., Onteddu, A.R., Devarapu, K. & Nizamuddin, M., 2025. Advances in autonomous robotics for environmental cleanup and hazardous waste management. Asia Pacific Journal of Energy and Environment, 12(1), pp.1–16.

- Lakhouit, A., 2025. Revolutionizing urban solid waste management with AI and IoT: A review of smart solutions for waste collection, sorting, and recycling. Results in Engineering, p.104018.

- Li, C.H., Lee, T.T. & Lau, S.S.Y., 2023. Enhancement of municipal solid waste management in Hong Kong through innovative solutions: A review. Sustainability, 15(4), p.3310.

- Lundin, A.C., Özkil, A.G. & Schuldt-Jensen, J., 2017. Smart cities: A case study in waste monitoring and management. In: 50th Hawaii International Conference on System Sciences. pp.1392–1401.

- Macarthur, E.L. & Heading, H., 2019. How the circular economy tackles climate change. Ellen MacArthur Foundation, 1, pp.1–71.

- Mohamed, T., Fatimal, S., Soumeia, D. & Ismail, H., 2024. Alternative or smart waste management: Establishing a database, spatial information, and projects to improve waste collection systems. Migration Letters, 21(7), pp.213–225.

waste management: Paving the way for sustainable smart cities. Processes, 13(4), 1140.

- Anh Khoa, T., Phuc, C.H., Lam, P.D., Nhu, L.M.B., Trong, N.M., Phuong, N.T.H. & Duc, D.N.M., 2020. Waste management system using IoT□based machine learning in university. Wireless Communications and Mobile Computing, 2020(1), p.6138637.

- Aziz, H.A., Isa, M.H., Kadir, O.A., Nordin, N.M., Daud, W.R.W., Alsebaei, A.F. & Rizaiza, A.S.A., 2007. Study on the baseline data of solid waste management in the Holy City of Makkah during Haj 1427. [Journal details].

- Bibri, S.E., Krogstie, J., Kaboli, A. & Alahi, A., 2024. Smarter eco-cities and their leading-edge artificial intelligence of things solutions for environmental sustainability: A comprehensive systematic review. Environmental Science and Ecotechnology, 19, p.100330.

- Bigbelly, n.d. Smart waste management in the UAE: Dubai Municipality places 100 smart waste containers on Sheikh Zayed Road. Available at: https://bigbelly.com/news/smart-waste-in-the-uae

- Bigbelly, 2024. Explore how Bigbelly is supporting smart cities to boost beautification, budget and sustainability. Available at: https://bigbelly.com/news/explore-how-bigbelly

- Bobulski, J. & Kubanek, M., 2021. Deep learning for plastic waste classification system. Applied Computational Intelligence and Soft Computing, 2021(1), 6626948.

- Chaudhari, S.S. & Bhole, V.Y., 2018. Solid waste collection as a service using IoT-solution for smart cities. In: 2018 International Conference on Smart City and Emerging Technology (ICSCET). IEEE, pp.1–5.

- Datta, A., 2015. New urban utopias of postcolonial India: 'Entrepreneurial urbanization' in Dholera smart city, Gujarat. Dialogues in Human Geography, 5(1), pp.3–22.

- Dawar, I., Srivastava, A., Singal, M., Dhyani, N. & Rastogi, S., 2025. A systematic literature review on municipal solid waste management using machine learning and deep learning. Artificial Intelligence Review, 58(6), p.183.

- Deal, G., 2020. Circular economy action plan. European Commission.

- Envac, 2025. Envac Korea marks 30 years of pioneering smart waste management. Available at: https://www.envacgroup.com

- Fang, B., Yu, J., Chen, Z., Osman, A.I., Farghali, M., Ihara, I. & Yap, P.S., 2023. Artificial intelligence for waste management in smart cities: A review. Environmental Chemistry Letters, 21(4), pp.1959–1989.

- Fotovvatikhah, F., Ahmedy, I., Noor, R.M. & Munir, M.U., 2025. A systematic review of AI-based techniques for automated waste classification. Sensors (Basel), 25(10), p.3181.

- Gao, Y. & Huang, C.M., 2022. Evaluation of socially-aware robot navigation. Frontiers in

- Mousavi, S., Hosseinzadeh, A. & Golzary, A., 2023. Challenges, recent development, and opportunities of smart waste collection: A review. Science of The Total Environment, 886, p.163925.

- Örebro University, 2022. Dustbot - Networked and cooperating robots for urban hygiene. Available at: https://www.oru.se

- Owaidah, A., 2022. Hajj Crowd Analysis: Incidents and Solutions. The University of Western Australia.

- Páez-Ubieta, I.D.L., Castaño-Amorós, J., Puente, S.T. & Gil, P., 2023. Vision and tactile robotic system to grasp litter in outdoor environments. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 109(2), p.36.

- Qurashi, R.S.A., Almnjomi, M.M., Alghamdi, T.L., Almalki, A.H., Alharthi, S.S., Alharthi, A.S. & Thafar, M.A., 2025. Smart Waste Management System for Makkah City using Artificial Intelligence and Internet of Things. arXiv preprint, arXiv:2505.19040.

- Saudi Gazette, 2023. Hajj 2023: Over 68,000 tons of waste generated in 12 days. Available at: https://saudigazette.com.sa/article/633859

- Wolfenden, A., 2020. U.S. Patent No. 10,875,708. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

- Yazdani, M., Kabirifar, K., Frimpong, B.E., Shariati, M., Mirmozaffari, M. & Boskabadi, A., 2021. Improving construction and demolition waste collection service in an urban area using a simheuristic approach: A case study in Sydney, Australia. Journal of Cleaner Production, 280, p.124138.

- Zyoud, S. & Zyoud, A.H., 2025. Internet of things supporting sustainable solid waste management: Global insights, hotspots, and research trends. International Journal of Environmental Science and Technology, 22(9), pp.7641–7670.

تحسين الأداء الوظيفي لأغطية الرأس للمرأة المحرمة باستخدام منسوجات مستدامة

نادية عبد الغفور الأنديجاني - قسم تصميم الأزياء، كلية التصاميم والفنون، جامعة أم القرى

Improving the Performance of Head Covers for Women in Umra and Hajj Using Sustainable Fabrics

Nadia Abdulgafur Alandijany - Associate Professor in Apparel and Textile -UQU, College of Designs and Arts
*Corresponding author: E-mail (naalndijany@uqu.edu.sa)

الملخص

تأتي أهمية هذا البحث للتخفيف على المرأة المحرمة أثناء تأدية العمرة أو الحج، عندما تتعرض للشمس مباشرة مما يجعل من غطاء الرأس عنصرا وظيفيا، يتطلب مراعاة الجوانب الشرعية والصحية والبيئية، بينما في الوقت الحالي يتم تصنيع معظم قماش غطاء الرأس من ألياف صناعية والتي تسبب احتباس للحرارة، ولا تمتص العرق ولا تحمي من الأشعة الفوق بنفسجية والبكتيريا. في هذا البحث تم تصنيع غطاء الرأس من ثمان خامات عضوية وهي القطن العضوي والكتان والخيزران والموز والصبار والقنب والصويا واللوتس لتقييم الأداء الوظيفي لها وتحقيق الأهداف التالية: تحسين خواص المتانة والمظهرية و الراحة الحرارية والحماية لأغطية الرأس, تحقيق الاستدامة باستخدام خامات عضوية صديقة للبيئة, تقييم استخدام المنسوجات العضوية المستدامة لأغطية الرأس. تم تنفيذ (16) اختبارا لعدد (8) عينات قماش لغطاء الرأس بإجمالي (128) اختبار، والاختبارات كالتالي: الوزن، قوة الشد، الاستطالة في اتجاهي السداء واللحمة، ثبات الأبعاد في اتجاهي السداء واللحمة، مقاومة التكور، نفاذية الهواء، امتصاص الرطوبة، الانتشار الأفقي والرأسي للرطوبة ،زمن التجفيف، مقاومة الأشعة الفوق بنفسجية والبكتريا، والتحلل البيولوجي

تم تحليل النتائج إحصائيا وبيانيا، وكانت الخلاصة كالتالي: يتميز الخيزران بالإدارة الفعالة للرطوبة والمتانة والاستطالة ومقاومة البكتيريا والتحلل البيولوجي ونفاذية الهواء، ولكنه متوسط المقاومة للأشعة الفوق بنفسجية, القطن العضوي يتميز بالمتانة ومقاومة التكور والبكتيريا والأشعة الفوق بنفسجية، ولكنه بطيء نسبيا في التحلل الحيوي , يتميز اللوتس بالمتانة والاستطالة والتحلل البيولوجي والإدارة الفعالة للرطوبة، ولكنه غير مقاوم للبكتيريا ويمتلك مقاومة متوسطة للأشعة الفوق بنفسجية ومظهره غير جيد بعد الاحتكاك ,الكتان يتميز بالتحلل البيولوجي والمتانة وإدارة الرطوبة، ولكن مظهره غير جيد بعد التعرض للاحتكاك, يتميز الصويا بالإدارة الفعالة للرطوبة والتحلل الحيوي، ولكنه ضعيف نسبيا وغير مقاوم للبكتيريا, يتميز الموز بالتحلل البيولوجي ونفاذية الهواء والتجفيف السريع، ولكنه غير مقاوم للبكتيريا, يتميز الصبار بالمتانة والاستطالة بينما يستغرق وقتا للتحلل البيولوجي وغير مقاوم للبكتيريا, يتميز القنب بالمتانة والاستطالة والإدارة الفعالة للرطوبة بينما يستغرق وقتا للتحلل البيولوجي وغير مقاوم للبكتيريا

الكلمات الدالة: غطاء الرأس، الراحة الحرارية، الرطوبة، الاستدامة، المتانة، المظهرية، خواص الحماية.

Abstract

The significance of this research lies in alleviating the challenges faced by women pilgrims during Umrah and Hajj, particularly when exposed to sunlight. In such contexts, the head cover becomes a functional element that must comply with religious, health, and environmental considerations. Currently, most head cover fabrics are made from synthetic fibers, which trap heat, do not absorb perspiration, and offer limited protection against ultraviolet radiation and bacteria. In this study, head covers were produced from eight organic fibers —organic cotton, linen, bamboo, banana, aloe vera, hemp, soy, and lotus—in order to evaluate their functional performance and achieve the following objectives: Enhancing the durability, appearance, thermal comfort, and protective properties of head covers, promoting sustainability through the use of eco-friendly organic materials, Assessing the applicability of sustainable organic textiles for head covers. A total of 16 tests were conducted on 8 fabric samples (128 tests overall), including: weight, tensile strength, elongation (warp and weft directions), dimensional stability (warp and weft), pilling resistance, air permeability, moisture absorption, horizontal and vertical wicking, drying time, ultraviolet resistance, antibacterial resistance, and biodegradability. The results were statistically and graphically analysed, and the findings can be summarized as follows: Bamboo: excellent moisture management, durability, elongation, antibacterial, biodegradable and air permeability; moderate UV and resistance, Organic cotton: Durable, resistant to pilling, UV, and bacteria; slow biodegradation, Lotus: Durable, elongation, biodegradable, good moisture management; moderate UV resistance, poor abrasion appearance, not antibacterial., Linen: Durable, biodegradable, good moisture management; poor abrasion appearance., Soy fibers: Good moisture management, biodegradable; weak strength, not antibacterial , Banana: Biodegradable, good air permeability, quick drying; not antibacterial, Aloe vera: Durable, elongation; slow biodegradation, not antibacterial, Hemp: Durable, elongation, good moisture management; slow biodegradation, not antibacterial.

Keywords: Head cover, thermal comfort, moisture, sustainability, durability, appearance, protective properties.

1. المقدمة:

يُعد الحج الركن الخامس من أركان الإسلام، وتُعد العمرة شعيرة مهمة تحث عليها الشريعة، وتلتزم خلالها المرأة المُحرمة بارتداء اللباس الشرعي، ومنه غطاء الرأس(الخمار) الذي يغطي الشعر والعنق والصدر ويحقق الستر والحشمة، وتتعرض النساء خلال أداء هذه الشعائر لظروف مناخية قاسية، وزحام شديد، والمشي لمسافات طويلة، والتعرض المباشر للشمس، مما يجعل غطاء الرأس عنصراً وظيفياً أساسياً يجب أن يجمع بين المتطلبات الشرعية، الراحة الحرارية، المتانة، والصحة البيئية. تشير دراسة (رضوان وآخرون، 2021) إلى أن معظم الأغطية التجارية في السوق المصري تصنع من خامات صناعية مثل البوليستر وهذه الخامة تؤثر تأثيرا سلبيا على خواص الراحة وتفتقر إلى التهوية وامتصاص الرطوبة، كما أن مقاومتها للأشعة فوق البنفسجية والبكتيريا محدود. لذا كان هناك ضرورة للاهتمام بإيجاد علاقة بين توافر الخواص الجمالية وخواص الأداء الوظيفي التي يجب أن تتصف بها أقمشة أغطيه الرأس للسيدات

تهدف هذه الدراسة إلى إنتاج تصميمات باستخدام الأساليب التنفيذية النسيجية، ودراسة تأثير ذلك على الخواص الجمالية للأقمشة المنتجة، وتحقيق منتج متزن، بالإضافة إلى وضع معايير علميه دقيقه باستخدام الاختبارات المعملية للأقمشة وذلك لتقييم الخواص الجمالية في أقمشة أغطيه الرأس بطريقه علميه موضوعيه بدال من القياسات الذاتية الغير موضوعيه. بناء على هذه الاختبارات، يتم تحديد أفضل العينات التي يتم إنتاجها بشكل مناسب لاستخدامها كأقمشة أغطية رأس للسيدات تكون ذو مظهر جيد وتوفر الراحة لمرتديها. وأظهرت دراسة (إبراهيم، 2021) أهمية استخدام الأقمشة المزدوجة أو المزج بين الخامات المختلفة لتحقيق متانة وراحة حرارية أفضل، بينما أكدت (إيمان، 2012) أن جودة القماش تؤثر بشكل مباشر على الأداء والاستخدام النهائي كما أن الخامات عالية المتانة أكثر قدرة على تحمل الإجهادات الناتجة عن الغسل والتنظيف المتكرر، وأوضح كلا من (مرسي وحجاج، 2008) أن استخدام الأقمشة الصناعية مع المواد الكيميائية قد يسبب التهابات جلدية في فروة الرأس مما يبرز الحاجة إلى اعتماد خامات صحية آمنة للاستخدام. كما ركزت دراسة (نصار وآخرون، 2022) على خصائص الراحة الحرارية للأقمشة المصنوعة من الخيزران والمخلوطة، مبينة تفوقها في إدارة الرطوبة والعزل الحراري مقارنة بالعينات الأخرى، بينما شدد (Chinta، 2013) على أهمية خصائص امتصاص وتجفيف الرطوبة، ثبات الأبعاد، التهوية، الراحة، وخفة الوزن للمنسوجات المستخدمة في أغطية الرأس

في مجال الاستدامة، ركزت دراسة (أحمد، 2020) على استخدام خامات صديقة للبيئة لتقليل المخاطر البيئية والحصول على ملابس مستدامة، حيث أجريت اختبارات ECO-Tex على منتج مصنوع من القطن التقليدي وآخر من القطن العضوي، وأظهرت النتائج تفوق القطن العضوي من حيث المظهرية، الملمس، والحفاظ على البيئة وصحة الإنسان. كما أظهرت الدراسات الحديثة أهمية الاستدامة في صناعة المنسوجات، فقد ركز (Butturi،2025) على استراتيجيات إعادة تدوير النفايات قبل الاستهلاك وتطبيق مبادئ الاقتصاد الدائري مشيرا إلى أهمية دمج مبادئ الاستدامة في جميع مراحل إنتاج المنسوجات، بينما أوضحت (Edirisinghe، 2024) ضرورة تبني ممارسات مستدامة عبر دورة حياة المنتج لتقليل الأثر البيئي. كما أشار (Rahaman، 2024) إلى أهمية استخدام المواد المستدامة وتقنيات الإنتاج النظيفة، وناقشت (Vishwakarma، 2024) التحديات التي تواجه صناعة الملابس المستدامة مع تقديم استراتيجيات للتغلب عليها

بناءً على ذلك، هناك حاجة لدراسة متكاملة لتقييم أداء الأقمشة العضوية الصديقة للبيئة في تصميم أغطية رأس نسائية تجمع بين الراحة الحرارية، المتانة، الاستدامة، والجوانب الشرعية، والصحية، والبيئية

2. منهجية وطرق البحث

2.1 مشكلة البحث

رغم الأهمية الدينية والوظيفية لأغطية الرأس التي ترتديها المرأة المحرمة أثناء أداء مناسك الحج والعمرة، إلا أن ما هو متاح حاليًا في الأسواق يعتمد في الغالب على خامات صناعية غير مستدامة، مثل ألياف البولي استر، التي قد تؤدي إلى انخفاض الراحة الحرارية وامتصاص الرطوبة، بالإضافة إلى أثرها السلبي على البيئة من حيث الانبعاثات الكربونية وصعوبة التحلل ويخالف الاتجاهات العالمية نحو استخدام منسوجات مستدامة صديقة للبيئة. ومن هنا تبرز الحاجة إلى دراسة تحسين الأداء الوظيفي لغطاء الرأس باستخدام خامات عضوية مستدامة تحقق متطلبات الراحة والجودة مع الحفاظ على البعد البيئي. فهل تسهم الخامات العضوية المستدامة في تحسين الأداء الوظيفي لأغطيه الراس للمراءة المحرمة بما يحقق التوازن بين الجانب الوظيفي والشرعي والبيئي لأداء الشعائر بكل يسر وسهولة؟

2.2 أهمية البحث

1. يسهم البحث في توفير أغطية رأس للمرأة المُحرِمة تتوافق مع الضوابط الشرعية الخاصة بالإحرام
2. يُعالج مشكلات تواجه النساء أثناء الحج والعمرة، مثل الإجهاد الحراري، التعرق الزائد، تهيج الجلد، من خلال استخدام خامات ذات تهوية جيدة وخصائص مضادة للميكروبات.
3. يواكب التحول نحو الحج الأخضر باستخدام منسوجات مستدامة، قابلة للتحلل البيولوجي، وآمنة بيئيًا، مما يحد من الأثر البيئي للنفايات النسيجية في مواسم الحج والعمرة.
4. تطوير منتجات نسيجية مبتكرة محليًا، يمكن تسويقها ضمن مستلزمات الحج والعمرة، ما يخدم الاقتصاد الوطني
5. يتوافق مع رؤية المملكة العربية السعودية 2030 في تعزيز الاستدامة، والابتكار في قطاع الحج والعمرة، وتحسين جودة حياة الزوار والمعتمرين من خلال منتجات امنه بيئيًا وصحيًا.

2.3 أهداف البحث

تهدف الدراسة الحالية الى:

1. تحسين خواص المتانة والمظهرية والحماية لأغطية الرأس للمرأة المحرمة لأداء الشعائر

بـكل يسـر وسـهولة.

2.تحقيـق الاسـتدامة باسـتخدام خامـات عضويـة (organic) صديقـه للبيئـة تفـي بمتطلبـات الأداء الوظيفـي

3. تقييـم فعاليـة اسـتخدام المنسـوجات العضويـة المسـتدامة فـي أغطيـة الـرأس للمـرأة المحرمـة مـن الناحيـة الوظيفيـة مـع ضمـان الالتـزام بالضوابـط الشـرعية.

2.4 فروض البحث

1. تتأثر خواص المتانة باختلاف الخامات العضوية المستدامة.

2. تتأثر خواص العناية والمظهرية باختلاف الخامات العضوية المستدامة.

3. تتأثر خواص الراحة الحرارية باختلاف الخامات العضوية المستدامة.

4. تتأثر خواص الحماية والاستدامة باختلاف الخامات العضوية المستدامة.

2.5 منهـج البحـث: يسـتخدم فـي هـذا البحـث المنهـج التجريبـي الـذي يعنـي اسـتخدام التجربـة فـي إثبـات الفـروض المطروحـة للبحـث ولتوضيـح العلاقـات والعوامـل المؤثـرة فـي موضـوع الدراسـة (عبيـدات وآخـرون ,2000) وذلـك باختيـار ثمـان عينـات مختلفـة مـن قمـاش غطـاء الـرأس مـن خامـات طبيعيـة عضويـة متعـددة لدراسـة تأثيرهـا علـى الخـواص للوصـول لأفضـل أداء وظيفـي لغطـاء الـرأس

2.6 أدوات البحث

1.2.6 تصميـم التجـارب: تـم اسـتخدام ثمـان أنـواع مختلفـة مـن الخامـات الطبيعيـة العضويـة لتقييـم القمـاش المسـتخدم فـي تصنيـع غطـاء الـرأس كالتالـي

جدول 1 : الخامات المستخدمة ووزنها بالمتر المربع

الخامة المستخدمة	القطن العضوي Organic Cotton	الكتان Linen	الخيزران Bamboo	الموز Banana	الصبار Aloe Vera	القنب العضوي Hemp	الصويا Soya	اللوتس Lotus
الوزن (جم/م٢)	١٢٥	٢٠٠	١٢٥	٩٠	١٠٥	١٣٠-١٢٥	٩٠-٨٠	١١٠-١٢٠

وفـي تصميـم التجـارب، فـإن المتغيـر المسـتقل هـي الخامـات المختلفـة وعددهـم ثمانيـة وبالتالـي فـإن عـدد التجـارب ثمانيـة تجـارب لعينـات مختلفـة مـن القمـاش المسـتخدم فـي صناعـة غطـاء الـرأس. أمـا المتغيـرات التابعـة فهـي الخـواص المقاسـة فـي الاختبـارات المعمليـة، والخـواص التـي يتـم قياسـها هـي: خـواص المتانـة (قـوة الشـد والاسـتطالة)، خـواص العنايـة والمظهريـة (التكـور – ثبـات الأبعـاد)، خـواص الراحـة الحراريـة (كميـة امتصـاص المـاء- معـدل التجفيـف – نفاذيـه الهـواء – الانتشـار الأفقـي والرأسـي)، خـواص الحمايـة والاسـتدامة (مقاومـة الأشـعة الفـوق بنفسـجية -مقاومـه البكتريـا -التحلـل البيولوجـي). وتـم أجـراء الاختبـارات المعمليـة علـى عينـات الأقمشـة المسـتخدمة لغطـاء الـرأس حيـث وضعـت العينـات فـي الجـو القياسـي لمـدة 24 سـاعة حسـب المواصفـة الأمريكيـة (1) ASTM D1776 لتتكيـف مـع الجـو القياسـي فـي المختبـر

2.2.6 قياسات خواص الأداء الوظيفي لعينات أقمشة غطاء الرأس

قياس وزن المتر المربع

باستخدام المواصفة الأمريكية القياسية رقم ASTMD 3776 .

قياس خواص المتانة Durability

- قيـاس قـوة الشـدةTensile Strength فـي اتجاهـي السـداء واللحمـة باسـتخدام المواصفـة الأمريكيـة ASTM D 5034

- قيـاس نسـبة الاسـتطالة للقمـاش Elongation Percentage of Fabric باسـتخدام المواصفـة الأمريكيـة ASTM D 5034

قياس خواص العناية والمظهرية Appearance

- اختبـار مقاومـة التكـور للقمـاش Abrasion Resistance باسـتخدام المواصفـة الأمريكيـة رقـم EN ISO 12945-2

- قيـاس ثبـات الأبعـاد Dimension Stability باسـتخدام مواصفـة الأمريكيـة رقـم AATCC 18

قياس خواص الراحة الحرارية Thermal comfort

- قيـاس نفاذيـة الهـواء Fabric air permeability باسـتخدام المواصفـة الأمريكيـة رقـم ASTM D 737

- قيـاس خـواص الرطوبـة Moisture Properties

تـم تقييـم الرطوبـة مـن خـلال عـدة اختبـارات متنوعـة كالتالـي: .

قيـاس الانتشـار الأفقـي للرطوبـة فـي القمـاشHorizontal Wicking of Water in Fabric بالمواصفـة AATCC 198- 2011

قيـاس الارتفـاع الرأسـي للرطوبـة فـي القمـاش بالخاصيـة الشـعرية Vertical (Capillary) Wicking of Water in Fabric، بواسـطة المواصفـة الأمريكيـة رقـم AATCC 197

اختبـار زمـن التجفيـفPercent of Drying Rate، باسـتخدام المواصفـة القياسـية الأمريكيـة رقـم AATCC 199- - 2011

اختبار معدل امتصاص الماء، باستخدام المواصفة الأمريكية رقم AATCC 79

قياس خواص الحماية Protection properties

- قيـاس مقاومـة الأشـعة الفـوق بنفسـجيةUltraviolet Protection، باسـتخدام المواصفـة رقـم (AATCC 183 -2010)

- قيـاس مقاومـة القمـاش لنمـو البكتيريـا Antibacterial، باسـتخدام المواصفـة رقـم147 AATCC

- التحلـل البيولوجـي Biodegradation

تـم تطبيـق مواصفـات الأيـزو التاليـة DIN EN ISO 11721, DIN EN ISO 11721-2, DIN EN ISO 12225-1, EN ISO 846

3. النتائج والمناقشة

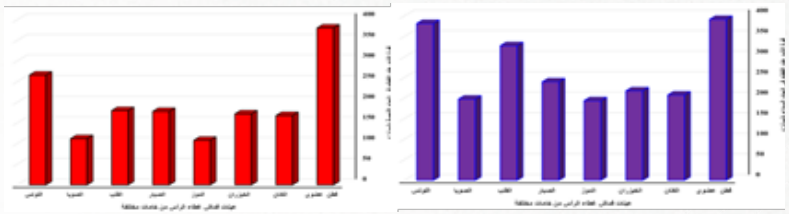
جدول 2: نتائج قياس عينات أغطية الرأس معمليا

رقم العينة	العينة	خواص المتانة				خواص العناية والمظهرية			خواص الراحة الحرارية					خواص التعدية						
		قوة الشد و إعادة الاستطالة (نيوتن)	قوة الشد و إعادة الاستطالة (نيوتن)	الاستطالة و إعادة الاستطالة (%)	الاستطالة و إعادة الاستطالة (%)	مقاومة التكور	الانكماش و إعادة الانتعاش	الانكماش و إعادة الانتعاش	عكارة الهواء (سم³/ سم²/ ثانية)	الانتشار الأفقي للرطوبة (سم)	الانتشار الرأسي للرطوبة (سم)	معدل امتصاص الماء (g/g)	زمن التبخير (دقيقة)	مقاومة البكتيريا	عدد مستعمرات البكتيريا من النوع S. aureus(ATCC 6538)	نسبة تخفيض عدد مستعمرات البكتيريا من النوع S. aureus(ATCC 6538) (%)	نسب التحلل البيولوجي			
																	بعد شهرين	بعد 3 شهور	بعد 6 شهور	
١	قماش القطن العضوي	٢٤٤	٢٠٨	١١٠١	٢١٤	٥٠٤	٨٧	٢٤١	٣٤	١١	٨	٢٤١	٤٠٢	٢٨	٨٩	٢٤٤	٥٠٤	٢٤	٥٠	١٠٠%
٢	قماش الكتان العضوي	٢٠٨	٢٤١	٧٠١	٢٤١	٢٤١	٢	٢٤	٢٤	١٤	٩	٢٤١	٢٠٤	٣٠	٢٤١	٥٤٢	٢٤٤	٢٤	٢٥%	٢٥%	١٠٠%
٣	قماش الخيزران العضوي	٢٤٤	٢٤١	٢٧١	٢٤١	٢٤	١	٢٤	٣٤	٢٤	٨١	٢٤	٤٠١	٣٠	٢٤	٢٤٤	٢٤٤	٢٤	٥٠%	٢٥%	١٠٠%
٤	قماش الجوز العضوي	٢٤٤	٢٤١	٢٠١	٢٤١	٢٤	١	٢٤	٢٤	٢٤	٨	٢٤	٤٠٢	٣٠	٢٤	٥٤٢	٢٤٤	٢٤	٥٠%	٢٥%	١٠٠%
٥	قماش الصبار العضوي	٢٤٤	٢٤١	٢٨١	٢٤١	٢٤	٢	٢٤	٢٤	٢٤	٨	٢٤	٤٠٢	٣٠	٢٤	٥٤٢	٢٤٤	٢٤	٥٠%	٢٥%	١٠٠%
٦	قماش القب العضوي	٢٤٤	٢٤١	٢٠١	٢٤١	٢٤	١	٢٤	٢٤	٢٤	٨	٢٤	٤٠٢	٣٠	٢٤	٥٤٢	٢٤٤	٢٤	٥٠%	٢٥%	١٠٠%
٧	قماش الصويا العضوي	٢٤٤	٢٤١	٢٢١	٢٤١	٢٤	١	٢٤	٢٤	٢٤	٨	٢٤	٤٠٢	٣٠	٢٤	٥٤٢	٢٤٤	٢٤	٥٠%	٢٥%	١٠٠%
٨	قماش الجوتس العضوي	٢٤٤	٢٤١	٢٤١	٢٤١	٢٤	٢	٢٤	٢٤	٢٤	١٠	٢٤	٤٠٢	٣٠	٢٤	٥٤٢	٢٤٤	٢٤	٥٠%	٢٥%	١٠٠%

نتائج خواص المتانة

تأثير نوع خامات قماش غطاء الرأس على قوة الشد في اتجاهي السداء واللحمة عند القطع

لمعرفة التأثير المعنوي لنوع خامات قماش غطاء الرأس على قوة الشد في اتجاهي السداء واللحمة، تم عمل تحليل إحصائي باستخدام تحليل التباين (ANOVA) واتضح وجود تأثير معنوي للخامات على قوة الشد في اتجاهي السداء واللحمة، ولتحديد شكل العلاقة بين نوع الخامات قماش غطاء الرأس وخاصية قوة الشد عند القطع في اتجاهي السداء واللحمة تم رسم الشكل التوضيحي التالي لدراسة هذه العلاقة:



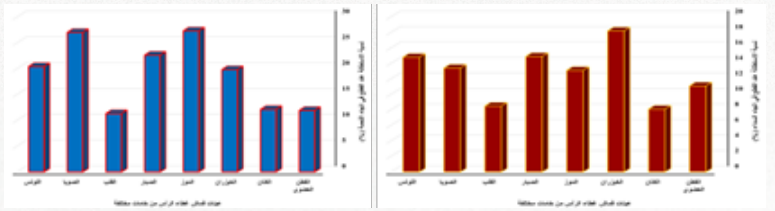
شكل1: العلاقة بين نوع خامات قماش غطاء الرأس وقوة الشد عند القطع في اتجاهي السداء واللحمة

يوضح شكل (1) العلاقة بين نوع خامات قماش غطاء الرأس وقوة الشد في اتجاهي السداء واللحمة، حيث أن أعلى قيم لقوة الشد في اتجاهي السداء واللحمة هي لقماش القطن العضوي واللوتس والخيزران والصبار والقنب والكتان، بينما أقل قيم لقوة الشد كانت للقماش المصنوع من الصويا والموز،

ويرجع أسباب التفاوت بين قوة الشد لجميع الخامات الى اختلاف متانة الشعيرات لكل خامة، حيث تتميز شعيرات القطن العضوي والخيزران بأنها طويلة التيلة وأنها ألياف وشعيرات مباشرة، أما شعيرات الخامات الأخرى فيتم الحصول عليها بعد عمليات تحويلية، مما يقلل من متانتها، وبصفة عامة فإن المتانة لجميع الخامات مقبولة لعدم وجود إجهادات على غطاء الرأس أثناء الاستخدام النهائي.

تأثير نوع خامات قماش غطاء الرأس على استطالة القماش في اتجاهي السداء واللحمة عند القطع

لمعرفة التأثير المعنوي لنوع خامات قماش غطاء الرأس على الاستطالة في اتجاهي السداء واللحمة، تم عمل تحليل إحصائي باستخدام اختبار تحليل التباين (ANOVA) واتضح وجود تأثير معنوي للخامات على الاستطالة في اتجاهي السداء واللحمة، ولتحديد شكل العلاقة بين نوع الخامات قماش غطاء الرأس وخاصية الاستطالة عند القطع في اتجاهي السداء واللحمة تم رسم الشكل التوضيحي التالي لدراسة هذه العلاقة



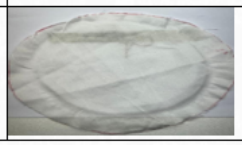
شكل 2 : العلاقة بين نوع خامات قماش غطاء الرأس والاستطالة عند القطع في اتجاهي السداء واللحمة

يوضح شكل (2) العلاقة بين نوع خامات قماش غطاء الرأس والاستطالة عند القطع في اتجاهي السداء واللحمة، حيث حققت خامات الموز والصويا والصبار والخيزران واللوتس أعلى استطالة في الاتجاهين، وهذا سيؤدي إلى توفير الراحة أثناء الاستخدام النهائي لهذه الخامات. والاستطالة لباقي الخامات تعتبر مقبولة، أما غطاء الرأس الذي لا يوجد به استطالة كافية، فإنه عند التعرض والتشابك مع شعر الرأس، فإما أن يتعرض غطاء الرأس للتمزق أو تتقطع شعيرات الرأس، وهذه من الأمور الغير مريحة والغير مقبولة

نتائج خواص العناية والمظهرية

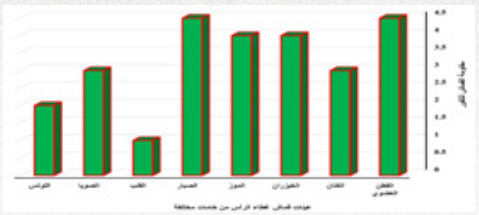
يعتبر مظهر قماش غطاء الرأس أمرا مطلوبا للمظهر العام، ويرتبط مظهر قماش غطاء الرأس بوظيفته، كما يعد مظهر قماش غطاء الرأس مؤشرًا على جودته ومتانته، فأقمشة غطاء الرأس عالية الجودة تقاوم التآكل والتلف وتحافظ على لونها وشكلها بشكل أفضل، ويؤثر ملمس قماش غطاء الرأس بشكل كبير على الشعور العام بالراحة، واختبار مقاومة التكور والتوبير هو الذي يعطي انطباعا عن سلوك وأداء قماش غطاء الرأس أثناء الاستخدام

تأثير نوع خامات قماش غطاء الرأس على مقاومة التكور

تقييم مظهرية قماش الكتان بعد التكور (٥/٣)	تقييم مظهرية قماش القنب بعد التكور (٥/١)	تقييم مظهرية قماش الصويا بعد التكور (٥/٣)	تقييم مظهرية قماش اللوتس بعد التكور (٥/٢)
			

جدول 3: يوضح صور التكور للعينات الغير مقبولة وهي الكتان والقنب والصويا واللوتس بعد اجراء اختبار الاحتكاك (15 ألف دورة)

لمعرفة التأثير المعنوي لنوع خامات قماش غطاء الرأس على التكور والتوبير، تم عمل تحليل إحصائي باستخدام اختبار تحليل التباين (ANOVA) واتضح وجود تأثير معنوي للخامات على التكور، ولتحديد شكل العلاقة بين نوع الخامات قماش غطاء الرأس والتكور تم رسم الأشكال التوضيحية التالي لدراسة هذه العلاقة

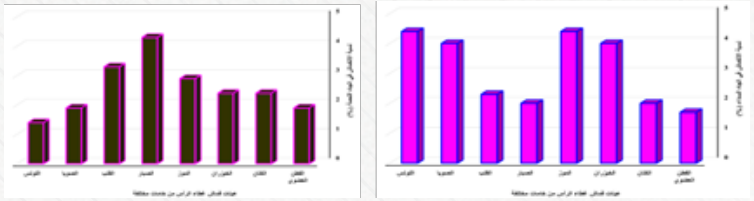


شكل3: العلاقة بين نوع خامات قماش غطاء الرأس ومقاومة القماش للتكور (المظهرية).

يوضح شكل (3) أن عينات غطاء الرأس المصنوعة من القطن العضوي والخيزران والموز والصبار بعد تعرضهم لعدد (15 ألف دورة احتكاك) تعتبر أكثر مقاومة للتآكل والاحتكاك مقارنة بالعينات الأخرى، وهذا يساهم في زيادة العمر الافتراضي لهذه الخامات والحفاظ على المظهرية لفترة زمنية طويلة كغطاء للرأس، وتؤثر مقاومة التآكل بشكل مباشر على مدة بقاء القماش قبل ظهور علامات التآكل عليه، كما تحافظ هذه الأقمشة التي تتميز بمقاومة جيدة ضد التآكل على مظهرها وسلامتها لفترة أطول، حتى مع الاستخدام المتكرر

تأثير نوع خامات قماش غطاء الرأس على ثبات الأبعاد (الانكماش) في اتجاهي السداء واللحمة

لمعرفة التأثير المعنوي لنوع خامات قماش غطاء الرأس على ثبات الأبعاد (الانكماش)، تم عمل تحليل إحصائي باستخدام تحليل التباين (ANOVA) واتضح وجود تأثير معنوي للخامات على ثبات الأبعاد، ولتحديد شكل العلاقة بين نوع الخامات قماش غطاء الرأس وثبات الأبعاد تم رسم الأشكال التوضيحية التالي لدراسة هذه العلاقة.



شكل 4: العلاقة بين نوع خامات قماش غطاء الرأس ونسبة الانكماش في اتجاهي السداء واللحمة

يوضح شكل(4) العلاقة بين نوع خامات قماش غطاء الرأس ونسبة الانكماش بعد الغسيل، ويلاحظ بصفة عامة فإن الخامات المصنوع منها غطاء الرأس هي خامات طبيعية، وبالتالي فإن نسبة الانكماش سوف تكون عالية نسبيا، ويتأثر الانكماش في كل اتجاه عندما يكون القماش مبللا، فعندما تنتفخ خيوط اللحمة بسبب الرطوبة

قد تقترب من بعضها، مما يسبب انكماش القماش في اتجاه السداء وينطبق هذا المبدأ أيضًا على انكماش خيوط اللحمة، حيث تقترب خيوط السداء من بعضها عندما تنتفخ خيوط اللحمة، لكن أقل قيم لنسب الانكماش في اتجاه السداء، تحققت مع خامات القطن العضوي والكتان

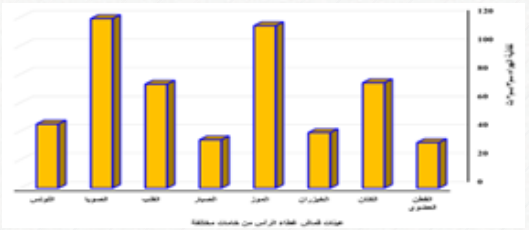
والصبار والقنب، لأنها ألياف طويلة التيلة.

وبالتالي فان أبعاد غطاء الرأس في اتجاه السداء لن تتأثر بالغسيل المتكرر، وأقل نسب انكماش في اتجاه اللحمة تحققت مع قماش اللوتس والقطن العضوي والكتان بسبب طول شعيرات الألياف المكونة لهذا القماش، وبالتالي فإن أبعاد غطاء الرأس في اتجاه اللحمة لن تتأثر بالغسيل المتكرر

نتائج خواص الراحة الحرارية

تأثير نوع خامات قماش غطاء الرأس على نفاذية الهواء

لمعرفة التأثير المعنوي لنوع خامات قماش غطاء الرأس على نفاذية الهواء، تم عمل تحليل إحصائي باستخدام اختبار تحليل التباين (ANOVA) واتضح وجود تأثير معنوي للخامات على نفاذية الهواء، ولتحديد شكل العلاقة بين نوع الخامات قماش غطاء الرأس وخاصية نفاذية الهواء تم رسم الشكل التوضيحي التالي لدراسة هذه العلاقة



شكل5: العلاقة بين نوع خامات قماش غطاء الرأس ونفاذية الهواء

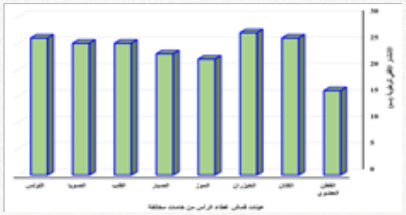
يوضح شكل(5) العلاقة بين نوع خامات قماش غطاء الرأس ونفاذية الهواء، حيث تحدد نفاذية الهواء مدى سهولة مرور الهواء عبر قماش غطاء الرأس مما يؤثر على قابلية التنفس وإدارة الرطوبة، والتبادل الحراري بين الجسم والمحيط الخارجي، ويلاحظ من الشكل أن خامات الكتان والموز والقنب والصويا تحقق أعلى نفاذية هواء، بقيم أعلى من (60 سم3/سم2/ث) وهذه القيم وإن كانت تسمح بالتبادل الحراري وخروج الحرارة والرطوبة مما يحافظ على جفاف الرأس.

لكنها لا تحمي الرأس من الحرارة والبرد، وبالتالي فإن باقي الخامات مثل القطن العضوي والخيزران والصبار واللوتس تحقق نفاذية هواء مقبولة، وتسمح بخروج الحرارة والعرق، وتحقق حماية أفضل من الرياح والبرد والحر

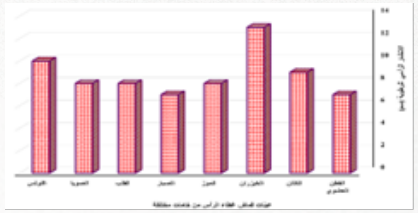
خواص الرطوبة

تأثير نوع خامات قماش غطاء الرأس على الانتشار الأفقي والرأسي للرطوبة

لمعرفة التأثير المعنوي لنوع خامات قماش غطاء الرأس على الانتشار الأفقي والرأسي للرطوبة، تم عمل تحليل احصائي باستخدام اختبار تحليل التباين (ANOVA) واتضح وجود تأثير معنوي للخامات على الانتشار الأفقي للرطوبة، ولتحديد شكل العلاقة بين نوع الخامات قماش غطاء الرأس وخاصية الانتشار الأفقي للرطوبة تم رسم الأشكال التوضيحية التالية لدراسة هذه العلاقة



شكل6: يوضح العلاقة بين نوع خامات قماش غطاء الرأس والانتشار الأفقي للرطوبةونفاذية الهواء



شكل7: يوضح العلاقة بين نوع خامات قماش غطاء الرأس والانتشار الرأسي للرطوبة

يوضح الشكل رقم (6) الانتشار الأفقي للرطوبة والسوائل لجميع الخامات، حيث يوضح الشكل أن السوائل تنتشر أفقيا بمسافات كبيرة على كل من قماش الخيزران والكتان واللوتس والصويا والقنب على الترتيب.

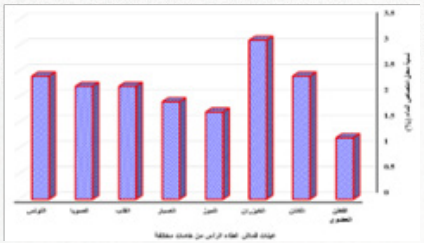
يلي ذلك باقي الخامات ولكن بمسافات أقل نسبيا، وأقل مسافة انتشار للسوائل أفقيا مع القطن العضوي، حيث وصلت إلى 25 سم مع الخيزران و 15 سم مع القطن العضوي، و سرعة انتشار السوائل على كل من الخيزران والكتان تساعد على سرعة نقل السوائل من مكان الى آخر وبالتالي تساعد على نقل الرطوبة والسوائل خارج الجسم عندما يتعرض للتعرق وبالتالي يجف الجسم

ويوضح الشكل رقم (7) الانتشار الرأسي للرطوبة والسوائل لجميع الخامات، حيث يوضح الشكل أن السوائل تنتشر رأسيا بمسافات كبيرة على كل من قماش الخيزران حيث وصلت الى 13 سم مع الخيزران واللوتس والكتان على الترتيب.

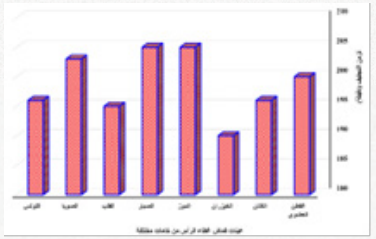
يلي ذلك باقي الخامات ولكن بمسافات أقل نسبيا، وأقل مسافة انتشار للسوائل رأسيا مع القطن العضوي، حيث وصلت الى 7 سم مع القطن العضوي، والانتشار الرأسي يسمى الخاصية الشعرية، حيث ترتفع السوائل في شعيرات المنسوج الضيقة بسبب قوى الالتصاق بين السوائل والشعيرات والتماسك بين جزيئات السوائل، وسرعة انتشار السوائل رأسيا على كل من الخيزران واللوتس تساعد على سرعة نقل السوائل من الى أعلى وبالتالي تساعد على نقل الرطوبة والسوائل خارج الجسم عندما يتعرض للتعرق وبالتالي يجف الجسم

تأثير نوع خامات قماش غطاء الرأس على معدل امتصاص الرطوبة (%)

لمعرفة التأثير المعنوي لنوع خامات قماش غطاء الرأس على معدل امتصاص الرطوبة، تم عمل تحليل إحصائي باستخدام تحليل التباين (ANOVA) واتضح وجود تأثير معنوي للخامات على معدل امتصاص الرطوبة، ولتحديد شكل العلاقة بين نوع الخامات قماش غطاء الرأس وخاصية معدل امتصاص الرطوبة (%)، تم رسم الشكل التوضيحي التالي لدراسة هذه العلاقة



شكل 8: يوضح العلاقة بين خامات نوع قماش غطاء الرأس وخاصية معدل امتصاص الرطوبة والسوائل (%)



شكل 9: يوضح العلاقة بين نوع خامات قماش غطاء الرأس وخاصية زمن التجفيف (دقيقة)

يوضح شكل (8) معدل امتصاص السوائل كنسبة من وزن الخامة التي تمتص السوائل لجميع الخامات المختلفة، وأعلى معدل امتصاص للسوائل لقماش الخيزران بنسبة 3% يلي ذلك الكتان واللوتس والقنب والصوبا، حيث تحتوي هذه الألياف على مسام أو فراغات صغيرة قادرة على الاحتفاظ بالسوائل، ويمكن لقماش الخيزران امتصاص السوائل وتوزيعها للحصول على تجفيف أسرع من الخامات الأخرى، لكن امتصاص القطن العضوي للسوائل قليل نسبيا بسبب كثافة خيوط قماش القطن العضوي، والتي تقلل من امتصاص وانتشار السوائل

تأثير نوع خامات قماش غطاء الرأس على زمن التجفيف (بالدقيقة).

لمعرفة التأثير المعنوي لنوع خامات قماش غطاء الرأس على زمن التجفيف (دقيقة)، تم عمل تحليل إحصائي باستخدام اختبار تحليل التباين (ANOVA) واتضح وجود تأثير معنوي للخامات على زمن التجفيف (دقيقة)، ولتحديد شكل العلاقة بين نوع الخامات قماش غطاء الرأس وزمن التجفيف تم رسم الشكل التوضيحي (9) الذي يوضح العلاقة بين نوع خامات قماش غطاء الرأس وزمن التجفيف، حيث يجف قماش الخيزران بسرعة عن باقي الخامات الأخرى بزمن قدره (190 دقيقة)

ويرجع ذلك بسبب المسام والتجاويف السداسية الموجودة في شعيرات الخيزران التي تسمح بسحب الرطوبة من الرأس والعمل على تبخيرها وتسرع عملية تجفيف العرق مما يجعل غطاء الرأس المصنوع من الخيزران يجف أسرع من الخامات الأخرى، يلي ذلك القنب واللوتس والكتان بأوقات مختلفة للتجفيف، حيث تتفاوت معدلات جفاف الأقمشة المختلفة تبعًا لتركيبها ونوع الخامات، وغالبا ما تُصنع الأقمشة سريعة الجفاف بتجهيزات خاصة لتعزيز امتصاص الرطوبة وتدفق الهواء، مما يؤدي إلى جفاف أسرع، أما القطن العضوي فيجف ببطء نظرا لأنه ذات كثافة خيوط عالي، ويوجد بعض العوامل التي تؤثر على زمن التجفيف مثل

- نوع الخامات، حيث تجف الألياف النسيجية الطاردة للماء أسرع من الألياف النسيجية المحبة للماء

- سمك القماش: تستغرق الأقمشة السميكة وقتا أطول للجفاف.

- الظروف البيئية: تلعب درجة الحرارة والرطوبة وتدفق الهواء دورا مهما في وقت تجفيف القماش

- وبالتالي فان قماش الخيزران هو أفضل الخامات التي تجف بسرعة عن باقي الخامات الأخرى

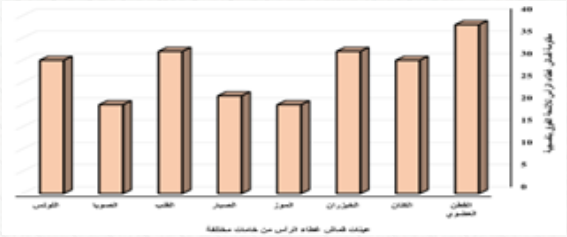
نتائج خواص الحماية

الحماية من الأشعة الفوق بنفسجية

يتم تقييم كفاءة القماش للحماية من الأشعة الفوق بنفسجية، من خلال تقدير كمية الأشعة الفوق بنفسجية التي يتم حجزها ومنعها من المرور، وكلما كان للقماش القدرة على حجب أكبر كمية من الأشعة الفوق بنفسجية كلما أصبح جيدا

تأثير نوع خامات قماش غطاء الرأس على مقاومة الأشعة الفوق بنفسجية

لمعرفة التأثير المعنوي لنوع خامات قماش غطاء الرأس على مقاومة الأشعة الفوق بنفسجية تم عمل تحليل إحصائي باستخدام اختبار تحليل التباين (ANOVA) واتضح وجود تأثير معنوي للخامات على مقاومة الأشعة الفوق بنفسجية، ولتحديد العلاقة بين نوع الخامات قماش غطاء الرأس وخاصية مقاومة الأشعة الفوق بنفسجية تم رسم الشكل التوضيحي التالي لدراسة هذه العلاقة



شكل10: يوضح العلاقة بين نوع خامات قماش غطاء الرأس ومقاومة

يلاحظ من شكل (10) أن مقاومة القطن العضوي للأشعة الفوق بنفسجية أفضل من باقي الخامات الأخرى بمستوى حماية (جيد جدا)، يلي ذلك الخيزران والقنب واللوتس والكتان، وترجع مقاومة القطن العضوي وقماش اللوتس للأشعة الفوق بنفسجية الى زيادة كثافة خيوط السداء واللحمة كما أن قماش القطن العضوي واللوتس يعكسان أشعة الشمس مما يساعد على مقاومة الأشعة الفوق بنفسجية ولا يسمح لها بالمرور مما يساعد على حماية الرأس من هذه الأشعة.

مقاومة القماش لنمو البكتيريا

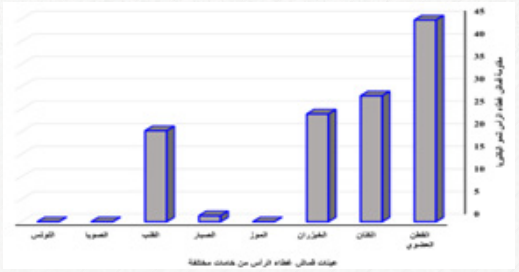
تم حساب نسب انخفاض نمو البكتيريا من المعادلة التالية:

R (%) = A-B/A × 100 حيث A هو عدد مستعمرات العينة الضابطة، وB هو عدد مستعمرات عينة قماش الرأس.

تأثير نوع خامات قماش غطاء الرأس على مقاومة القماش لنمو البكتيريا

لمعرفة التأثير المعنوي لنوع خامات قماش غطاء الرأس على مقاومة القماش لنمو البكتيريا، تم عمل تحليل إحصائي باستخدام اختبار تحليل التباين (ANOVA) واتضح وجود تأثير معنوي للخامات على مقاومة القماش لنمو البكتيريا

ولتحديد شكل العلاقة بين نوع الخامات قماش غطاء الرأس وخاصية مقاومة القماش لنمو البكتيريا تم رسم الشكل التوضيحي التالي لدراسة هذه العلاقة.



شكل11: يوضح العلاقة بين نوع خامات قماش غطاء الرأس ومقاومة البكتيريا

تساعد الأقمشة المضادة للبكتيريا في تقليل خطر التلوث المتبادل والعدوى، ويوضح الشكل(11) أن قماش غطاء الرأس المصنوع من الخيزران يتميز بخصائص ذاتية مضادة للبكتيريا دون معالجات كيمائية، وهذه الخامة جيدة لأنها ملاصقة للرأس وتعتبر صحية وآمنة، ولأنها تقلل من نمو البكتيريا المسببة للروائح الغير مرغوبة فإنها تحافظ على انتعاش قماش غطاء الرأس لفترة أطول.

بالإضافة إلى أنها تقلل من الغسيل المتكرر نظرا لخصائصها المضادة للميكروبات، وبالتالي تحتاج غسيل أقل، كما تساعد على تحسين النظافة وتساعد هذه الخامة على عدم تكون البكتيريا وبالتالي تحافظ على الصحة العامة للرأس

التحلل البيولوجي لعينات قماش غطاء الرأس

تم وضع عينات التحلل البيولوجي داخل تربة عادية لمدة زمنية مختلفة بداية من شهر يناير 2025، وتم تغطيتهم بالتراب ورشهم بالمياه العادية، وتم ملاحظة التغيرات التي طرأت على القماش على فترات زمنية متباينة، حتى تحللت جميع العينات في بداية شهر مايو 2025.

واستغرقت عملية التحلل الكاملة في ظروف طبيعية أربع شهور تقريبا، وقد تحللت جميع العينات تحللا كاملا مما يساعد على الاستدامة والحفاظ على البيئة، مع تطبيق المواصفات: DIN EN ISO 11721, DIN EN ISO 11721-2, DIN EN ISO 12225-1, EN ISO 846

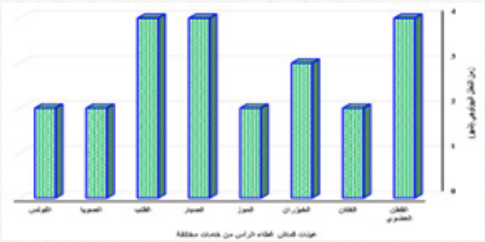
جدول (4) التغيرات التي طرأت على عينات أقمشة غطاء الرأس أثناء اختبار التحلل البيولوجي

رقم العينة	الخامة	الفترة	الصورة	المشاهدة
١	القطن العضوي	اليوم الأول		وضع عينة غطاء الرأس داخل التربة .
		بعد شهرين		ظهور البكتيريا والفطريات على قماش غطاء الرأس.
		بعد ٤ شهور		لوحظ تدهور وتحلل عضوي كامل لقماش غطاء الرأس.
٢	الكتان	اليوم الأول		وضع عينة غطاء الرأس المصنوعة من الكتان داخل التربة
		بعد شهر		يلاحظ ظهور البكتيريا والفطريات على عينة قماش غطاء الرأس
		بعد شهرين		يلاحظ تدهور وتحلل عضوي كامل لقماش غطاء الرأس
٣	الخيزران	اليوم الأول		وضع عينة غطاء الرأس
		بعد شهر		ظهور البكتيريا والفطريات على عينة قماش غطاء الرأس
		بعد شهرين		يلاحظ تحلل بيولوجي كامل لعينة قماش غطاء الرأس
٤	الموز	اليوم الأول		وضع عينة غطاء الرأس داخل التربة .

		بعد شهر		شهر لوحظ بعض التغيرات والتدهور على عينة غطاء الرأس
		بعد شهرين		لوحظ تدهور وتحلل كامل لعينة غطاء الرأس

تأثير نوع خامات قماش غطاء الرأس على زمن التحلل البيولوجي

لمعرفة التأثير المعنوي لنوع خامات قماش غطاء الرأس على زمن التحلل البيولوجي، تم عمل تحليل إحصائي باستخدام اختبار تحليل التباين (ANOVA)، ولتحديد ولمعرفة شكل العلاقة بين نوع الخامات قماش غطاء الرأس وزمن التحلل البيولوجي تم رسم الشكل التوضيحي التالي لدراسة هذه العلاقة



شكل 12: يوضح العلاقة بين نوع خامات قماش غطاء الرأس وزمن التحلل البيولوجي

يوضح شكل (12) العلاقة بين نوع خامات قماش غطاء الرأس وزمن التحلل البيولوجي، وتم دراسة عملية التحلل البيولوجي لعينات أقمشة غطاء الرأس تحت تأثير الكائنات الحية الدقيقة الموجودة في التربة لمدة أربع شهور، وتم قياس التغيرات التي طرأت على العينات

حيث تحللت خامات الكتان والخيزران والموز والصويا واللوتس في فترة زمنية قصيرة بعد شهرين، بالإضافة الى أن باقي الخامات الأخرى قد تحللت أيضا ولكن بعد أربع شهور وتعتبر هذه الخامات صديقة للبيئة. وبما أن معظم الألياف المستخدمة لدراسة التحلل البيولوجي طبيعية، ويتكون معظمها من السليلوز، فقد كان من الصعب تحديد أيهما أسرع تحللا بيولوجيًا من الآخر، حيث تم استخدام تقنية اتصال القماش المباشر بالتربة.

ولاحظنا بعض الألياف مثل الكتان والخيزران والموز والصويا واللوتس أكثر تحللا بيولوجيًا خلال شهرين من الألياف الأخرى المحتوية على السليلوز مثل القطن العضوي، حيث أن الكتان قابل للتحلل الحيوي بدرجة عالية، خاصة عند عدم معالجته، والخيزران قابلة للتحلل الحيوي، ولكن طرق المعالجة والتجهيز قد تؤثر على سرعة التحلل الحيوي

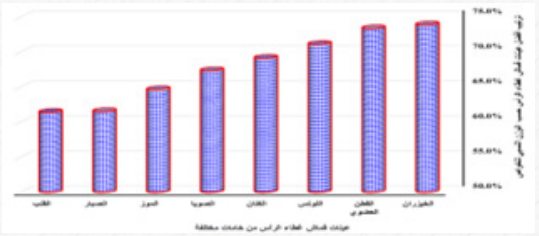
		بعد شهر		يلاحظ ظهور البكتيريا والفطريات على عينة قماش غطاء الرأس
		بعد شهرين		يلاحظ تحلل بيولوجي كامل لعينة قماش غطاء الرأس
٥	الصبار	اليوم الأول		وضع عينة غطاء الرأس داخل التربة .
		بعد شهرين		لوحظ ظهور البكتيريا والفطريات على عينة قماش غطاء الرأس
		بعد ٤ شهور		يلاحظ تحلل بيولوجي كامل لعينة قماش غطاء الرأس
٦	القنب	اليوم الأول		وضع عينة غطاء الرأس داخل التربة .
		بعد شهرين		ظهور البكتيريا والفطريات على عينة قماش غطاء الرأس
		بعد ٤ شهور		يلاحظ تحلل بيولوجي كامل لعينة قماش غطاء الرأس
٧	الصويا	اليوم الأول		بداية تجربة التحلل البيولوجي لوضع عينة غطاء الرأس
		بعد شهر		لم يلاحظ أي تغير على غطاء الرأس
		بعد شهرين		لوحظ تدهور وتحلل كامل لعينة غطاء الرأس
٨	اللوتس	اليوم الأول		بداية تجربة التحلل البيولوجي لوضع عينة غطاء الرأس

ولكن إذا نظرنا إلى النتائج، يبدو أن القطن يتلف أسرع بكثير من الكتان في التربة، ولكن السبب في تصنيف الكتان وبعض الألياف الأخرى على أنها أكثر قابلية للتحلل البيولوجي من القطن هو طبيعة القماش المستخدم، نظرا لأن كتلة القطن لكل وحدة مساحة أعلى من الكتان، فقد يبدوا نظريا أن الكتان أقل تحللا من القطن، ولكن عند وضع القماش داخل التربة، كانت نسبة فقدان وزن الكتان أعلى من القطن، مما يعني أن معدل تحلل الكتان أعلى من القطن، بسبب تأثير وزن المتر المربع لهذه الخامات على زمن التحلل الحيوي.

حيث تتحلل الخامات الخفيفة الوزن أسرع من الخامات عالية الوزن للمتر المربع. وتساهم هذه الأقمشة القابلة للتحلل الحيوي في صناعة نسيج أكثر استدامة من خلال تقليل نفايات النسيج والتلوث، وهي أيضا صديقة للبيئة، حيث تحللت هذه الأقمشة بشكل طبيعي، مما يُعيد العناصر الغذائية إلى البيئة دون ترك أي مخلفات ضارة، وأيضا تقلل من النفايات، ويمكن تحويل الأقمشة القابلة للتحلل الحيوي إلى سماد عضوي أو إلى تحلل طبيعي. كما يمكن إعادة تدويرها كاملة كخيوط وغزول للنسيج، ولكنها سوف تكون نمر سميكة نسبيا، ويكون لها استخدامات وتطبيقات أخرى حسب نعومة النمر التي يمكن إعادة تدويرها

ويمكن أن يتم إعادة تدوير جزء من هذه الخامات مع خامات نسيجية جديدة، مما يقلل استهلاك الخامات النسيجية الطبيعية ويساهم في الاستدامة والحفاظ على البيئة.

ترتيب أفضل عينات قماش غطاء الرأس



شكل13: يوضح ترتيب أفضل عينات قماش غطاء الرأس

للحصول على ترتيب أفضل عينات قماش غطاء الرأس، تم تحديد الوزن النسبي لجميع الخواص لكل نوع من خامات قماش غطاء الرأس، حيث يتم حساب نسبة كل خاصية إلى المجموع الكلي للخصائص مما يوضح مساهمة كل خاصية في جميع الخواص

وقد تم تطبيق الوزن النسبي على جميع الخواص، واستخدام الوزن النسبي يساعد في تحقيق التوازن بين الخواص المختلفة ويوضح أهمية كل خاصية وهي تعتبر طريقة مقبولة لتقييم أداء أو مساهمة كل خاصية، وبعد تطبيق الوزن النسبي تم رسم الوزن النسبي لجميع الخواص التي تم قياسها وعددها خمسة عشر خاصية لجميع العينات الثمانية، ويوضح شكل (13) ترتيب أفضل العينات طبقا للوزن النسبي. والترتيب الأفضل للعينات لجميع الخواص كالتالي، الخيزران والقطن العضوي واللوتس والكتان والصويا والموز والصبار والقنب

4. الخلاصة

تتناول هذه الدراسة إلى وضع مواصفة قياسية شاملة لأغطية الرأس الخاصة بالمرأة المحرمة مع التركيز على استخدام منسوجات عضوية مستدامة تشمل المعايير والجودة والسلامة مع ضمان توافقها مع الشروط الشرعية أثناء أداء مناسك الحج والعمرة وتحقيق الراحة والصحة للمرأة المحرمة بالإضافة الى تعزيز الاستدامة البيئية وقابليتها للتحلل البيولوجي و تقليل البصمة الكربونية, حيث تم تصنيع عدد ثمان عينات غطاء الرأس من خامات عضوية وهي القطن العضوي والكتان والخيزران والموز والصبار والقنب والصويا واللوتس لتقييم الأداء الوظيفي لها، وبعد عمل الاختبارات وتحليل النتائج إحصائيا وبيانيا، كانت الخلاصة كالتالي:

1. يتميز الخيزران بالإدارة الفعالة للرطوبة والمتانة والاستطالة ونفاذية الهواء ومقاومة البكتيريا والتحلل البيولوجي، ولكنه متوسط المقاومة للأشعة الفوق بنفسجية
2. القطن العضوي يتميز بالمتانة ومقاومة التكور والبكتيريا والأشعة الفوق بنفسجية، ولكنه بطيء نسبيا في التحلل الحيوي
3. يتميز اللوتس بالمتانة والاستطالة والتحلل البيولوجي والإدارة الفعالة للرطوبة ولكنه غير مقاوم للبكتيريا ومقاومة متوسطة للأشعة الفوق بنفسجية ومظهره غير جيد بعد الاحتكاك.
4. الكتان يتميز بالتحلل البيولوجي والمتانة وإدارة الرطوبة ولكن مظهره غير جيد بعد التعرض للاحتكاك
5. يتميز الصويا بالإدارة الفعالة للرطوبة والتحلل الحيوي ولكنه ضعيف نسبيا وغير مقاوم للبكتيريا
6. يتميز الموز بالتحلل البيولوجي ونفاذية الهواء والتجفيف السريع، وغير مقاوم للبكتيريا.
7. يتميز الصبار بالمتانة والاستطالة ويستغرق وقتا للتحلل البيولوجي وغير مقاوم للبكتيريا.
8. يتميز القنب بالمتانة والاستطالة والإدارة الفعالة للرطوبة ويستغرق وقتا للتحلل البيولوجي وغير مقاوم للبكتيريا

5. التوصيات

توصي الدراسة بإعداد مواصفة قياسية سعودية لأغطية الرأس الخاصة بالمرأة المُحرِمة باستخدام منسوجات عضوية مستدامة، بما يضمن الجودة والسلامة والملاءمة الشرعية والبيَئية، ويسهم في تعزيز الصحة العامة ودعم التحول نحو الحج الأخضر بما يتماشى مع رؤية المملكة 2030، وتشمل هذه التوصية الأهداف التالية

- اختيار خامات عضوية مستدامة مثل القطن العضوي، الكتان، القنب، والخيزران، مع ضمان سلامتها وملاءمتها للبشرة
- ضمان التوافق مع الشروط الشرعية في تصميم الغطاء بما يغطي الرأس والكتفين.

- تعزيز الجودة والسلامة من خلال مقاومة التمزق، والحرارة، وسهولة الغسل والصيانة.

- دعم الاستدامة البيئية عبر تقليل الاعتماد على المواد الصناعية الضارة وخفض الانبعاثات الكربونية

- توحيد المنتجات المطروحة في السوق المحلي وفق معايير واضحة تسهل الرقابة والجودة.

- حماية صحة وراحة المرأة من خلال استخدام أقمشة قابلة للتنفس وغير مسببة لتهيج البشرة، وتوفير الراحة أثناء أداء المناسك

المراجع:

- أحمد، شيماء (2020). استخدام الخامات الصديقة للبيئة لتحقيق الاستدامة في صناعة الملابس. مجلة العمارة والفن والعلوم الإنسانية، المجلد 5، العدد 22.

- إبراهيم، رحاب (2021). تأثير اختلاف خامات اللحمة على الخواص الوظيفية لأغطية الرأس المنفذة بأسلوب النسيج المزدوج. مجلة التربية النوعية والعلوم التطبيقية، المجلد 4، العدد 9، جامعة الفيوم.

- غانم، أيمان (2012). دراسة المتطلبات الوظيفية لتصميم أغطية الرأس المنفذة بأسلوب النسيج المزدوج. رسالة ماجستير غير منشورة، كلية الفنون التطبيقية، جامعة حلوان

- مرسي، مدحت & حجاج، ماجدة (2008). دراسة بعض الخواص المختلفة في إنتاج أغطية الرأس للنساء للوصول إلى أفضل النتائج التي تؤدي إلى تفادي المشكلات الصحية للتطبيق في هذه الصناعة. المؤتمر العربي الثاني عشر للاقتصاد المنزلي، كلية الاقتصاد المنزلي، جامعة المنوفية

- نصار، خالد منصور، محسن، نهلة، و أبو طالب، إيمان (2020) "تحسين خصائص الراحة الحرارية لأقمشة الخيزران والمخلوطة للوشاح الرياضي" المجلة الدولية للتصميم، المجلد 10، العدد 4.

- رضوان، جمال، أبو طالب، إيمان، & محمد، أميرة (2021). التقييم العلمي لبعض الخصائص الجمالية لأقمشة أغطية الرأس النسائية. مجلة العمارة والفنون والعلوم الإنسانية، المجلد 6، العدد 25.

- عبيدات، ذوقان، عدس، عبد الرحمن، & عبد الخالق، كائد (2002). البحث العلمي: مفهومه، أدواته، أساليبه. عمان: دار الفكر للطباعة والنشر

- AATCC (1997) Test Method 118-1997, Oil Repellency: Hydrocarbon Resistance Test. Research Triangle Park, NC: AATCC.

- AATCC (2011a) Test Method 147-2011, Antibacterial Activity Assessment of Textile Materials: Parallel Streak Method. Research Triangle Park, NC: AATCC.

- AATCC (2011b) Test Method 197-2011, Vertical Wicking of Textiles. Research Triangle Park, NC: AATCC.

- AATCC (2011c) Test Method 198-2011, Horizontal Wicking of Textiles. Research Triangle Park, NC: AATCC.

- AATCC (2011d) Test Method 199-2011, Drying Time of Textiles: Moisture Analyzer Method. Research Triangle Park, NC: AATCC.

- AATCC (n.d.) TM202, Relative Hand Value of Textiles: Instrumental Method. Research Triangle Park, NC: AATCC.

- AATCC (n.d.) 183, Test of Textile Ultraviolet Protection. Research Triangle Park, NC: AATCC.

- ASTM (2012) D737-04, Standard Test Method for Air Permeability of Textile Fabrics. West Conshohocken, PA: ASTM International.

- ASTM (2013a) D3776-09a, Standard Test Methods for Mass Per Unit Area (Weight) of Fabric. West Conshohocken, PA: ASTM International.

- ASTM (2013b) D5034-09, Standard Test Method for Breaking Strength and Elongation of Textile Fabrics (Grab Test). West Conshohocken, PA: ASTM International.

- ASTM (2015) D1776, Standard Practice for Conditioning and Testing Textiles. West Conshohocken, PA: ASTM International.

- ASTM (n.d.) D1335-12, Standard Test Method for Tuft Bind of Pile Yarn Floor Coverings. West Conshohocken, PA: ASTM International.

- Butturi, M.A. (2025) 'Pre-consumer waste recovery and circular patterns in textile manufacturing', Journal of Materials Science, 12(3), p.82. doi:10.3390/jmse1203082.

- Chinta, S.K. and Gujar, P.D. (2013) 'Significance of moisture management for high performance', International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 2(3), pp. 1–5.

- Desai, A.J. and Pandey, S.N. (1971) 'Microbial degradation of cellulose textiles', Journal of Scientific and Industrial Research, 30, pp. 598–606.

- DIN (2001) EN ISO 11721-1:2001/04, Textiles: Determination of the resistance of cellulose-containing textiles to microorganisms (Soil burial test – Part 1: Assessment of rot-retardant finish). Berlin: Beuth.

- DIN (2003) EN ISO 11721-2:2003/12, Textiles: Soil burial test – Part 2: Identification of long-term resistance of rot-retardant finish. Berlin: Beuth.

- DIN (2000) EN ISO 12225-1:2000/12, Geotextiles and geotextile-related products: Test method for the determination of microbiological resistance in a soil burial test. Berlin: Beuth.

- Edirisinghe, E.A.S.A., Wijayasundara, M. and de Alwis, A.A.P. (2024) 'Sustainable circular practices in the textile product life cycle: A comprehensive approach to environmental impact mitigation', Environmental Challenges, 16.

- EN ISO (1997) 846:1997/06, Evaluation of the action of microorganisms on plastics.

Geneva: ISO.

- ISO (1996) 5084:1996, Textiles -- Determination of thickness of textiles and textile products. Geneva: ISO.

- ISO (2014) 11092:2014, Textiles -- Physiological effects -- Measurement of thermal and water-vapour resistance under steady-state conditions (sweating guarded-hotplate test). Geneva: ISO.

- Rahaman, M.T., Pranta, A.D., Repon, M.R., Ahmed, M.S. and Islam, T. (2024) 'Green production and consumption of textiles and apparel: Importance, fabrication, challenges and future prospects', Journal of Open Innovation, 10(2).

- Vishwakarma, A., Mehrotra, D., Agrahari, R., Kharub, M., Gupta, S. and Jagtap, S. (2024) 'Breaking barriers: Paving the path to sustainable fashion – insights for a greener apparel and textile sector', Journal of Advances in Management Research, 21(3).

مكثفات فائقة مستدامة من مخلفات نواة التمر لخدمة المشاعر المقدسة

نجود محمد بديوي[1]*، خالد بتو[2]، - قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة حفر الباطن[1]* - قسم الفيزياء، جامعة الملك سعود[2]

Sustainable Supercapacitors from Date Seed Waste for Serving the Holy Sites

Nujud M Badawi[1]*, K. M. Batoo[2] - [1]*Department of Physics, University of Hafr Al-Batin College of Science, Hafr Al-Batin - [2]Department of Physics, King Abdullah Institute for Nanotechnology King Saud University

*Corresponding author: E-mail (Nujuds@uhb.edu.sa)

الملخص

تُقدّم هذه الدراسة طريقةً صديقةً للبيئة وقابلةً للتطوير لتصنيع قطب كهربائي (الكترود) وإلكتروليت الحالة الصلبة باستخدام الوقود الحيوي من خلال استخدام مطحون نواه التمر والكربون المنشط المُشتق من نفايات نخيل. الكتلة الحيوية لنواه التمر قابليةً للتحلل الحيوي، وذات مساميةً ، ومرونةً ميكانيكيةً عالية، بينما يُعزّ ز الكربون المنشط لنواه التمر نشاط الأكسدة والاختزال ومساحة السطح

أظهرت المكثفات الفائقة القائمة على نواه التمر أداءً كهروكيميائيًا ممتازًا ا بسعة نوعية 315 F/g. كما أظهرت هذه العينة موصلية أيونية عالية بلغت 10.6 × 10–3 S cm–1 عند درجة حرارة 25 درجة مئوية. يُظهر هذا البحث أن الكترود وهيدروجيل الكتروليت القائم على نواه التمر تُعدّ مواد واعدة ومنخفضة التكلفة وصديقة للبيئة، تُستخدم في تطبيقات المكثفات، مما يُسهم في حلول تخزين الطاقة المستدامة، ويُحقق الأهداف البيئية العالمية.

يُعدّ دمج المكثفات الفائقة في النظام الكهربائي للمشاعر المقدسة طريقة اقتصادية لخفض فاتورة الكهرباء. من خلال تصحيح معامل القدرة، وتثبيت الجهد، وتمكين تخزين الطاقة، يُمكن للمكثفات أن تُحدث تأثيرًا ا كبيرًا ا على استهلاك الكهرباء وتكاليفها. إنتاج سيارات ومركبات كهربائية يُمكن شحنها في 8 دقائق باستخدام مكثف فائق بدلًا من بطارية الليثيوم لخدمة زوار المشاعر المقدسة.

الكلمات الدالة: مسحوق نواة التمر، الكتروليت , الكترود ,مكثف فائق.

Abstract

This study introduces a green and scalable method to fabricate a novel electrode and solid-state electrolytes using Date seeds biomass and Phoenix dactylifera (palm tree) waste -derived activated carbon. The Date seeds biomass substrate offers biodegradability, porosity, and mechanical flexibility, while the Date seeds biomass and Phoenix dactylifera (palm tree) activated carbon enhance redox activity and .surface area

Electrochemical characterization showed distinct redox peaks and excellent pseudocapacitive behavior. The supercapacitors fabricated with Date seeds had excellent electrochemical performance of specific capacitance 315 F/g. Moreover, This sample exhibited the highest ionic conductivity of 10.6×10−3 S cm−1 at 25 °C . This research demonstrates that Date seeds and Phoenix dactylifera (palm tree) activated carbon electrodes and electrolytes are a promising, low-cost, and eco-friendly electrode material for flexible supercapacitor applications, contributing to .sustainable energy storage solutions and aligning with global environmental goals

Integrating supercapacitor into Holy Sites electrical system is a simple and cost-effective way to reduce your electricity bill. By correcting the power factor, stabilizing the voltage, and enabling energy storage, capacitors can make a significant impact on your electricity consumption and costs. Production of electric cars and vehicles that can be charged in 8 minutes using a supercapacitor instead of a lithium battery to .serve visitors to the holy sites

key words: Date seeds biomass, electrolyte, electrode, supercapacitor

1. المقدمة

أوضحت وزارة البيئة والمياه والزراعة، أن المملكة تنتج أكثر من (300) صنف من التمور أشهرها (السكري، الخلاص، العجوة، الصقعي، والصفري)، بإنتاج يتجاوز (1.6) مليون طن سنويًا؛ حيث تشهد السعودية تطورًا كبيرًا ونموً في إنتاج التمور ومشتقاتها وفق أحدث التقنيات وأعلى معايير الجودة، تستأثر المنطقة العربية بنسبة تفوق 77% من إنتاج التمور أي ما يناهز 6.6 ملايين طن سنويا، ويوجد بالمنطقة نحو 160 مليون نخلة، في شهر رمضان الفضيل يبلغ استهلاك التمور بالمملكة ذروته، وتنشط الحركة بهذه السوق استهلاكا. وحسب بيانات «فاو» يبلغ استهلاك السعودية من التمور خلال شهر رمضان نحو 250 ألف طن، وهو ما يمثل نسبة كبيرة من الإنتاج2023) Said,).

كما يرتفع حجم الاستهلاك في المملكة خلال مواسم الحج والعمرة. يستهلك الفرد السعودي حوالي 35.1 كيلوغرامًا من التمور سنويًا، مما يضع المملكة في المرتبة الأولى عالميًا في استهلاك الفرد من التمور، وفقًا لبيانات الهيئة العامة للإحصاء. وتبلغ نسبة هدر التمور 21.5%، وفقًا لوزارة البيئة. وهذا يعني أن حوالي 21.5% من إنتاج التمور يتحول إلى نفايات. وتُهدر التمور بنسبة 21.5% Dubey,2023)). وبالإضافة إلى نفايات النخيل، تُنتج مصانع التمور كميات من النفايات تُقدر بنحو 8% من كمية التمور الخام. ويُعد إيجاد حلول للاستفادة من هذه النفايات أمرًا ضروريًا للحد من التلوث البيئي وتعزيز الاستدامة في قطاع النخيل والتمور.

تحتوي نواة التمر على كميات كبيرة من العناصر الغذائية المفيدة، مثل الألياف الغذائية والكربوهيدرات والدهون والبروتينات والبوليفينول وحمض الأوليك (حمض الزيت: حمض دهني أوميغا-9) (Shrestha,2022) ,كما تمثّل نواة التمر عادة نحو 10% إلى 15% من الوزن الإجمالي للتمور بمختلف أنواعها،بالإضافة إلى مضادات الأكسدة، تحتوي بذور التمر أيضًا على فيتامينات ومعادن مثل B1 وB2 والمغنيسيوم والبوتاسيوم(Movahhedipoor,2024).

يمكن الاستفادة من فائض التمور في إنتاج المكثفات الفائقه كبديل لمصادر طاقه الاحفوريه من خلال تحويل بعضه إلى هيدوجيل صلب يستخدم ك الكتروليت صلب داخل المكثف الفائق هذا يدعم جهود المملكة العربية السعودية في تقليل التلوث والحفاظ على بيئة وانتاج مدن ذكيه، إضافة إلى حل مشكلة الوقود الاحفوري التي طال أمده(Dahiru ,2023)

في الوقت الحاضر، حظيت أجهزة تخزين الطاقة المرنة مثل المكثفات الفائقة باهتمام واسع لأنها توفر إلكترونيات مرنة وقابلة للارتداء. المكثفات الفائقة، أجهزة لتخزين الطاقة الكهربائية تشبه البطاريات من حيث الوظيفة، لكنها تختلف عنها بقدرتها العالية على الشحن والتفريغ السريع جدً ا (في ثوانٍ أو دقائق) مع عمر تشغيلي طويل قد يصل إلى مئات الآلاف من الدورات، وإن كانت طاقتها المخزنة أقل من البطاريات قائمه على الكترود والكتروليت. الهيدروجيل إلكتروليت،مادة هلامية ,تحتوي على شبكة بوليمرية تسمح بمرور الأيونات، وتعمل كوسط ناقل للشحنات بين أقطاب المكثف.

تمتاز بمرونتها، وقدرتها على الاحتفاظ بالرطوبة، وإمكانية تحسينها باستخدام موارد طبيعية مثل نوى التمر. المكثفات الفائقة ذات الحالة الصلبة هي أنواع جديدة من المكثفات الفائقة التي يمكن أن تعمل في ظل ظروف التمدد والانحناء والالتواء المتعاقبة. ومع ذلك، للحصول على مكثف فائق مرن في الحالة الصلبة مع أداء كهروكيميائي عالي ومرونة فائقة، تواجه العديد من التحديات. يعتمد أداء المكثف الفائق المرن (SCs) على خصائص المواد المنحل بالكهرباء ومواد الإلكترود وتكوين الجهاز.

تتميز المكثفات الفائقة ذات الحالة الصلبة المرنة (FSSSC) بمعدلات شحن وتفريغ سريعة، وكثافة طاقة عالية، وسهولة التصنيع، وانخفاض التكلفة، ولها تطبيقات واعدة كمصادر طاقة للأجهزة الإلكترونية المحمولة والقابلة للارتداء متعددة الوظائف. يعتبر إنتاج الوقود الحيوي، بمثابة حل جزئي للمشاكل البيئية الناجمة عن الاستخدام العشوائي للوقود الأحفوري. يتم إنتاج المكثفات باستخدام الكتلة الحيوية النباتية (Bouaziz,2020)، يعد إنتاج الهيدروجيل الكتروليت الصلب الحيوي من الجيل الاقل تكلفة لأنه يحتوي على خطوات اقل ويتطلب مواد رخيصة الثمن وبدون مدخلات صناعية؛ ومع ذلك، يمكن إنتاجه باستخدام أي مادة سليلوزي. يهدف استخدام المخلفات الزراعية الصناعية لإنتاج المكثفات إلى تقليل تكلفة المواد الخام وإضافة قيمة إلى المخلفات الزراعية وعدم التدخل في إنتاج الغذاء، نواه التمر ليست سوى مثال على المخلفات التي تم تقييمها كمصدر للسليلوز لإنتاج الوقود الحيوي(Besbes,2005)

هنا تم تصنيع ودراسة التركيب والخصائص المورفولوجيا والكهربائية للمكثف الفائق ذو الحالة الصلبة المرنة (SCs) باستخدام الهيدروجيل الكتروليت من نواه التمر و أقطاب فيلم الكربون المنشط المُشتق من نفايات نخيل, باستخدام تحليل XRD,FTIR,SEM.TGAو تم قياس الأداء الكهربائي للمكثف الفائق DSHC باستخدام ((CV), (GCD), (EIS)). تُقدّ م هذه الدراسة طريقةً صديقةً للبيئة وقابلةً للتطوير لتصنيع قطب كهربائي وهيدروجل إلكتروليت الحالة الصلبة باستخدام الوقود الحيوي بدل الوقود الاحفوري من خلال استخدام نواه التمر والكربون المنشط المُشتق من نفايات نخيل. الكتلة الحيوية لنواه التمر ذات مساميةً ، ومرونةً ميكانيكيةً عالية، بينما يُعزّ ز الكربون المنشط لنواه التمر نشاط الأكسدة والاختزال ومساحة السطح.

أظهرت المكثفات الفائقة القائمه على نواه التمر أداءً كهروكيميائيًا ممتازًا بسعة نوعية 315 F/g..كما أظهرت هذه العينة موصلية أيونية عالية بلغت 10.6 × 10−3 S cm−1 .كما يمكن شحن هذاالمكثف في 8 دقائق. يُظهر هذا البحث حلول مستدامة لاستثمار نفايات التمور (نوى النخيل) وتحويلها إلى مواد ذات قيمة مضافة بدلاً من التخلص منها بالحرق أو الطمر، وتطوير مواد إلكترودية وإلكتروليتات منخفضة التكلفة من مصادر محلية متجددة لاستخدامها في تصنيع مكثفات فائقة عالية الكفاءة.

كما تسعى الدراسة إلى دعم مبادرة الحج الأخضر من خلال توفير تقنيات طاقة نظيفة تساهم في تقليل هدر الطاقة والانبعاثات وتحسين استقرار الشبكات الكهربائية في البيئات الحساسة ذات الكثافة السكانية العالية مثل المشاعر المقدسة

2. منهجية وطرق البحث

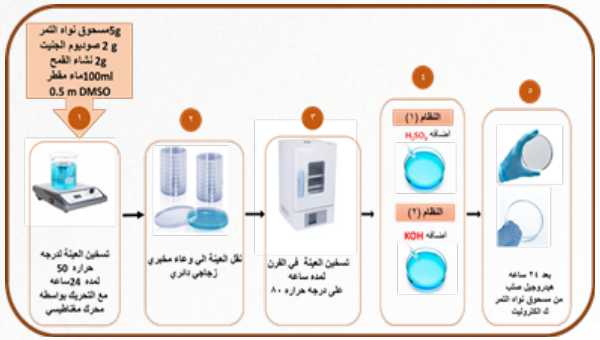
تم جمع نوى التمر ومشتقات النخيل وغسلها وتجفيفها وطحنها، ثم تحويلها إلى كربون منشط بمسامات عالية السطح لاستخدامه كإلكترود (قطب كهربائي)، بينما جرى تحضير هيدروجيل إلكتروليت صلب مستخلص من نوى التمر. جُمعت العينات في مكثفات مخبرية صغيرة (1×1 سم).

1.2 تحضير المكثف الفائق القائم على الهيدروجيل الكتروليت الصلب:

تم تحضير المكثف الفائق DSHC على ثلاث مراحل:

أولا:تحضير الهيدروجيل الاكتروليت من مسحوق نواه التمر DSH

تم غسل نواه تمر باستخدام الماء المقطر ثم تجفيف عينه نواه تمر الإخلاص لمده اسبوع في درجه حرارة الغرفه ثم طحن البذور باستخدام المطحنة الكهربائية. الشكل 1 أ يوضح الطريقة المتبعة لتحضير عينة الهيدروجيل إلكنروليت القائم على مسحوق نواه التمر



الشكل 1 أ: مخطط يوضح مراحل تخضير الهيدروجل.

ثانيا: تحضير الإلكترود

يتم تحضير الكربون المنشط من نواه التمر ومخلفات النخيل عبر عمليتي الكربنة والتنشيط كما هو موضح في الشكل 1ب، تم تسخين العينة في فرن مسخن مسبق على درجه حرارة 500 درجه مئوية لمده 7 ساعات، يتم تسخين المواد الخام في بيئة خالية من الأكسجين. من خلال هذه الخطوة تم تزيل معظم المكونات غير الكربونية من المادة الخام، مما ترك مادة غنية بالكربون

تم غمر الكربون المنشط في حمض هيدروكسيد الصوديوم، ثم تم تسخينه إلى درجة حرارة معتدلة (550 درجة مئوية)، لمده 6 ساعات، هذه العملية تزيد من المسامية وتزيل المواد غير الكربونية. بعد التنشيط، تم تبريد الكربون المنشط في درجه حرارة الغرفة لمده 4 ساعات ثم غسله في الماء المقطر لإزالة أي مواد كيميائية أو بقايا



الشكل 1 ب: الكترود الكربون المنشط من مخلفات النخيل في بيئة خالية من الأكسجين.

ثالثا: تحضير المكثف الفائق DSHC

تم عمل ساندوتش من 2 قطعه من الكترود القائم على الكربون المنشط المُشتق القائم على نفايات نخيل بأبعاد 1سم طول × 1سم عرض «الكترود» وبينهم قطعه من الهيدروجيل قائم على مسحوق نواه التمر بأبعاد 1سم× اسم «الكتروليت».

3. النتائج والمناقشة

تم تطوير إلكتروليت هيدروجيل مركب من مسحوق نواه التمر DS باستخدام النشا وجينات الصوديوم لتصنيع مكثف فائق. تم استخدام تحليل حيود الأشعة السينية لتحليل بنية المنحل بالكهرباء المركب DSH وعينه مسحوق التمر DS وتحليل SEM وTGA و. FTIR كشفت دراسة المورفولوجيا عن بنية شبكية مسامية ثلاثية الأبعاد بينما

وصفت الخرائط الأولية التشتت المناسب لمسحوق نواه التمر DS في الهيدروجيل. كشف تحليل المعاوقة الكهروكيميائية أن الموصلية الأيونية لـ DSHC هيدروجيل زادت بشكل ملحوظ حتى 11.5 × 10-3 ثانية/سم عند 25 درجة مئوية. تشير النتائج إلى أن وجود DS ويوفر مسارًا ا سلسًا لنقل حاملات الشحنة والبوليمر

علاوة على ذلك، حقق DSHC1 أعلى مستوى كشفت السعة المحددة البالغة315 g / F عند 3 mV s-1 أثناء قياس الجهد الدوري (CV). أظهر التحليل الكهروكيميائي أن هيدروجيل الإلكتروليت المعتمد على مسحوق نواه التمر DSHC والكترود الكربون المنشط المُشتق من نفايات نخيل مستقر كهربائيًا الكهروكيميائية.

سيكون للهيدروجيل المركب DSHC1 تأثير كبير على تصميم الجيل القادم من المكثفات الفائقة لتطوير الخلايا نظرًا ا لخصائصه السعوية الواعدة واستقراره الكهروكيميائي الممتاز (8)، مع إمكانية التوسّع إلى تصميمات أكبر "بحجم اليد" تناسب الاستخدام العملي

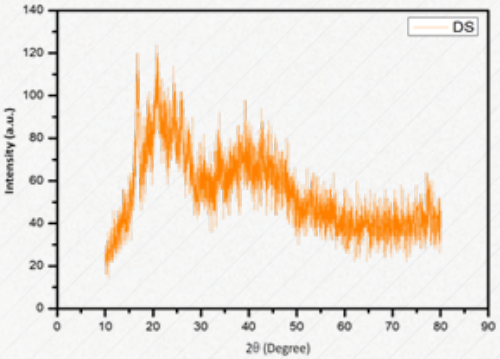
1.3 تحليل وتوصيف مسحوق نواه التمر:

لا يُظهـر مخطـط حيـود حجـر التمـر الطبيعـي Ds خطًـا أساسـيًا أفقيًـا الشـكل 2. هـذا يوضـح أن الجـزء الأكبـر مـن المـادة غيـر متبلـور (الشـكل 2). ومـع ذلـك، تظهـر بعـض قمـم الحيـود مـن الخـط الأساسـي، ممـا يشـير إلـى وجـود كميـة صغيـرة مـن المـادة البلوريـة.

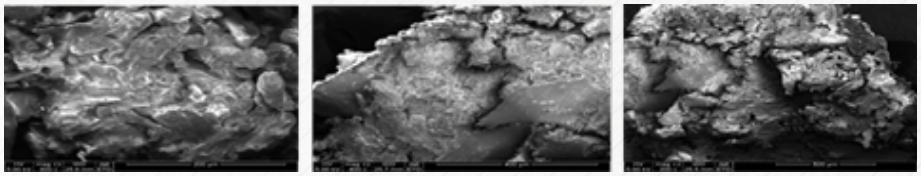
تمـت مقارنـة نمـط XRD الخـاص بـ DS مـع نمـط السـليلوز الأصلـي الموجـود فـي قاعـدة البيانـات البلوريـة. يمكـن أن تعـزى القمـم عنـد (16,1و 20.2 و 39.2)إلـى السـليلوز الأصلـي، وتصـف الـذروة عنـد 25.4 الكربـون البلـوري(Ghnimi,2017),). يُظهـر مخطـط الحيـود الانعـكاس 14.7° 2 ⊠ المخصـص للمسـتوى البلـوري (110)والمسـتوى البلـوري، والانعـكاس 21.8° 2 ⊠ المخصـص للمسـتوى البلـوري (200) (Almana,1994)).

تظهـر نتيجـه المجهـر الالكترونـي الماسـح SEM أن بـذور التمـر يمكـن أن يكـون لهـا إمكانـات كبيـرة لاسـتخدامها فـي التطبيقـات اجهـزه توليـد الطاقـة إذا لهـا خـواص مسـاميه الشـكل 3.

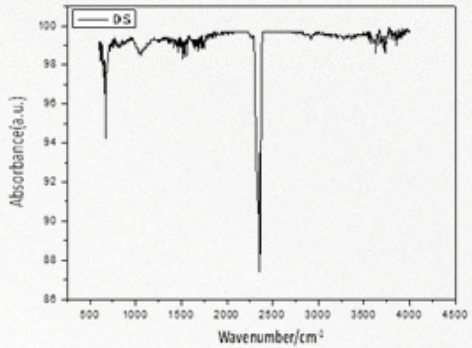
تـم دراسـه الخـواص الحراريـه ل نـواه التمـر عنـد درجـة الحـرارة تتـراوح مـن 25 إلـى 750 درجـة. السـليلوز والهيميسـيلولوزعند (250-350 درجـة مئويـة) شـديد التفاعـل. ويحتـرق عنـد درجـة حـرارة منخفضـة مقارنـة باللجنيـن، الـذي يتمتـع بنطـاق احتـراق واسـع جـدً ا لدرجـة الحـرارة (250-700درجـة مئويـة) الشـكل 4. الشـكل 5 يوضـح الروابـط الكيميائيـه لنـواه التمـر



الشكل 2: مخطط حيود XRD لبذور التمر. DS



الشكل 3: يوضح الشكل سطح بذور نواه التمر DS.



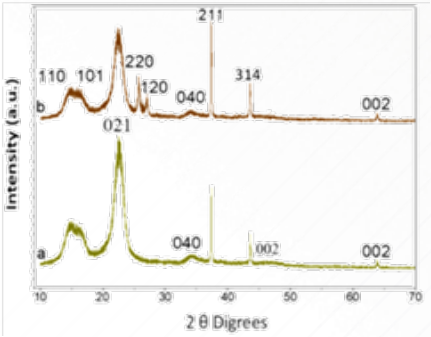
الشكل 5: FTIR ل مكونات نواه التمر DS.

2.3 تحليل وتوصيف الهيدروجيل الكتروليت DSH

يظهـر تحليـل XRD التفاعـل بيـن الهيدروجيـل /ومسـحوق نـواه التمـر يؤكـد الطبيعـة غيـر المتبلـورة للعينـات كمـا هـو واضـح مـن الشـكل 6.

فـي الشـكل 7 a&bنلاحـظ تشـتت متجانـس لمكونـات الهيدروجيـل DSH لعينـه التـي تحنـوي علـى حمـض الكبريتيـك (10) , H2SO4فـي المقابـل العينـه المعالجـه ب KOH تظهـر نتـوء الشـكل7(c&d).

يوضـح الشـكل 8 التحسـن فـي الخـواص الحراريـة للهيدروجيـل نتيجـة اضافـه مسـحوق نـواه التمر،حيـث ان المكـون الرئيسـي ل لهيدروجيـل المـاء بنسـبه 95%.يوضـح الشـكل9 تحليـل FTIRالـذروة العريضـة عنـد 3325 cm-1 نتيجـة اهتـزازات التمـدد لمجموعـات الهيدروكسـيل ((OH الموجـود فـي الجينـات صوديـوم(Almana,2022)). نلاحـظ ان الـذروات تكـون اعـرض للعينـات المعالجـة ب.. H2SO4 (Al-Hooti,2002)



الشكل 6: منحنى XRD لعينات الهيدروجيل a)) عينه معالجه ب KOH و(b) عينه معالجه با H2SO4.

3 تحليل وتوصيف المكثف ال فائقDSHC

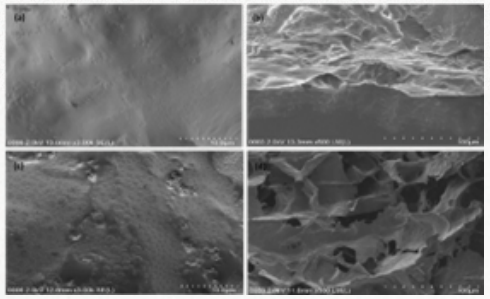
تم قياس موصلية المكثف الفائق باستخدام تقنية رباعية المسبار في درجة حرارة الغرفة. أظهرت النتائج ان قيمه المقاومة تساوي 1 اوم. تم حساب قيمه المقاومة للمكثف القائم على نواه التمر عن طريق استخدام قانون اوم

تم تحديد الموصلية الأيونية للكهارل المائية المركبة DSHC2, DSHC1عند درجة حرارة الغرفة. بالنسبة لجميع إلكتروليتات الهيدروجيل المركبة (Al-Mssallem,2013)، يعد مسحوق نواه التمر DSهو المكون الرئيسي لصنع الهلاميات المائية الموصلة الأيونية. تؤدي إضافة H2SO4 وKOH إلى زيادة الموصلية بشكل كبير، لأن الماء عازل. الماء النقي بنسبة 100% لا يوصل الكهرباء بشكل جيد على الإطلاق (Xiyin,2011)، فعند إضافة حمض مثل حمض الكبريتيك (H2SO4)، تنفصل المركبات إلى أيونات منفصلة، كما أن وجود هذا العدد الصغير من الأيونات يزيد من التوصيلية بشكل كبير. KOH الذي يتفكك إلى أيونات في الماء، فعند إدخاله في الماء يتفكك تمامًا إلى أيونات ويذوب فيه، وتنجذب جزيئات الماء القطبية بالشحنات الموجودة على أيونات K+ و OH−. علاوة على ذلك، فإن إضافة DMSO يعزز الموصلية الأيونية لأنه يدعم الانتشار الأيوني عبر مسام نواه التمر مع زيادة البنية ثلاثية الأبعاد(Nujud,2023).

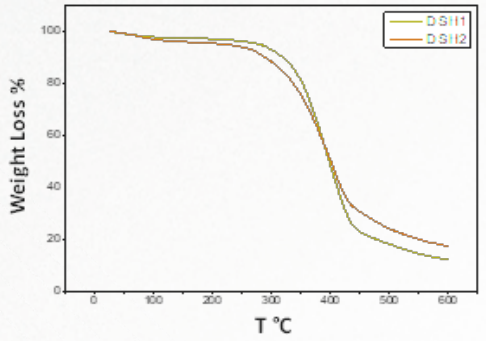
تم قياس الأداء الكهربائي للمكثف الفائق DSHC باستخدام ثلاث تقنيات كهروكيميائية رئيسية، والتي تشمل قياس الجهد الدوري ((CV، الشحن/التفريغ الجلفاني) (GCD,) مطياف المعاوقة الكهروكيميائية) (EIS,) مخطط نيكويست)). بالإضافة إلى ذلك، يتم تنفيذ DSHC عند كثافات تيار تبلغ 100 مللي أمبير للعينات DSHC2, DSHC1 التي تظهر مثلثات متناظرة بكثافات تيار مختلفة كما هو موضح في الشكل 10 مما يشير إلى أن آلية تخزين الطاقة هي نوع سعوي نموذجي في DSHC1. من خلال تطبيق الجهد الكهربي، يتم دفع الأيونات إلى سطح الطبقة المزدوجة التحليل الكهربائي ويتم شحن المكثف الفائق.لا توجد قمم أكسدة واضحة في نطاق المسح (Alharbi,2022)، مما قد يشير إلى تفوق السلوك السعوي.

ويعزى ذلك إلى المسامية العالية وامتصاص الإلكتروليت والترابط الهيدروجيني مع جزيئات الماء. في عينة الهيدروجيل المركبة DSHC1، تجعل مادة القطب الفعالة الموصلية الكهربائية منخفضة كما لوحظ من خلال السلوك الدوري المثالي أثناء قياس السيرة الذاتية مع دورات الشحن والتفريغ. الشكل 11 منحنى GCD مطياف المعاوقة الكهروكيميائية للمكثف الفائق منحنى مثالي ,حيث وقت شحن يساوي وقت التفريغ (Souli,2020)

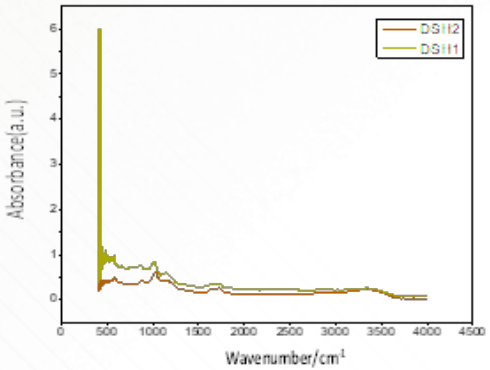
يظهر الشكل 12 مخطط نيكويست سلوك مثالي لعينه معالجه ب H2SO4 لها منحنى خطي مثالي يمر في نقطه الأصل عند التردد العالي ويمتد بشكل مستقيم مثالي عند التدد المنخفض (Abdul,2020). يوضح الجدول 1 الأداء للمكثف الفائقDSHC باستخدام ثلاث تقنيات كهروكيميائية رئيسية، (CV، الشحن/التفريغ الجلفاني) (GCD, مطياف المعاوقة الكهروكيميائية) (EIS,مخطط نيكويست). حيث يظهر المكثف DSHC1 أداء كهربائي عالي وذلك للعينات المعالجة H2SO4. تُظهر جدول 2 أن اعتماد نوى التمر كمصدر للكربون المنشط والإلكتروليت الصلب لا يحقق فقط وفراً اقتصادياً واضحا، بل يضيف قيمة بيئية من خلال تقليل النفايات الزراعية وتعزيز مفهوم الاقتصاد الدائري.



الشكل 7: SEM سطح عينه الهيدروجيل المعالجة ب حمض KOH و H2SO4.

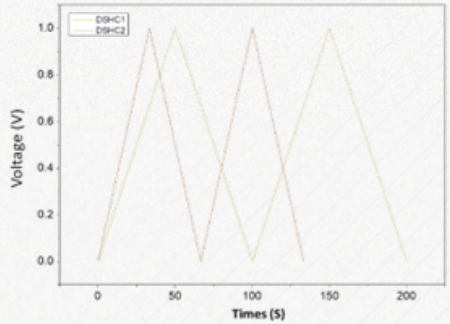


الشكل 8: TGA لعينات الهديدروجيل الكتروليت.

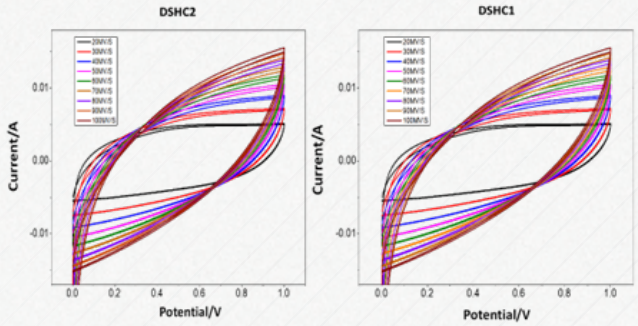


الشكل 9: تحليل FTIR لعينات الهيدروجيل.

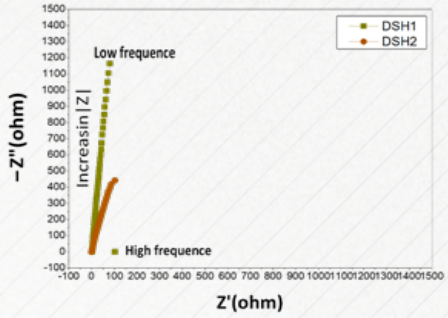
كمـا أن دمـج هـذه المكثفـات فـي منظومـة الكهربـاء بالمشـاعر المقدسـة يُسـهم فـي خفـض اسـتهلاك الطاقـة وتكاليفهـا عبـر تصحيـح معامـل القـدرة وتثبيـت الجهـد، بالإضافـة إلـى تمكيـن حلـول سـريعة لشـحن المركبـات الكهربائيـة فـي غضـون دقائـق معـدودة بـدلاً مـن سـاعات طويلـة باسـتخدام بطاريـات الليثيـوم التقليديـة.



الشكل 10: منحنى (CV) الشحن/التفريغ الجلفاني.



الشكل 11GCD: مطياف المعاوقة الكهروكيميائية.



الشكل 12: منحى EIS مخطط نيكويست.

الجدول 1: الأداء للمكثف ال فائقDSHC

العينة	سعة محددة(F/g) $C = \frac{It}{m\Delta V}$	مقدار الطاقة (W/Kg) $P_s=P_g \times m/(2\,cm \times 2\,cm \times 0.05\,cm)$	كثافة الطاقة (Wh/kg) $E_s=E_g \times m/(2\,cm \times 2\,cm \times 0.05\,cm)$	الموصلية الأيونية S/cm $\sigma = d/(R\_b S)$
DSHC1	312.88	478.51	48.78	11.55×10^{-3}
DSHC2	251.3	100.012	35.15	10.8×10^{-3}

الجدول 2: التحليل الاقتصادي للمكثفات الفائقة القائمة على نواة التمر

المرحلة	التكلفة (دولار/كغ أو وحدة)	مقارنة مع السوق التجاري	الملاحظات
جمع ومعالجة نوى التمر	0.15 – 0.20/كغ	نفايات زراعية شبه مجانية	متوفرة محليًا وبكلفة منخفضة جدًا
إنتاج الكربون المنشط	0.70 – 0.90/كغ	2 – 3/كغ	أقل ٦٠–٧٠٪ من الكربون التجاري
تحضير الإلكتروليت الصلب (الهيدروجيل)	4 – 6/كغ	8 – 12/كغ (بوليمرات صناعية)	تقنية التجفيف تحدد التكلفة
تصنيع وتجميع المكثف	10 – 15/كغ مادة نشطة + 0.5–1للتغليف	20 – 30/كغ مادة نشطة	شاملة جامع التيار والتغليف
إجمالي تكلفة الوحدة (١٠٠–F٢٠٠	٢ – ٣ دولار للوحدة	٨ – ١٥ دولار للوحدة	أداء أعلى (٣١٥) F/g مقابل(١٥٠–٢٥٠) F/g

4.3 التطبيق الواقعي لمكثّف بحجم اليد:

أثبتت نتائج الاختبار المخبري على عيّنات صغيرة (1×1 سم) إمكانية التوسّع إلى تصميمات أكبر عبر ربط عدة وحدات على التوازي والتوالي لتشكيل مكثّف «بحجم اليد». هذا النهج يوفّر سعة كلية أعلى مع مقاومة داخلية منخفضة، كما يتيح رفع الجهد الاسمي عبر موازنة نشطة للخلايا. بالنسبة لمكثّف حجمه يقارب 10×6×2 سم (≈0.12 لتر)، يمكن تحقيق كثافة طاقية في حدود 8–15 Wh ≈1 Wh/L فعلي مع قدرة آنية تصل إلى 1.5–5 kW، وهو ما يجعله مناسبًا لامتصاص الذروات والشحن/التفريغ السريع.

ورغم أن بطارية ليثيوم بالحجم ذاته تخزّن طاقة أعلى بعشرات المرات، إلا أنّ المكثّف يتفوّق في القدرة الفورية ومعدل الشحن السريع، مما يجعله مثاليًا كطبقة قدرة داخل أنظمة هجينة. من حيث المتانة، يمكن للمكثّف أن يحتفظ بـ 80–90% من سعته بعد مئات آلاف الدورات إذا خضع لضبط جهد مناسب وحماية حرارية.

كما يُوصى بتغليف مقاوم للرطوبة والغبار IP٦٥))، وإدارة حرارية تُبقي درجة الحرارة دون ٥٠ °م، إضافة إلى تدعيم ميكانيكي يضمن تحمّل الاهتزازات والصدمات في بيئات قاسية مثل المشاعر المقدسة أو وسائل النقل. وعند الرغبة في "حجم بطارية ليثيوم

يجب إدراك أن المدى الطاقي لن يكون مماثلًا، بينما ستتفوق المكثّفات في الشحن/التفريغ السريع وامتصاص الذروات. لذا فإن التكامل الهجين (مكثّفات + بطارية) هو المسار الأمثل لتطبيقات المشاعر ووسائل النقل الكهربائية لتحقيق موثوقية عالية وتكلفة تشغيلية أقل على المدى الطويل.

بهذا، تحققت الأهداف الثلاثة: الاستدامة عبر استغلال المخلفات الزراعية، خفض التكلفة مع الحفاظ على كفاءة كهربائية عالية، والتطبيق العملي في بيئات الحج ووسائل النقل الكهربائية، مما يبرهن على جدوى الدمج بين الابتكار العلمي والاحتياجات البيئية والاجتماعية

٤. الخلاصة

يجذب موسم الحج السنوي في مكة المكرمة ملايين المسلمين، مما يؤدي إلى استهلاك كبير للطاقة وتحديات بيئية. ونظراً لضخامة موسم الحج، يتطلب الأمر تثبيت شبكة ذكية للبنية التحتية المؤقتة للحج، وذلك للحد من البصمة الكربونية العالية لمولدات الديزل والمركبات، ومعالجة الطلب الهائل على الطاقة للملاجئ المؤقتة والمياه والنقل بفعالية، ومن ثم إدارة النفايات والتلوث.

ولتعزيز الاستدامة، يستكشف هذا المقترح دمج أنظمة تخزين الطاقة القائمة على المكثفات الفائقة لتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، وتحسين كفاءة الطاقة، وتقليل انبعاثات الكربون. تتميز المكثفات الفائقة بسرعة الشحن والتفريغ، وطول دورة حياتها، وكثافة الطاقة العالية، مما يجعلها مثالية لتطبيقات مثل: النقل الكهربائي (الحافلات الكهربائية، والعربات الكهربائية).

أظهرت المكثفات الفائقة القائمة على نواه التمر أداءً كهروكيميائيًا ممتازًا بسعة نوعية ٣١٥ F/g..كما أظهرت هذه العينة موصلية أيونية عالية بلغت ١٠,٦ × ١٠-٣ S cm-١. توفر المكثفات الفائقة القائمة على نواه التمر العديد من المزايا الرئيسية على البطاريات التقليدية (بطاريات الليثيوم أيون) مثل الشحن السريع وكثافة الشحن العالية وعمر دورة أطول وأداء أفضل في درجات الحرارة العالية وتحسين السلامة والصديقة للبيئة وانخفاض الصيانة والكفاءة العالية.

نظرًا لأن الحافلات تتوقف بشكل متكرر، فإن الحافلات تتطلب شحنًا سريعًا يتم توفيره فقط من خلال المكثفات الفائقة. سيلبي مكثفنا الفائق الصديق للبيئة المصنوع محليًا هذه المتطلبات بتكلفة أقل مع كونه صديقًا للبيئة وسيعمل في درجات الحرارة القصوى دون أي عيوب.

تجميع العيّنات (١×١ سم) في مكثّف "بحجم اليد" يقدم قدرة لحظية عالية ومقاومة جيدة للدورات، شرط توفير تغليف مقاوم للرطوبة والغبار وإدارة حرارية ذكية وموازنة نشطة. يعد هذا المشروع بتصميم واختبار ونشر أنظمة مكثفات فائقة مصممة لمتطلبات الحج الفريدة، مما يساهم في رؤية المملكة العربية السعودية ٢٠٣٠ ومبادرات الحج الأخضر العالمية.

٥. االتوصيات والإجراءات المقترحة لتحقيق "الحج الأخضر"

جدول 4: توصيات تطبيقية لتحقيق الحج الأخضر عبر استثمار مكثفات نوى التمر

	التوصية	الإجراء	الأثر
١	استثمار مخلفات التمور	تحويل نوى التمر إلى كربون منشط وهيدروجيل صلب لاستخدامه في المكثفات	إنتاج مكثفات منخفضة التكلفة ومرتفعة الكفاءة مع تقليل التلوث
٢	ترشيد الطاقة وتقليل الهدر	دمج المكثفات الفائقة في شبكات المشاعر لامتصاص الذروات وتحسين معامل القدرة	خفض فواتير الكهرباء وتقليل الضغط على الشبكة
٣	إدارة النفايات بوعي	تخصيص حاويات لفرز نفايات التمور وتشجيع شراء منتجات معاد تدويرها	دعم الاقتصاد الدائري والحفاظ على الموارد الطبيعية
٤	النقل المستدام	تعزيز استخدام وسائل النقل العام الكهربائية أو الهجينة	تقليل الانبعاثات الكربونية والازدحام المروري
٥	التوعية البيئية	إطلاق حملات توعية للحجاج حول الممارسات الخضراء	رفع مستوى الوعي البيئي وتحقيق مشاركة فعّالة في حماية البيئة

بتطبيق هذه التوصيات، يمكن تحويل مخلفات التمور من عبء بيئي إلى مورد استراتيجي لإنتاج مكثفات فائقة، مما يساهم في تحقيق "الحج الأخضر" وتقليل هدر الطاقة مع تعزيز الاستدامة البيئية

المراجع

- 1 Said, B., Bacha, O., Rahmani, Y., Harfouche, N., Kheniche, H., Zerrouki, D., Belkhalfa, H., & Henni, A. (2023). Activated carbon prepared by hydrothermal pretreatment-assisted chemical activation of date seeds for supercapacitor application. Inorganic Chemistry Communications, 155, 111012. https://doi.org/10.1016/J.INOCHE.2023.111012

- 2 Dubey, P., Maheshwari, P. H., Mansi, Shrivastav, V., & Sundriyal, S. (2023). Effect of nitrogen and sulphur co-doping on the surface and diffusion characteristics of date seed-derived porous carbon for asymmetric supercapacitors. Journal of Energy Storage, 58, 106441. https://doi.org/10.1016/J.EST.2022.106441

- 3 Shrestha, R. G., Maji, S., Mallick, A. K., Jha, A., Shrestha, R. M., Rajbhandari, R., Hill, J. P., Ariga, K., & Shrestha, L. K. (2022). Hierarchically Porous Carbon from Phoenix dactylifera Seed for High-Performance Supercapacitor Applications. Bulletin of the Chemical Society of Japan, 95(7), 1060–1067. https://doi.org/10.1246/BCSJ.202201294

- 4 Movahhedipoor, N., Nabavi-Amri, S. A., & Jabbari, M. (2024). Exploring the DPPH radical scavenging capacity for activated carbon nanoparticles prepared from date seed by an electrochemical approach. Journal of the Indian Chemical Society, 101(10), 101269. https://doi.org/10.1016/J.JICS.2024.101269

- 5 Dahiru Shuaibu, A., Saeed Alzahrani, A., & Aziz, M. A. (2023). High-performance

for the adsorption of textile dyes: A review. Frontiers in Environmental Science, 10, 996953. https://doi.org/10.3389/FENVS.2022.996953/BIBTEX

- 16 Souli, I., Liu, X., Lendormi, T., Chaira, N., Ferchichi, A., & Lanoisellé, J. L. (2020). Anaerobic digestion of waste Tunisian date (Phoenix dactylifera L.): effect of biochemical composition of pulp and seeds from six varieties. Environmental Technology (United Kingdom), 1–39. https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1797900

- 17 Abdul-Hamid, N. A., Mustaffer, N. H., Maulidiani, M., Mediani, A., Ismail, I. S., Tham, C. L., Shadid, K., & Abas, F. (2020). Quality evaluation of the physical properties, phytochemicals, biological activities and proximate analysis of nine Saudi date palm fruit varieties. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 19(2), 151–160. https://doi.org/10.1016/J.JSSAS.2018.08.004.

Supercapacitors Enabled by Highly-porous Date Stone-derived Activated Carbon and Organic Redox Gel Electrolyte. Asian Journal of Organic Chemistry, 12(4), e202300050. https://doi.org/10.1002/AJOC.202300050

- 6 Bouaziz F, Ben Abdeddayem A, Koubaa M, Ellouz Ghorbel R, Ellouz Chaabouni S(2020). Date Seeds as a Natural Source of Dietary Fibers to Improve Texture and Sensory Properties of Wheat Bread. Foods. 4;9(6):737. https://doi.org/10.3390/foods9060737

- 7 Besbes, S., Blecker, C., Deroanne, C., Lognay, G., Drira, N. E., & Attia, H. (2005). Heating effects on some quality characteristics of date seed oil. Food Chemistry, 91(3), 469–476. https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2004.04.037

- 8 Ghnimi, S., Umer, S., Karim, A., & Kamal-Eldin, A. (2017). Date fruit (Phoenix dactylifera L.): An underutilized food seeking industrial valorization. NFS Journal, 6, 1–10. https://doi.org/10.1016/J.NFS.2016.12.001

- 9 Almana, H. A., & Mahmoud, R. M. (1994). Palm date seeds as an alternative source of dietary fiber in Saudi bread. Ecology of Food and Nutrition, 32(3–4), 261–270. https://doi.org/10.1080/03670244.1994.9991406

- 10 Ahmed, Z. F. R., Kaur, N., & Hassan, F. E. (2022). Ornamental Date Palm and Sidr Trees: Fruit Elements Composition and Concerns Regarding Consumption. International Journal of Fruit Science, 22(1), 17–34. https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1995570

- 11 Al-Hooti, S. N., Sidhu, J. S., Al-Saqer, J. M., & Al-Othman, A. (2002). Chemical composition and quality of date syrup as affected by pectinase/cellulase enzyme treatment. Food Chemistry, 79(2), 215–220. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00134-6

- 12 Al-Mssallem, I., Hu, S., Zhang, X. (2013). Genome sequence of the date palm Phoenix dactylifera L. Nat Commun 4, 2274 . https://doi.org/10.1038/ncomms3274

- 13 Xiyin Wang, Haibao Tang, Andrew H.(2011). Paterson, Seventy Million Years of Concerted Evolution of a Homoeologous Chromosome Pair, in Parallel, in Major Poaceae Lineages, The Plant Cell, e 23 ,27–37, https://doi.org/10.1105/tpc.110.080622

- 14 Nujud Badawi, M., Batoo, K. M., Hussain, S., Subramaniam, R., Kasi, R., Bhuyan, M., Imran, A., & Muthuramamoorthy, M. (2023). Natural Solid-State Hydrogel Electrolytes Based on 3D Pure Cotton/Graphene for Supercapacitor Application. Micromachines 2023, Vol. 14, Page 1379, 14(7), 1379. https://doi.org/10.3390/MI140713792

- 15 Alharbi, H. A., Hameed, B. H., Alotaibi, K. D., Al-Oud, S. S., & Al-Modaihsh, A. S. (2022). Recent methods in the production of activated carbon from date palm residues

محـــور

إدارة البصمـة الكربونيـــة وتحقيـــق الاستـدامـة البيئيـة

التقنيات التفاعلية في إدارة إسكان الحجاج: نحو بنية تشغيلية ذكية ومرنة

وائل ابن فيصل ابن جارالله الحائلي - وزارة الحج والعمرة

Interactive Technologies in Pilgrim Accommodation Management: Towards a Smart and Flexible Operational Framework

Wael Faisal Jarullah Alhaili - Ministry of Haj & Umrah
*Corresponding author: E-mail (wael.alhaili@gmail.com)

الملخص

تتناول هذه الدراسة موضوع التقنيات التفاعلية في إدارة إسكان الحجاج، ضمن سياق التحولات الرقمية في قطاع الضيافة، حيث برزت الحاجة إلى نماذج تشغيلية أكثر ذكاءً ومرونة تستجيب لتحديات الكثافة السكانية الموسمية في الحج، وتتمثل إحدى أبرز القضايا البحثية في الحاجة إلى تعزيز كفاءة إدارة المساكن التقليدية وتطوير قدراتها التنبؤية في تلبية الاحتياجات اللحظية، الأمر الذي يفتح المجال أمام فرص واسعة لتحسين تجربة الحجاج والارتقاء بمستوى جودة الخدمات المقدمة لهم. تهدف الدراسة إلى استكشاف أثر دمج التقنيات التفاعلية على تحسين تجربة الإسكان وتعزيز الكفاءة التشغيلية، وذلك من خلال اختبار فرضيات تتعلق بفاعلية المنصات الرقمية في إعادة هيكلة عمليات الإسكان، حيث جرى الاستناد إلى منصة The Digital Hotelier بوصفها حالة دراسية توضح كيفية توظيف الأدوات الذكية في المتابعة اللحظية وتحسين جودة الخدمات إضافة إلى مراجعة الوثائق التنظيمية في موسم حج 1446هـ.،وأظهرت النتائج وجود مجال واسع لتعزيز تطبيق الأدلة التشغيلية وتطوير آليات أكثر دقة لحصر الاحتياجات الأساسية داخل المباني السكنية، بما يسهم في تحسين الكفاءة التشغيلية وضمان جودة الخدمات المقدمة للحجاج. اعتمد البحث منهجًا وصفيًا تحليليًا مدعومًا بأدوات استقصائية مثل المقابلات مع عينة من مقدمي الخدمة والمستفيدين، بهدف استجلاء واقع التحديات وفرص التحسين. وأظهرت النتائج أن إدماج التقنيات التفاعلية يعزز من سرعة الاستجابة التشغيلية، ويزيد مستويات رضا الحجاج، ويحقق وفورات ملموسة في التكاليف الإدارية واللوجستية. وقد خلصت الدراسة إلى أن دمج هذه الحلول يمثل قيمة تطبيقية مباشرة تمكّن من بناء نموذج إسكان مرن ومستدام، مع توصيات بضرورة تطوير أدلة تشغيلية رقمية، وربط تراخيص التشغيل بمؤشرات أداء ذكية، وتعزيز الشراكات التقنية لضمان تحسين تجربة اسكان ضيوف الرحمن

الكلمات الدالة: التقنيات التفاعلية، إدارة إسكان الحجاج، المنصات الرقمية، الكفاءة التشغيلية.

Abstract

This study addresses the role of interactive technologies in managing pilgrims' housing within the broader context of digital transformations in the hospitality sector, where the need has emerged for more intelligent and flexible operational models capable of responding to the seasonal population density challenges of Hajj. The central problem lies in the limited efficiency of traditional housing management and the weak capacity to predict real-time needs, which adversely affects pilgrims' satisfaction and the quality of services provided. The study aims to explore the impact of integrating interactive technologies on improving the housing experience and enhancing operational efficiency, through testing hypotheses related to the effectiveness of digital platforms in restructuring housing operations. In this regard, the study draws on The Digital Hotelier platform as a case study, illustrating how smart tools can be employed for real-time monitoring and service quality improvement, in addition to reviewing the regulatory documents of Hajj season 1446H. The findings indicate a clear gap in the application of operational manuals and the provision of essential needs within residential buildings. Methodologically, the research adopted a descriptive–analytical approach supported by investigative tools such as interviews with a sample of service providers and beneficiaries, to uncover the current challenges and opportunities for improvement. Results demonstrate that the integration of interactive technologies enhances operational responsiveness, increases pilgrims' satisfaction, and generates tangible savings in administrative and logistical costs. The study concludes that embedding such solutions represents a direct practical value enabling the development of a flexible and sustainable housing model, with recommendations to develop digital operational manuals, link operating licenses to smart performance indicators, and strengthen technological partnerships to ensure the continuous improvement of pilgrims' housing experiences.

Keywords: Interactive technologies, Pilgrims' accommodation management, Digital platforms, Operational efficiency

1. المقدمة

يشكّل إسكان الحجاج أحد المرتكزات الحيوية في منظومة خدمات الحج، لما له من أثر مباشر على جودة التجربة الدينية والمعيشية لضيوف الرحمن، وعلى كفاءة التشغيل الموسمي في البيئات عالية الكثافة، حيث أظهرت التقارير الختامية لموسم حج 1445هـ وموسم حج 1446هـ أن منظومة الإسكان تمتاز بفرص تطويرية مهمة، لاسيما في مجال رفع دقة مواعيد تسليم المرافق وتعزيز مستويات الجاهزية التشغيلية، إلى جانب الحاجة إلى تفعيل منظومة رقمية مركزية تمكّن الجهات الإشرافية من متابعة الأداء في الزمن الحقيقي والاستجابة الفورية للبلاغات الطارئة، بما يفتح المجال أمام تحسين الكفاءة التشغيلية وتعزيز جودة الخدمة (وزارة الحج والعمرة ،2025; وزارة الحج والعمرة ،2024أ)

وفي سياق متصل، برزت الإعاشة كأحد أكثر الخدمات التصاقًا بقطاع الإسكان، حيث بلغ عدد الوجبات المقدمة داخل المساكن والمخيمات خلال الموسم أكثر من 90 مليون وجبة سنويًا (وزارة الحج والعمرة ،2025; وزارة الحج والعمرة ،2024 أ)، حيث تشير هذه المعطيات إلى وجود فرص تطويرية واعدة في مجال تعزيز كفاءة التوزيع وتحقيق مستوى أعلى من التنسيق بين مزوّدي الإعاشة ومشغّلي الإسكان، إضافة إلى إمكانية توظيف حلول رقمية متقدمة لجدولة الخدمة وفقًا لمعدلات الإشغال الفعلي، بما يسهم في الارتقاء بجودة التجربة الخدمية المقدمة لضيوف الرحمن داخل وحدات الإقامة. كما سلّطت دراسة تحليلية للوضع الراهن لخدمات الإسكان الضوء على فجوة رقمية واسعة في التنسيق بين الجهات التنظيمية والمشغّلين، خاصة فيما يتعلق بمتابعة الجاهزية التشغيلية، وربط خدمات الإعاشة ببيانات الإشغال الفعلي، وقياس رضا الحجاج أثناء الإقامة، إضافة إلى محدودية التكامل بين أنظمة الإسكان ومرافق المخيمات في المشاعر المقدسة (وزارة الحج والعمرة ،2022)

في ضوء هذه المؤشرات، تبرز الحاجة الماسّة إلى تبنّي نموذج تشغيل رقمي متكامل، يعتمد على تقنيات ذكية لدعم الإشراف المؤسسي، وضمان الجاهزية التشغيلية قبل الموسم وخلاله، وتحسين كفاءة التنسيق بين خدمات السكن والإعاشة، وبناء بنية مرنة وقابلة للتوسع، تستجيب لمتطلبات التحول الرقمي وتعزز رضا الحجاج واستدامة الأداء

2. مشكلة الدراسة

رغم التحسينات المتتالية في منظومة إسكان الحجاج، لا تزال تواجه تحديات تتعلق بضعف التكامل التشغيلي، وتأخر الجاهزية، ومحدودية أدوات الإشراف اللحظي، لاسيما في بيئات المشاعر ذات الكثافة العالية والتوقيت الحرج، حيث تظهر التقارير الرسمية فرصًا تطويرية بارزة في مجال الإعاشة من خلال اعتماد جدولة ذكية مرتبطة بالإشغال الفعلي لضمان انتظام الخدمة، كذلك الحاجة إلى تطوير أدوات رقمية لمتابعة أعمال النظافة لحظيًا وقياس الأداء بدقة، في حين يعد تطوير آليات تقييم تفاعلية لرضا الحجاج خطوة

أساسية لتعزيز جودة الإسكان وتحويل الملاحظات الميدانية إلى فرص تحسين مستدامة. وبناءً على ذلك، تنبع إشكالية الدراسة من الحاجة إلى تطوير منصة رقمية ذكية لإدارة وتشغيل مرافق الإسكان، تعزز الإشراف الفوري، وتدعم التكامل مع مزودي الخدمة، وتوفر مؤشرات لحظية دقيقة لرضا الحجاج، بما يسهم في رفع كفاءة الأداء وتحقيق الأهداف الاستراتيجية للوزارة

3. أهداف البحث

يهدف هذا البحث إلى استكشاف إمكانات تطوير نموذج تشغيلي رقمي ذكي لإدارة إسكان الحجاج، بما يواكب التحديات الميدانية ويعزز من قدرات وزارة الحج والعمرة في الإشراف والمتابعة، وتجويد تجربة السكن في مواسم الحج، كما يسعى البحث انطلاقًا من هذا الهدف العام، إلى تحقيق الأهداف التفصيلية التالية

1. تحليل الفجوات التشغيلية في منظومة إسكان الحجاج، من حيث الجاهزية، وتوزيع المهام، والتكامل مع الخدمات المساندة، بالاستناد إلى التقارير الرسمية والدراسات الميدانية
2. رصد ممارسات قياس رضا الحجاج داخل وحدات الإسكان، وتحديد مجالات تطوير أدوات التقييم الحالية، مع تحليل مدى ارتباطها بجودة الأداء التشغيلي
3. دراسة النماذج التقنية الرائدة في إدارة وتشغيل مرافق الإقامة الفندقية، واستخلاص عناصر القوة التي يمكن مواءمتها مع خصوصية إسكان الحجاج
4. اقتراح معالم منصة رقمية ذكية تدعم الإشراف اللحظي، وتحسّن كفاءة التشغيل، وتفعّل قياس الرضا بصورة فورية ومتصلة بالواقع الميداني
5. تطوير توظيف المنصة في بيئات المشاعر المقدسة، بما يراعي خصوصيتها الزمنية والمكانية، ويضمن المرونة والاستجابة السريعة للتحديات الموسمية

4. أهمية البحث

تنبع أهمية هذا البحث من كونه يتقاطع مع أحد أكثر محاور الخدمة تعقيدًا وتأثيرًا في تجربة ضيوف الرحمن، وهو إسكان الحجاج وإدارته التشغيلية، بوصفه منظومة متداخلة تتطلب تنسيقًا عالي المستوى بين الأطراف التنظيمية والتنفيذية ومزودي الخدمات، ففي ظل النمو المستمر لأعداد الحجاج، وتزايد متطلبات الجودة والاستجابة الفورية، تبرز الحاجة إلى تبني حلول رقمية ذكية قادرة على دعم وزارة الحج والعمرة في مهام الإشراف، ورصد الجاهزية التشغيلية، وضمان تكامل الخدمات في الزمن الفعلي، حيث تتجلى أهمية هذا البحث في تركيزه على الجانب التفاعلي والتشغيلي لمنظومة الإسكان، من خلال اقتراح بنية تقنية مرنة تستلهم أفضل الممارسات الفندقية العالمية، مع تكييفها لخصوصية السياق الزمني والمكاني للمشاعر المقدسة. كما يكتسب البحث أهمية مضاعفة من خلال ما يقدمه من إسهام نوعي في تطوير أدوات قياس رضا الحجاج وربطها بالمنصات التشغيلية وبيانات الإشغال الفعلي، بما يضفي على المؤشرات قدرًا أعلى من الدقة والموثوقية، ويجعلها أداة استراتيجية لتوجيه القرارات نحو تحسين جودة الخدمات وتعزيز استدامتها. وتتجلى القيمة العلمية والعملية للدراسة في كونها لا تقتصر على وضع إطار نظري وتحليلي يفسر الواقع القائم، بل تتجاوز ذلك إلى طرح حلول تطبيقية قابلة للتنفيذ، تفتح المجال أمام الوزارة لتبني منظومة إشراف متكاملة ترتكز على الإدارة الرقمية الذكية، وتدفع نحو رفع كفاءة الأداء

وتجويد التجربة المقدمة لضيوف الرحمن، بما يسهم في تحقيق مستهدفات رؤية المملكة 2030، لا سيما في محاور التحول الرقمي، وجودة الحياة، وتحسين تجربة ضيوف الرحمن

5. الوضع الراهن لإسكان الحجاج

يعدّ قطاع إسكان الحجاج من أبرز الركائز المحورية في منظومة خدمات الحج، لما له من تأثير مباشر على جودة التجربة الروحية والصحية والمعيشية لضيوف الرحمن، ورغم التطورات المتلاحقة التي شهدها هذا القطاع على صعيد البنية التحتية، وتحديث معايير التصنيف، وتوسيع نطاق التغطية الرقابية، إلا أن الدراسات الميدانية والتحليلات التقييمية تشير إلى وجود فرص تطويرية في الجوانب الهيكلية والتنظيمية، بما يتيح تعزيز التكامل بين الأطر النظامية والتطبيق العملي، وتحويله إلى نموذج أكثر انسجامًا وفاعلية

يتّسم واقع إسكان الحجاج بتعدد أنماط الإيواء وتفاوت جودتها، حيث تتوزع مقار السكن بين الفنادق المصنفة، والشقق الفندقية، والمباني السكنية التقليدية، حيث يمثل هذا التنوع فرصة لإثراء التجربة التشغيلية، غير أن انعكاساته على مستوى الأداء ومعايير التصنيف تفتح المجال أمام جهود تطويرية لتعزيز الاتساق ورفع مستوى التوافق بين مختلف أنماط المرافق السكنية.، ووفقًا لبيانات موسم حج 1446هـ، تم إسكان قرابة 62% من الحجاج في فنادق مصنفة، فيما توزعت النسبة المتبقية بين شقق مفروشة ومبانٍ تفتقر في بعض حالاتها إلى أدنى متطلبات السلامة أو النظافة أو الاشتراطات البيئية، مما ينعكس سلبًا على رضا الحجاج وتكافؤ الخدمة بينهم بحسب الدولة أو الجهة المنظمة (وزارة الحج والعمرة ،2024 أ; وزارة الحج والعمرة ،2024 ب ; وزارة الحج والعمرة، 2020)

وتزداد التحديات تعقيدًا في ظل تعددية الجهات المشرفة على قطاع الإسكان، حيث تتقاسم وزارة الحج والعمرة ووزارة السياحة أدوار التخصيص، والرقابة، والتصنيف، والتوزيع الميداني. إلا أن هذا الإشراف الثنائي يمثل إطارًا تنظيميًا متكاملًا يسهم في تعزيز الرقابة على مرافق الإسكان، غير أن تنفيذه في بعض المواقع، خصوصًا خارج النطاق المركزي، يفتح المجال لتطوير آليات أوضح لتنسيق المرجعيات وضمان انسجام أكبر في المتابعة، وهو ما ظهر جليًا في نتائج الرقابة التي أشارت إلى أن صيانة المرافق وجودة خدمات النظافة وسرعة التجاوب مع ملاحظات النزلاء تمثل مجالات أساسية قابلة للتطوير، بما يتيح تعزيز كفاءة التشغيل وتحسين مستوى الخدمة المقدمة (معهد خادم الحرمين الشريفين لأبحاث الحج والعمرة ،2024; وزارة السياحة ،2022 أ ; وزارة السياحة ،2022 ب).

ولا يقتصر التحدي على مستوى التجهيزات والمواقع، بل يمتد إلى البيئة الداخلية للمرافق، التي تعدّ من المحددات الحاسمة في تعزيز الصحة العامة. فقد أوضحت دراسة «تعزيز البيئة الصحية الداخلية التي يرتادها الحجاج» إلى أن بعض البيئات السكنية تبرز فرصًا تطويرية مهمة فيما يتعلق بتحسين التهوية وتقليل معدلات الرطوبة والحد من تراكم الأتربة، إضافة إلى تعزيز برامج التعقيم للمطابخ والأدوات، بما يساهم في الارتقاء بمستوى السلامة الصحية خاصة للفئات الأكثر حساسية من الحجاج ككبار السن وذوي الأمراض المزمنة (معهد خادم الحرمين الشريفين لأبحاث الحج والعمرة ،2024). ومن هنا تبرز الحاجة إلى دمج المعايير البيئية ضمن منظومة تصنيف الإسكان، وتطبيق أنظمة رقابية معززة لضمان التعقيم والتطهير والتصريف السليم داخل الوحدات السكنية.

أما على صعيد مشغلي الخدمة، فالمعطيات الميدانية في ملف الإسكان تظهر تفاوتًا طبيعيًا في مستوى التفاعل بين شركات تقديم الخدمة لحجاج الخارج، الأمر الذي يعكس حاجة القطاع إلى تعزيز التنسيق وتوحيد الممارسات بما يسهم في تحقيق مستوى أعلى من الانسجام والفاعلية، حيث تتولى بعض الشركات أدوارًا مباشرة في التهيئة والإشراف، كما تتنوّع مساهمات الشركات المشغّلة في آليات التنسيق وأنماط المتابعة، بما يتيح مجالًا رحبًا لتوسيع التكامل الميداني عبر توظيف الحلول الرقمية المتقدمة التي تعزز الرقابة التشغيلية وترتقي بكفاءة التنفيذ. ويبيّن «دليل التصنيف الكمي والنوعي» أن مؤشرات الأداء في مجال الإسكان تظهر وجود تنوع في مستويات النظافة وإدارة الصيانة وتوافر أدوات السلامة، الأمر الذي يبرز الحاجة إلى تطوير آليات أكثر تكاملًا لضبط الجودة وتعزيز الاتساق في مختلف مرافق الإيواء، هو ما يعكس الحاجة إلى نماذج تشغيلية أكثر اتساقًا، تستند إلى معايير موحّدة قادرة على الارتقاء بجودة الخدمة وضمان استدامتها، مما يفرض ضرورة تعزيز الشراكة الفعلية بين شركات الخدمة ومزودي السكن، وتوثيق جميع جوانب التشغيل في نظام رقمي موحد (وزارة الحج والعمرة ،2024 ب).

كما يتفاوت مستوى الخدمة وفقًا لموقع المرافق، حيث يتمتع السكن في النطاق المركزي القريب من المسجد الحرام بمزايا نوعية من حيث البنية، والخدمات المساندة، والجاهزية التشغيلية، في حين تكشف التجربة بالمناطق الطرفية والمرتفعات، عن فرص تطويرية لتعزيز خدمات النقل وضمان استمرارية إمدادات المياه، إلى جانب توسيع نطاق خدمات الإنترنت وتحسين برامج النظافة الدورية، بما يسهم في رفع جودة الإقامة وتحقيق تجربة متكاملة للحجاج، كما تظهر بعض المنشآت القديمة فرصًا تطويرية مهمة تتمثل في تحسين البنية التحتية من خلال إضافة مصاعد ملائمة، واستحداث مسارات آمنة مخصصة لذوي الإعاقة، بما يسهم في تعزيز شمولية الخدمة وتوفير بيئة إقامة أكثر ملاءمة لجميع الفئات، أو مسارات آمنة لذوي الإعاقة، مما يبرز غياب سياسة متكاملة لإحلال أو تطوير هذه المباني بما يتناسب مع الحد الأدنى من المعايير الفندقية (وزارة الحج والعمرة ،2022 أ ; وزارة السياحة ،2022 ب)

ومن زاوية قياس رضا الحجاج، الذي يعدّ مؤشرًا حاسمًا في تقييم جودة الإسكان، أظهرت بيانات موسم 1445هـ أن متوسط الرضا العام بلغ 78%، مع تسجيل درجات مرتفعة في فنادق التصنيف العالي، وتراجع في مرافق الإسكان الأقل تصنيفًا. وقد تركزت أبرز مظاهر الرضا في سرعة الاستجابة، ونظافة الغرف، وهدوء البيئة المحيطة، بينما أظهرت بعض النتائج الحاجة إلى تطوير بيئة الإقامة من خلال زيادة كفاءة استغلال المساحات، وتحسين تجهيزات الحمامات، وتعزيز مستوى الاحترافية في التعامل داخل بعض المنشآت، بما يسهم في الارتقاء بجودة تجربة الحاج (معهد خادم الحرمين الشريفين لأبحاث الحج والعمرة ،2024).

وبالعودة إلى تحليل الفجوة في الوضع الراهن لمجمل هذه المعطيات، يتضح أن فجوة الإسكان لا تقتصر على بعدها المادي، بل تنبع من قصور مؤسسي وتنظيمي، يمكن تتبعه عبر عدة مسارات رئيسة

1. فجوة المعايير والتطبيق: تتمثل هذه الفجوة في الحاجة إلى تعزيز مواءمة الواقع التشغيلي

للمباني السكنية – خاصة الواقعة خارج النطاق المركزي – مع ما تنص عليه اللوائح النظامية الصادرة عن وزارة السياحة ودليل تصنيف مرافق الإيواء، بما يشمل مواصفات النظافة والصيانة والتجهيز. وتمثل هذه الفجوة فرصة لتطوير آليات متابعة أكثر فاعلية، وتوسيع نطاق تطبيق المعايير الموحدة، بما يرفع من جودة بيئة الإقامة ويعزز تجربة الحاج (وزارة السياحة ،2022 ج).

2. الفجوة الإشرافية والتنظيمية: تبرز الحاجة في هذا المجال إلى تعزيز وضوح الأدوار وتكاملها بين الوزارات المعنية ومكاتب شؤون الحجاج، بما يسهم في رفع مستوى التنسيق المؤسسي وتطوير آليات محاسبة أكثر فاعلية. وتمثل هذه الفجوة فرصة لإرساء نموذج تنظيمي موحّد يضمن الانسجام بين مختلف الجهات، ويعزز من قدرة المنظومة على الالتزام بالاشتراطات الأساسية وضمان جودة الخدمات المقدمة (معهد خادم الحرمين الشريفين لأبحاث الحج والعمرة ،2024)

3. الفجوة الجغرافية: تظهر البيانات تباينات مرتبطة بالموقع الجغرافي للوحدات السكنية، ما يبرز الحاجة إلى خطط تطويرية تقلّص الفوارق وتعزز معايير الجودة بما يضمن تجربة أكثر اتساقًا للحجاج في مختلف المواقع (وزارة الحج والعمرة ،2020 ; وزارة السياحة ،2022 أ)

4. فجوة السلامة البيئية: تحسين معايير التهوية والتعقيم والتنظيف العميق يمثل مجالًا واعدًا للتطوير، إذ يتيح تبني ممارسات وقائية متقدمة مستندة إلى أفضل النظم البيئية تعزيز سلامة الحجاج والارتقاء بجودة بيئة الإقامة (وزارة الحج والعمرة ،2025)

5. فجوة الرضا والتجربة: تشير المعطيات إلى وجود فرص تطويرية مهمة لتعزيز رضا الحجاج وتجربتهم السكنية، حيث يظل هذا المؤشر ركيزة أساسية في قياس جودة الخدمات. وتفتح هذه النتائج المجال أمام بناء آليات مبتكرة وذكية لرصد انطباعات الحجاج والتفاعل مع احتياجاتهم اليومية بصورة لحظية، بما يسهم في تحسين جودة التجربة ورفع مستويات الرضا نحو آفاق أوسع من الاستدامة والتميز التشغيلي (معهد خادم الحرمين الشريفين لأبحاث الحج والعمرة ،2024)

6. الفجوة الرقمية والمتابعة: تتمثل هذه الفجوة في الحاجة إلى منصة رقمية موحدة لمنظومة الإسكان، تتيح الإشراف اللحظي وتكامل البيانات وتحليل مؤشرات الأداء في الزمن الحقيقي، بما يعزز كفاءة المتابعة ويرفع مستوى الشفافية. وتمثل هذه الفجوة فرصة لتبني حلول رقابية ذكية تستفيد من التقنيات الحديثة في دعم استدامة التشغيل وجودة الخدمة (وزارة الحج والعمرة ،2024 ب).

وفي ضوء هذه المؤشرات، تتبلور الحاجة إلى رؤية تطويرية شاملة تتضمن تحديث المعايير، توحيد الجهة المشرفة، رفع كفاءة المشغلين، تطبيق نظم التقييم اللحظي، وتبنّي آليات رقمية فاعلة ترتبط بشكاوى الحجاج وملاحظاتهم بشكل مباشر، لذلك التحول نحو الإشراف الذكي يمثل أداة محورية لتقليص الفجوة، وتحقيق مستوى خدمي يتناغم مع مكانة الشعيرة، وحقوق الحاج، وطموحات رؤية المملكة 2030.

6. الدراسات السابقة

1.6. الدراسات النظرية حول التحول الرقمي والتقنيات التفاعلية

يشكل التحول الرقمي أحد أهم التحولات الهيكلية التي شهدتها القطاعات الخدمية خلال العقدين الأخيرين، حيث أصبح تبني التقنيات التفاعلية ركيزة أساسية لتحسين الكفاءة التشغيلية وتعزيز تجربة المستخدم. وقد تناولت العديد من الدراسات هذا المفهوم من زاوية شمولية، إذ أشار الباحث ويو وزملائه (Wu et al., 2022) إلى أن التحول الرقمي لا يقتصر على إدخال التكنولوجيا في العمليات القائمة، بل يتطلب إعادة هيكلة شاملة للنظم الإدارية والخدمية بما يحقق التكامل بين المكونات التقنية والبشرية. كما أوضحت الدراسة كذلك أن التطبيقات التفاعلية القائمة على الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء باتت تمثل عنصرًا ا محوريًا في صياغة استراتيجيات الابتكار المؤسسي

وفي ذات السياق، بيّنت دراسة الباحث بوهاليس (Buhalis, 2019) أن التقنيات التفاعلية تتسم بالقدرة على التكيف مع أنماط الطلب المتغيرة من خلال تحليل البيانات الضخمة في الوقت الفعلي، مما يعزز من مرونة الخدمات واستجابتها. وأكدت دراسة الباحثان بوهاليس، وليونغ (Buhalis, and Leung, 2018) أن التحول نحو المنصات الرقمية يسهم في تعزيز كفاءة إدارة الموارد، ويتيح تقديم خدمات مخصصة تستجيب لاحتياجات المستخدمين. كما أوضحت دراسة الباحث كيم وهان (Kim and Han, 2020) أن الابتكار في الخدمات الرقمية يتطلب دمج تقنيات مثل الواقع المعزز والواقع الافتراضي لخلق بيئة تفاعلية محفزة تزيد من رضا المستفيدين.

ومن منظور نظري، أشار الباحثان دالجيتش وبيردير (Dalgic and Birdir, 2020) إلى أن مفهوم «المؤسسات الذكية» يتخطى الأبعاد التقنية ليشمل التحول في الثقافة التنظيمية وأساليب اتخاذ القرار، مما يعزز قدرة المؤسسات على المنافسة في بيئات شديدة الديناميكية. وفي هذا الإطار، أوضح الباحثان كاسايس، وفيريرا (Casais, and Ferreira, 2023) أن نجاح التحول الرقمي يتطلب مواءمة البنية التحتية التقنية مع استراتيجيات العمل، وضمان تكامل تدفق المعلومات بين الأنظمة المختلفة

2.6. الدراسات حول الإدارة الذكية للإسكان والخدمات الفندقية

أولت الأبحاث اهتمامًا واسعًا بتطبيق التقنيات التفاعلية في مجال الإسكان والخدمات الفندقية، حيث بيّنت دراسة الباحث فِنغ وزملائه (Feng, et al.,2022) أن الفنادق الذكية تعتمد على منظومات متكاملة من أجهزة الاستشعار والأنظمة المؤتمتة لإدارة الطاقة، الأمن، وخدمات النزلاء، مما يسهم في خفض التكاليف التشغيلية وتحسين الاستدامة البيئية. كما أظهرت دراسة الباحث ويو وزملائه (Wu, et al.,2018) أن اعتماد المنصات التفاعلية في إدارة حجوزات الغرف وتخصيص الخدمات يعزز من ولاء العملاء ويزيد من الإيرادات.، كذلك أشارت دراسة الباحث كيم وزملائه (Kim et al., 2024) إلى أن تطبيق تقنيات إنترنت الأشياء في بيئة الفنادق يتيح مراقبة استهلاك الموارد وإدارة الصيانة التنبؤية، وهو ما يقلل من الأعطال المفاجئة ويرفع من جودة الخدمة. كما أوضح الباحث شو (Xu, 2018) أن النظم الفندقية الذكية يمكن أن تقدم خدمات مخصصة بناءً على تفضيلات النزلاء التي يتم جمعها وتحليلها عبر واجهات تفاعلية. وفي دراسة تحليلية، تناول الباحث يانغ وزملائه (Yang, et al.,2021) أثر حلول رقمية على تجربة النزيل، حيث خلصا إلى أن الخدمات الممكّنة بالتقنيات التفاعلية ترفع من مستوى رضا النزيل عبر توفير خيارات تحكم ذاتي في بيئة الإقامة، وتقديم معلومات فورية عن الأنشطة والمرافق المتاحة. وأكدت دراسة الباحث يانغ وزملائه (Yang, et al., 2023) أن دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي في العمليات

الفندقية يسهم في التنبؤ باحتياجات النزلاء قبل طلبها، مما يعزز الطابع الشخصي للتجربة الخدمية

3.6. الدراسات التي دمجت بين التقنية والإدارة التشغيلية في بيئات كثيفة الزوار

اهتمت مجموعة من الدراسات بتطبيقات التقنيات التفاعلية في البيئات التي تتسم بكثافة الزوار، مثل الوجهات السياحية الكبرى والمراكز الحضرية. فقد أشار الباحث بوخاليس (Buhalis, 2019) إلى أن دمج أنظمة المراقبة الذكية وإدارة الحشود يسهم في تحسين انسيابية الحركة وتقليل الازدحام، من خلال التحليل الفوري للبيانات المكانية وتوجيه الزوار بشكل ديناميكي. كما أوضح الباحثان دالجيتش وبيردير (Dalgic and Birdir,2020) أن استخدام المنصات الرقمية التفاعلية في إدارة الفعاليات الكبرى يتيح تكامل المعلومات بين مختلف الجهات التشغيلية، ويعزز القدرة على الاستجابة السريعة للطوارئ

وبيّنت دراسة الباحث أنور وزملائه (Anwar et al.,2023) أن الجمع بين إنترنت الأشياء وتحليلات البيانات الضخمة في إدارة المرافق العامة يسهم في ترشيد استهلاك الموارد وتحسين الصيانة الوقائية، وهو ما ينعكس على جودة التجربة المقدمة للزوار. وأكدت دراسة الباحث يانغ وزملائه (Yang et al., 2023) أن المنصات التفاعلية قادرة على دعم اتخاذ القرار التشغيلي في الوقت الفعلي، خاصة في البيئات التي تتسم بتقلبات الطلب وسرعة تغير الظروف. ومن زاوية أخرى، أشارت دراسة الباحث ويو وزملائه (Wu, et al.,2018) إلى أن تصميم البنية التحتية الرقمية في المواقع السياحية والحضرية الكبرى يجب أن يراعي المرونة التشغيلية، من خلال اعتماد نظم معيارية قابلة للتوسع وإعادة التهيئة حسب الحاجة. كما أوضح الباحث وانغ وزملائه (Wang et al., 2020) أن التكامل بين النظم التقنية ومراكز التحكم المركزي يتيح رؤية شاملة للأوضاع التشغيلية، ويساعد في توزيع الموارد بكفاءة أكبر

4.6. تحليل الفجوة البحثية

تكشف الدراسات السابقة عن اتساع نطاق الاهتمام الأكاديمي بالتقنيات التفاعلية والتحول الرقمي، مع تركيز ملحوظ على تطبيقها في إدارة الخدمات الفندقية والإسكان الذكي، وكذلك في البيئات التي تشهد كثافة عالية من الزوار. ورغم تنوع السياقات، فإن القاسم المشترك بين هذه الدراسات يتمثل في التأكيد على أن نجاح هذه التقنيات يرتبط ارتباطًا وثيقًا بتكاملها مع النظم الإدارية والتشغيلية، ومواءمتها مع خصوصية كل بيئة تشغيلية، وهو ما يشير إلى إمكانية الاستفادة من هذه الخبرات في تطوير إدارة إسكان الحجاج، بما يحقق بنية تشغيلية ذكية ومرنة قادرة على مواكبة التحديات الميدانية والعدد الكبير من المستفيدين

غير أن هذا الزخم البحثي في مجالي التحول الرقمي والتقنيات التفاعلية تركزت في البيئات الفندقية المستقرة، بما يفتح المجال أمام فرص واعدة لتوسيع نطاقها لتواكب خصوصية البيئات الموسمية عالية الكثافة كإسكان الحجاج، وبما يعزز من مرونة التشغيل واستدامة الخدمات، فعلى الرغم من بروز تقنيات إنترنت الأشياء والتحليلات التنبؤية، فإن تطبيقاتها بقيت أسيرة النماذج التجريبية أو البيئات المغلقة، ولم تدمج بشكل فعّال مع منظومات الإشراف الحكومي أو المشغلين الموسميين. كما أن النماذج البيئية التنبؤية، مثل نموذج TSD-EMLP، لم تخضع لاختبارات ميدانية في مواسم الحج، مما أبقى التفاعل اللحظي بين الجهات الإشرافية المتعددة محدود الفهم وقليل التوظيف

وتزداد الفجوة وضوحًا مع غياب أنظمة الإنذار المبكر ولوحات التحكم الذكية عن إطار متابعة الامتثال وتحسين الخدمة في الزمن الحقيقي، فضلًا عن محدودية التناول الأكاديمي لمتطلبات المرونة التشغيلية للبنى الرقمية في مرافق الإقامة المؤقتة. وتبرز هذه المعطيات الحاجة إلى تطوير أطر تشغيلية ذكية ومرنة، قادرة على دمج التقنيات التفاعلية مع آليات الإشراف متعدد الأطراف، بما يضمن استجابة لحظية وفاعلة في بيئة ديناميكية ومعقدة كبيئة الحج.

7. أسئلة الدراسة

يتمحور السؤال الرئيس لهذه الدراسة حول استقصاء مدى قابلية توظيف واستثمار أفضل التجارب والممارسات في مجال منصات تشغيل وإدارة الفنادق في مكة المكرمة والمدينة المنورة، بما يؤدي إلى تمكين وزارة الحج والعمرة ووزارة السياحة من تعزيز قدراتهما الإشرافية والرقابية، والارتقاء بكفاءتهما في متابعة الأداء وتقييم جاهزية مرافق الإيواء المخصصة لضيوف الرحمن، على نحو يستجيب لخصوصية المتطلبات التشغيلية لمواسم الحج، التي تتسم بكثافة بشرية استثنائية وتعقيدات ميدانية متنامية

8. منهجية الدراسة

استندت هذه الدراسة إلى المنهج الوصفي التحليلي المدعوم بأسلوب دراسة الحالة، بما يتيح توصيف الظاهرة قيد البحث وتحليل أبعادها التقنية والتشغيلية، وصولًا إلى صياغة تصور علمي متكامل حول جدوى منصة TDH (The Digital Hotelier)، في تلبية متطلبات إدارة إسكان الحجاج وتعزيز كفاءة الإشراف والمتابعة. وقد جرى تصميم المنهجية بما يضمن شمولية التغطية الميدانية ودقة التحليل الإحصائي والمقارن

1.8. خطوات تنفيذ الدراسة:

روعي في تصميم منهجية الدراسة تحقيق التكامل بين الوصف الدقيق للواقع الميداني والتحليل المقارن للمنصات التقنية في قطاع الضيافة في الحج والعمرة كما هو موضح في الشكل (1)، وشملت الخطوات ما يلي

1. حصر برامج تشغيل وإدارة الفنادق في مكة المكرمة والمدينة المنورة، مع التركيز على المنصات السحابية المعتمدة في قطاع الضيافة، وذلك في كل من الفنادق العالمية التي تستخدم منصات إدارة متكاملة، والفنادق المحلية التي غالبًا ما تعتمد على أنظمة تشغيل محلية أو برامج غير متصلة بالشبكة (offline).

2. اختيار كحالة دراسية رئيسية، استنادًا إلى مبررات تتعلق بمرونتها التشغيلية، وإمكانية تخصيصها لتلبية المتطلبات التنظيمية لوزارة الحج والعمرة ووزارة السياحة، فضلًا عن تكاملها مع العمليات التشغيلية الأمامية والخلفية في الفنادق

3. تم تطبيق استبيان ميداني على أحد فنادق مكة المكرمة، حيث شكّل فريق عمل من ثلاثة

مسؤولين يمثلون الجوانب التقنية والتشغيلية والصيانة، وتكوّ ن الاستبيان من ثمانية محاور رئيسة، غطّت كفاءة التشغيل، دعم اتخاذ القرار، تجربة النزيل، آليات الإشراف، النظافة، تقييم رضا الحجاج، والدعم الفني

4. أجريت مقابلات شبه مهيكلة مع الفريق ذاته، وشملت مدير التشغيل، ومسؤول تقنية المعلومات، ومدير الصيانة، بالاستناد إلى دليل مقابلات إرشادي، وتم تحليل البيانات نوعيًا باستخدام أسلوب الترميز المفتوح، مع مراجعة داخلية للتحقق من مصداقية النتائج

5. أعدّ جدول مؤشرات تشغيلية مقترحة (KPI) يربط بين كل توصية ومحور قياس كمي، مع تحديد خط الأساس والهدف المستهدف (انظر الجدول ا)

6. اعتمدت الدراسة على مقابلات مع إدارات الفنادق المستخدمة لمنصة TDH، بهدف جمع بيانات كمية ونوعية حول فعاليتها في تحسين تجربة الضيوف ورفع كفاءة التشغيل خلال موسمي الحج والعمرة.

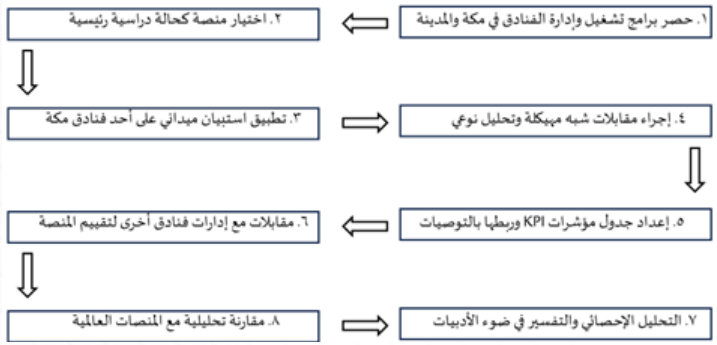
7. إجراء مقارنة تحليلية بين المنصات العالمية المشابهة، استنادً ا إلى معايير الأداء التشغيلي، وخصائص تجربة الضيف، ودعم تعدد اللغات، وقابلية التخصيص، ومدى الملاءمة لبيئة التشغيل في مواسم الحج

8. تحليل البيانات باستخدام الأساليب الإحصائية الوصفية والمقارنة، مع تفسير النتائج في ضوء الأدبيات والدراسات السابقة حول التحول الرقمي في قطاع الضيافة وخدمة ضيوف الرحمن.

2.8. إطار الدراسة

(1) الإطار المكاني: ركزت الدراسة على الفنادق المصنفة في مكة المكرمة والمدينة المنورة، وتشمل فنادق فئة الخمس والأربع والثلاث نجوم المخصصة لخدمة ضيوف الرحمن.

(2) الإطار الزمني: تم جمع البيانات خلال موسم حج 1446هـ، متضمنة مراحل الحصر الميداني، وتصميم الأداة البحثية، وجمع وتحليل البيانات



شكل (1): مخطط التسلسل المنهجي لتحليل كفاءة منصات تشغيل الفنادق الموسمية

جدول (1): أبرز المؤشرات التشغيلية المقترحة (KPIs)

التسلسل	المؤشر المقترح (KPI)	خط الأساس التقديري	الهدف التشغيلي المستهدف
١	نسبة تكامل المنصة مع الأنظمة الحكومية (API Coverage)	٤٥٪	≥ ٨٥٪
٢	متوسط زمن تسجيل وصول النزيل (Check-in Time)	٧ دقائق	≤ ٥ دقائق
٣	زمن استخراج التقارير التشغيلية للرقابة	٢٤ ساعة	≤ ١٥ دقيقة
٤	نسبة المهام التشغيلية (نظافة/صيانة) الموثقة لحظيًا	غير متوفرة	≥ ٩٠٪

9. نتائج الدراسة

تستعرض هذه النتائج ما تم التوصل إليه من خلال مراحل الحصر الميداني والتحليل المقارن، بهدف تقديم صورة شاملة عن واقع منصات تشغيل وإدارة الفنادق في مكة المكرمة والمدينة المنورة، ومدى مواءمتها لاحتياجات إدارة إسكان الحجاج، وسوف تعرض النتائج في إطار ثلاثة محاور رئيسة، على النحو الآتي

1.9. تحليل واقع منصات تشغيل وإدارة الفنادق بمكة المكرمة والمدينة المنورة

يشهد قطاع الضيافة في مكة المكرمة والمدينة المنورة اعتمادً ا متزايدً ا لمنصات تشغيل وإدارة الفنادق (Property Management System - PMS) التي تمثل محورً ا استراتيجيًا في إدارة العمليات بكفاءة عالية خلال مواسم الحج والعمرة ذات الكثافة الاستثنائية. وتتصدر عدة منصات من أهمها منصة OPERA Cloud PMS النظام العالمي واسع الانتشار الذي يتيح إدارة متكاملة للحجوزات، وتخصيص الغرف، والعمليات المالية بدعم برامج الولاء؛ ثم منصة Protel PMS الحل الأوروبي المرن الموجه للفنادق متوسطة وكبيرة الحجم مع قدرات تحليلية دقيقة؛ و منصة Cloud beds المنصة السحابية الشاملة التي تدمج الحجوزات وربط القنوات التسويقية والمدفوعات الإلكترونية مع تكامل قوي مع منصات الحجز العالمية؛ إضافة إلى منصة iNPLASS التي تلبي متطلبات الفنادق المحلية والدولية بواجهات متعددة اللغات وإمكانات تشغيلية متقدمة؛ وأخيرً ا منصة The Digital Hotelier(TDH) المنصة الرقمية متعددة اللغات التي تركز على تقديم تجارب نزلاء شخصية وتحسين الإيرادات عبر التحليلات الذكية والتسويق الرقمي. ويعكس هذا التنوع التقني قدرة سوق الضيافة في المدينتين المقدستين على تبني حلول رقمية مبتكرة تسهم في رفع الكفاءة التشغيلية وتحقيق التميز في تجربة الضيف

2.9. المقارنة التحليلية بين المنصات التشغيلية

أجريت مقارنة بين أشهر منصات تشغيل وإدارة الفنادق (PMS) الموجود في قطاع الضيافة في مكة المكرمة والمدينة المنورة، بهدف قياس مدى ملاءمتها للبيئة التشغيلية عالية الكثافة في مواسم الحج، وللاحتياجات المؤسسية لوزارة الحج والعمرة ووزارة السياحة، وذلك من خلال أربعة معايير رئيسية هي التكامل التشغيلي مع أنظمة الضيافة، المراقبة اللحظية والتحليلات التنبؤية، المرونة الموسمية، والامتثال لمعايير السلامة والصحة والنظافة

أظهرت النتائج أن المنصات العالمية مثل OPERA Cloud PMS، ومنصةProtel PMS، ومنصة Cloud

beds، تمتلك قدرات متقدمة في إدارة العمليات الفندقية، لكنها تواجه تحديات في التكيّف السريع مع المتطلبات التنظيمية والظروف التشغيلية الموسمية للحج. في المقابل، تميّزت ومنصة iNPLASS ، ومنصة TDH بمرونتها التطويرية، وقدرتها على دمج البيانات التشغيلية مع مؤشرات الامتثال المؤسسي في الوقت الفعلي، مما يمنحها تفوقًا نوعيًا في دعم اتخاذ القرار وإدارة الذروة التشغيلية

ولتعزيز دقة المقارنة، تم إعداد مصفوفة تحليلية أكاديمية توضّح الفروقات الجوهرية بين المنصات، كما هو موضح في الجدل (2) حيث بيّنت المصفوفة أن منصة TDH تحقق أعلى درجات الملاءمة لمتطلبات وزارة الحج والعمرة ووزارة السياحة، بفضل تكاملها المزدوج (المحلي والعالمي)، وتوافقها مع المعايير الرقابية والتنظيمية الوطنية، مقارنة بالمنصات الأخرى التي تتطلب تعديلات جوهرية لتحقيق ذات المستوى من التوافق

جدول (2): مصفوفة مقارنة مدى ملاءمة المنصات التشغيلية الفندقية لاحتياجات وزارة الحج والعمرة ووزارة السياحة

المنصة	التكامل التشغيلي مع أنظمة الضيافة	المراقبة اللحظية والتحليلات التنبؤية	المرونة الموسمية والتكيف التشغيلي	الامتثال لمعايير السلامة والصحة والنظافة	الملاءمة لاحتياجات الوزارتين	الدرجة الإجمالية
The Digital Hotelier	٣	٣	٣	٣	٣	١٥
iNPLASS	٣	٣	٣	٣	٢	١٤
OPERA Cloud PMS	٣	٣	٢	٣	٢	١٣
Protel PMS	٣	٢	٢	٣	٢	١٢
Cloud beds	٢	٢	١	٣	١	٩

* اعتماد مقياس ثلاثي (٣=مرتفع، ٢=متوسط، ١=منخفض) لقياس مدى استجابة المنصات لمتطلبات التشغيل الموسمي والرقابة المؤسسية.

وفي ضوء ما أظهرته مصفوفة المقارنة، تبرز الحاجة إلى تعميق التحليل التشغيلي للمنصات الرقمية المستخدمة، من خلال تطوير إطار معياري لتقييم الأداء يستند إلى مؤشرات قابلة للقياس، مثل: سرعة الاستجابة، دقة التقارير، مستوى التخصيص، ودرجة توافق المنصة مع متطلبات الجهات الإشرافية كوزارة الحج والعمرة ووزارة السياحة. كما أن تعزيز قدرات المنصات في التكامل مع الأنظمة البيئية الداعمة (كأنظمة إدارة الطاقة، التدبير المنزلي، ونقاط البيع) يمثل فرصة تطويرية واعدة لرفع فاعلية الأداء المؤسسي، خصوصًا في المواسم عالية الكثافة. ويوصى باعتماد ممارسات مرجعية مثل معيار ISO 20000 الخاص بإدارة خدمات تقنية المعلومات لتوجيه عمليات التقييم والتحسين المستمر، بما يعزّز موثوقية المنصات الرقمية ويسهم في دعم اتخاذ القرار المبني على البيانات في بيئة إسكان الحجاج.

3.9. التقييم التشغيلي لمنصة The Digital Hotelier

يعد الفندق المختار أحد أبرز فنادق الخمس نجوم في مكة المكرمة بإدارة محلية، ويمثل نموذجًا مهمًا لدراسة أداء المنصات الرقمية في بيئة تشغيلية ذات كثافة عالية نظرًا لموقعه الاستراتيجي وخدمته المباشرة لضيوف الرحمن. يديره فريق محلي مستقل يتمتع بمرونة في التكيف مع المواسم ذات الضغط التشغيلي الكبير، ويضم الفندق 411 غرفة معدة لاستيعاب أعداد كبيرة من الحجاج والمعتمرين. وقد اعتمد الفندق منصة TDH لأكثر من عام، مما أتاح تراكم خبرة عملية في استخدامها على المستويين اليومي والموسمي.

في ضوء نتائج المقابلة الميدانية، يتضح أن المنصة مثّلت أداة تشغيلية ذات إمكانات معتبرة لدعم قطاع الضيافة، مع تباين ملحوظ في فعاليتها عبر المحاور المختلفة. فقد أظهرت سهولة في الاستخدام وسرعة في الأداء انعكست إيجابًا على إدارة العمليات الروتينية، إلى جانب دقة وموثوقية في البيانات والتقارير، وهو ما عزز من كفاءة اتخاذ القرار. كما حققت مستوى مقبولًا من التكامل مع الأنظمة الداخلية كالمحاسبة ونقاط البيع، غير أن هذا التكامل ما يزال بحاجة إلى تطوير لضمان انسيابية أكبر. ويعد دعم تعدد اللغات من أبرز مزاياها، إذ أسهم بشكل فعّال في خدمة الحجاج والمعتمرين من خلفيات متعددة

على صعيد تجربة النزيل، أسهمت المنصة في تسريع إجراءات تسجيل الوصول والمغادرة، وساعدت في رفع رضا الضيوف وإدارة الحجوزات بكفاءة خلال مواسم الذروة، بينما بدت إمكاناتها محدودة نسبيًا في إنتاج مؤشرات استراتيجية للتخطيط بعيد المدى. أما من حيث مواءمتها لمتطلبات الحج والعمرة، فقد أظهرت مرونة تشغيلية جيدة، لكن تقاريرها التشغيلية لم تكن بالقدر الكافي من التخصيص لتلبية متطلبات الجهات الإشرافية كوزارة الحج والعمرة ووزارة السياحة.

كما أظهرت النتائج الحاجة إلى توسيع نطاق توظيف الأدوات الذكية لمتابعة أعمال النظافة والتدبير المنزلي بصورة لحظية، بما يعزز كفاءة التشغيل ويرفع من جودة الخدمة، ويزيد من جاهزية المنظومة خلال أوقات الذروة. كما أن تطوير إمكانات المنصات الرقمية لمتابعة أداء الموظفين ورصد إنجازاتهم، خصوصًا في المهام الحساسة مثل الصيانة والنظافة، يمثل مجالًا واعدًا لتحسين الجودة التشغيلية وضمان استدامة الخدمة، وهو ما يستدعي تطوير وحدات متخصصة تعزز التكامل بين الموارد البشرية والعمليات التشغيلية. أما فيما يتعلق بالدعم الفني وخدمات ما بعد البيع، كذلك أظهرت النتائج أن خدمات الدعم الفني تحقق مستوى مقبولًا من الاستجابة يتناسب مع التدريب الأولي الذي حظي برضا المشاركين، ومع ذلك تبرز الحاجة إلى تعزيز قدراتها خلال فترات الضغط التشغيلي عبر التحديث المستمر للنظام وإضافة خصائص جديدة، بما يسهم في رفع مستوى الاعتمادية والجاهزية التشغيلية.. وعليه، يمكن تلخيص المزايا الرئيسة للمنصة في سهولة الاستخدام، سرعة الأداء، دعم تعدد اللغات، وتوفير تقارير دقيقة، في مقابل تحديات تمثلت في ضعف التكامل مع بعض الأنظمة الداخلية، محدودية التخصيص، غياب التتبع اللحظي لأعمال النظافة، وتأخر الاستجابة الفنية. هذه النتائج مجتمعة تؤكد أن المنصة ساعدت على تحسين التجربة التشغيلية والفندقية، إلا أنها ما تزال بحاجة إلى تطويرات إضافية لضمان مواءمة أفضل مع متطلبات إدارة إسكان الحجاج

10. مناقشة النتائج

تظهر نتائج الدراسة أن منصة TDH قدمت إسهامًا ملموسًا في دعم العمليات التشغيلية داخل بيئات الإسكان الفندقي للحجاج، حيث انسجم ما توصلت إليه النتائج مع ما أوردته الأدبيات السابقة بشأن دور المنصات التفاعلية في تسريع الإجراءات وتحسين جودة الخدمات الفندقية (Buhalis, 2019؛ Kim et al., 2024)، وقد انعكس هذا على رفع كفاءة تسجيل الدخول والمغادرة، وتحقيق مستويات أعلى من رضا النزلاء، إلا أن هذه الفاعلية لم تكن متجانسة عبر جميع المحاور. أما على الصعيد التشغيلي والفني، أظهرت النتائج وجود فرصة لتعزيز أدوات المتابعة اللحظية لأعمال التدبير والنظافة، إلى جانب تطوير آليات التكامل بين المنصات الرقمية والأنظمة البيئية مثل إدارة النفايات وقياس البصمة الكربونية، بما يسهم في رفع كفاءة التشغيل وتحقيق استدامة بيئية أشمل. غير أن المنصة تمتلك مقومات لتجاوز هذه التحديات عبر تطوير لوحات تحكم لحظية تعزز الرقابة التشغيلية، وربطها مع أنظمة الاستدامة لإنتاج تقارير شاملة عن استهلاك الطاقة والمياه

وفيما يتعلق بجودة تجربة الحاج، تبرز فرصة لتطوير أدوات ذكية قادرة على متابعة الطلبات الطارئة ورصد مستويات رضا الحجاج بصورة آلية وتحليلية، بما يعزز من سرعة الاستجابة ويدعم بناء قاعدة بيانات دقيقة تسهم في تحسين جودة الخدمات واستدامتها، الأمر الذي يتسق مع ما أشارته الأدبيات إلى ضعف الأدوات التحليلية في البيئات ذات الكثافة العالية (Wu et al., 2018؛ Yang et al., 2021) هنا يمكن للمنصة أن تقدم حلولًا من خلال نظم استجابة فورية تعتمد على الذكاء الاصطناعي لرصد احتياجات النزلاء وإغلاق طلبات الصيانة أو الخدمات بشكل آلي. أما في البعد التنظيمي، فقد أبرزت النتائج الحاجة إلى تعزيز وضوح المقاييس التشغيلية وتطوير أدلة موحدة للإجراءات، بما يسهم في رفع كفاءة المتابعة وتحقيق مستوى أعلى من الانسجام بين الممارسات الميدانية والمعايير التنظيمية، وهو ما يضعف قدرة الجهات الإشرافية على المقارنة والتحليل المنهجي. وتبرز أهمية TDH في توحيد المعايير الرقمية عبر توفير تقارير تشغيلية قابلة للتخصيص بما يتماشى مع متطلبات وزارة الحج والعمرة ووزارة السياحة، وبما يسمح بمتابعة دقيقة للأداء وضبط جودة الخدمات

ومن جهة أخرى، فإن محدودية دعم اللغات النادرة شكلت تحديًا في خدمة وفود متنوعة من الحجاج، إلا أن ما تتميز به المنصة من دعم تعدد اللغات (سبع لغات) يعزز شمولية الخدمة ويوفر تجربة أكثر عدالة لجميع الفئات. كما أن تطوير خاصية المؤشرات الذكية للأداء البيئي يمكن أن يسهم في سد الفجوة المرتبطة بقياس جودة الهواء والبيئة الداخلية للمساكن.

وبناءً عليه، فإن النتائج تشير إلى أن المنصة، رغم ما حققته من قيمة تشغيلية، لا تزال بحاجة إلى تطويرات إضافية لتعزيز تكاملها مع البيئة المؤسسية والرقابية، حيث يتسق هذا الاستنتاج مع ما ورد في الأدبيات التي تؤكد أن نجاح التحول الرقمي في البيئات كثيفة الاستخدام يتطلب مواءمة دقيقة بين القدرات التقنية والأنظمة الإدارية، إلى جانب تطوير أدوات ذكية للرصد اللحظي وضمان مرونة التشغيل (Buhalis, 2019؛ Dalgic and Birdir, 2020). إلا أن ما تتيحه منصة TDH من حلول تقنية - مثل التكامل البيئي، الرصد اللحظي، أدوات تحليل الرضا الذكي، وتوحيد المقاييس الرقمية - يجعلها خيارًا استراتيجيًا لتجاوز التحديات التنظيمية والتشغيلية والخدمية، والانتقال نحو نموذج إشراف ذكي ومرن يضمن استدامة الخدمة وتحسين تجربة ضيوف الرحمن.

11. الخلاصة

تكشف هذه الدراسة عن أبعاد جوهرية في دور المنصات الرقمية التفاعلية في إدارة إسكان الحجاج، وذلك من خلال تحليل تجربة منصة TDH كنموذج محوري. أظهرت النتائج أن المنصة توفر قيمة تشغيلية معتبرة من حيث سهولة الاستخدام، سرعة الأداء، دعم تعدد اللغات، وتقديم تقارير تشغيلية دقيقة، مما انعكس إيجابًا على تحسين الكفاءة الداخلية ورفع مستوى رضا النزلاء. غير أن الدراسة أبرزت الحاجة إلى تعزيز التكامل المؤسسي والتشغيلي للمنصة في بيئة الحج، وذلك من خلال تطوير قدراتها على الارتباط بالأنظمة الداخلية للفنادق، وتوسيع أدواتها الذكية لمتابعة أعمال النظافة والتدبير المنزلي بصورة لحظية، إضافةً إلى رفع إمكاناتها في تتبّع أداء الموظفين ورصد إنجازاتهم بما يعزز من كفاءة التشغيل وجودة الخدمة. كما أبرزت النتائج الحاجة إلى تطوير آليات أكثر مرونة في تخصيص التقارير التشغيلية بما يتوافق مع متطلبات وزارة الحج والعمرة ووزارة السياحة، بما يفتح المجال أمام الاستفادة المثلى من إمكانات المنصة على المستوى المؤسسي، ويعزز قدرتها على دعم عمليات الإشراف والرقابة. وبالمقارنة مع الأدبيات السابقة، يتضح أن نجاح المنصات الرقمية في البيئات الموسمية عالية الكثافة، مثل الحج، لا يتحقق بمجرد تبني التكنولوجيا، بل يتطلب إعادة هيكلة وظيفية وتكاملًا مؤسسيًا أعمق بين مزوّد الخدمات الفندقية والجهات الإشرافية ذات العلاقة. وقد أكدت نتائج الدراسة أن التحدي الرئيس يكمن في تكييف هذه المنصات لتلبية خصوصية بيئة الحج، التي تتسم بكثافة بشرية هائلة وتعدد في الأطراف التنظيمية. وعليه، خلصت الدراسة إلى أن منصة TDH تعد أداة واعدة وقابلة للتطوير، إلا أن تحقيق القيمة المضافة المرجوة يستلزم إدخال تحسينات جوهرية تضمن مرونة أكبر، وتكاملاً وظيفيًا أعمق، وقدرة على الدمج بين التحليلات التنبؤية والمتابعة اللحظية. ويمثل ذلك مسارًا استراتيجيًا لتطوير منظومة رقمية متكاملة تعزز جودة خدمات الإسكان، وتتماهى مع مستهدفات رؤية المملكة 2030 نحو حج أكثر جودة واستدامة

12. التوصيات

تكشف نتائج هذه الدراسة عن جملة من المسارات التطويرية التي يمكن أن تسهم في تعزيز فاعلية منصات تشغيل وإدارة الفنادق في بيئة الحج والعمرة، وذلك على النحو الآتي

(1) دعم المنصات الرقمية لإدارة إسكان الحجاج عبر ربطها بالأنظمة التشغيلية للجهات المعنية (وزارة الحج والعمرة، وزارة السياحة، وزارة الشؤون البلدية والقروية والإسكان)، بما يعزز التكامل الرقابي، ويتيح التتبع اللحظي، ويواكب مستهدفات التحول الرقمي والاستدامة

(2) تعزيز التكامل الوظيفي للمنصات ويتمثل ذلك في تطوير واجهات ربط معيارية تتيح الانسياب السلس للبيانات بين منصة TDH والأنظمة الفندقية الأخرى (المحاسبة، نقاط البيع، أنظمة إدارة النفايات.. الخ)، بما يعالج تحدي قصور التكامل المؤسسي ويضمن تدفقًا لحظيًا للبيانات في مواسم الذروة.

(3) تطوير آليات متابعة النظافة والموارد البشرية ويقتضي ذلك إدراج وحدات تشغيلية متخصصة لمتابعة أعمال التدبير المنزلي (housekeeping) والنظافة بصورة لحظية، إلى جانب أدوات لرصد

حضور الموظفين وأدائهم، بما يواجه تحديات ضعف المتابعة اللحظية وصعوبة ضبط حضور العاملين أثناء التشغيل

(4) تحسين تجربة الحجاج ويتطلب ذلك تعميق دعم المنصة لتعدد اللغات (خاصة النادرة منها) وتوفير قنوات تفاعلية مباشرة تمكن الحجاج من التعبير عن ملاحظاتهم وشكاواهم في الزمن الحقيقي، بما يعالج محدودية أدوات قياس رضا الحجاج التقليدية ويتيح مؤشرات لحظية لقياس جودة الخدمة والرضا

(5) تمكين الرقابة المؤسسية ويتحقق ذلك من خلال تصميم تقارير تشغيلية قابلة للتخصيص مبنية على مؤشرات أداء واضحة (خاصة بالسلامة، جودة الهواء، والنظافة)، وهو ما يعالج التحديات المرتبطة بغياب الأدلة التشغيلية الموحدة وضعف التقييم البيئي

(6) الاستفادة من التحليلات التنبؤية ويعني ذلك دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء لإتاحة التنبؤ بالمشكلات التشغيلية (مثل أعطال الصيانة أو نقص المواد الاستهلاكية) ومعالجتها استباقيًا، بما يتجاوز التحديات التقليدية ويعزز مرونة التشغيل

(7) إرساء منظومة وطنية رقمية ويشمل ذلك تبني نسخة موسعة من المنصة كجزء من منظومة وطنية متكاملة لإدارة إسكان الحجاج، بما يوحد معايير القياس ويربط بيانات التشغيل عبر وزارة الحج والعمرة ووزارة السياحة، وهو ما يعالج مشكلة ازدواجية الأدوار وضعف التنسيق المؤسسي

(8) تعزيز التدريب والتحديث المستمر ويتطلب ذلك وضع برامج تدريبية دورية لموظفي الفنادق حول الاستخدام الأمثل للمنصة، إلى جانب تحديث مستمر للأنظمة الرقمية بما يتماشى مع المستجدات التشغيلية، وهو ما يقلل من التحديات المنهجية المرتبطة بضعف وضوح الأدوات أو غياب مقاييس التقييم الموحدة

(9) تطوير منظومة إدارة النفايات في الفنادق يتمثل في دمج منصة TDH مع أنظمة إدارة النفايات الذكية، بما يتيح مراقبة جمع وفرز النفايات بشكل لحظي، وقياس البصمة الكربونية للفنادق خلال موسم الحج والعمرة. كما يستلزم هذا المسار التنسيق المباشر مع الجهات التشغيلية ذات الصلة – مثل البلديات والشركات المتخصصة – لضمان كفاءة إدارة النفايات وتقليل الأثر البيئي، وهو ما يسهم في تعزيز الاستدامة ومواءمة الخدمات مع مستهدفات رؤية المملكة 2030.

المراجع

المراجع العربية

- وزارة الحج والعمرة (2024 أ). التقرير الختامي لموسم حج 1445هـ. كالة الوزارة لشؤون الحج (تقرير غير منشور)
- وزارة الحج والعمرة (2025). التقرير الختامي لموسم حج 1446هـ. كالة الوزارة لشؤون الحج (تقرير غير منشور)
- وزارة الحج والعمرة (2020). دراسة وتحليل الوضع الراهن لخدمات الإسكان. التقرير الفني، وكالة الوزارة لشؤون الحج (تقرير غير منشور)
- وزارة الحج والعمرة (2024 ب). دليل التصنيف الكمي والنوعي للخدمات التي تقدمها شركات تقديم الخدمة لحجاج الخارج. وكالة الوزارة لشؤون الحج (تقرير غير منشور).
- معهد خادم الحرمين الشريفين لأبحاث الحج والعمرة (2024). قياس رضا الحجاج 1445هـ. جامعة أم القرى
- وزارة السياحة (2022 أ). معايير تصنيف الفنادق. المملكة العربية السعودية (متاحة على الرابط: https://cdn.mt.gov.sa/mtportal/mt-fe-production/content/policies-regulations/documents/classification-criteria/specialty-types-of-hotels-ar-v011.pdf).
- وزارة السياحة (2022 ب). معايير تصنيف الشقق المخدومة. المملكة العربية السعودية (متاحة على الرابط: https://cdn.mt.gov.sa/mtportal/mt-fe-production/content/policies-regulations/documents/classification-criteria/serviced-apartment-classification-criteria-ar-v01.pdf)
- وزارة السياحة (2022 ج). لائحة مرافق الإيواء السياحي. الملحق التنظيمي الصادر عن وزارة السياحة، المملكة العربية السعودية (متاحة على الرابط: https://cdn.mt.gov.sa/mtportal/mt-fe-production/content/policies-regulations/documents/tourism-regulations/Hospitality-Facilities-Regulations-Ar-V012.pdf)

المراجع الإنجليزية:

- Anwar. F., Deliana, D., and Suyamto, S.(2023). Influence of technology and ICT policies on hotel guest satisfaction in the hotel industry: a case of 4 and 5 star rated hotels in Nairobi city. Journal of Hospitality and Tourism Management, 6(2), pp. 42-59.
- Buhalis, D. (2019). Technology in tourism-from information communication technologies to etourism and smart tourism towards ambient intelligence tourism: a perspective article. Tourism Review, 75(1), pp. 267-272.
- Buhalis, D. and Leung, R. (2018). Smart hospitality - interconnectivity and interoperability towards an ecosystem. International Journal of Hospitality Management, 71, pp. 41-50.
- Casais, B. and Ferreira, L. (2023). Smart and sustainable hotels: tourism agenda 2030 perspective article. Tourism Review, 78(2), pp. 344–351.
- Dalgic, A. and Birdir, K. (2020). Smart Hotels and Technological Applications. In: Handbook of Research on Smart Technology Applications in the Tourism Industry. Hershey, PA: IGI Global, pp. 323–343.
- Feng, Q., Borbon, N., and Deng, B. (2022). Smart hotel attributes and its effect on guest acceptance. International Journal of Research Studies in Management, 10(3), pp.89 -101
- Kim, J., Chang, P.S., Yang, S.B. et al. (2024). A comparative analysis of job satisfaction

prediction models using machine learning: a mixed-method approach. Data Technologies and Applications. 59 (1), pp. 41 60

- Kim, J.J. and Han, H. (2020). Hotel of the future: exploring the attributes of a smart hotel adopting a mixed-methods approach. Journal of Travel and Tourism Marketing, 37(7), pp. 804 -822.

- Wu, H.-C. and Cheng, C.-C. (2018). Relationships between technology attachment, experiential relationship quality, experiential risk and experiential sharing intentions in a smart hotel. Journal of Hospitality and Tourism Management, 37, pp. 42 -58.

- Wu, W., Chin, W. and Liu, Y. (2022). Technostress and the smart hospitality employee. Journal of Hospitality and Tourism Technology, 13(3), pp. 404 - 426.

- Xu, X. (ed.) (2018). Research on the construction and development of smart hotel from the perspective of serving customers. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Education Science and Economic Management (ICESEM 2018). Atlantis Press.

- Yang, H., Song, H., Cheung, C. and Guan, J. (2021). How to enhance hotel guests' acceptance and experience of smart hotel technology: an examination of visiting intentions. International Journal of Hospitality Management, 97, pp., Article103000.

- Yang, H., Song, H., Cheung, C. and Guan, J. (2023). Is prior smart hotel visiting experience and personal innovativeness critical to future visit intention? Journal of China Tourism Research, 19(2), pp. 266–289.

تقييم البصمة الكربونية وتطوير استراتيجيات التخفيف في المشاعر المقدسة من أجل التنمية المستدامة

فاطمة أنور سراج أكبر - قسم إدارة اعمال، نظم معلومات إدارية، جامعة الملك عبد العزيز

Carbon Footprint Assessment and Development of Mitigation Strategies in the Holy Sites for Sustainable Development

Fatma Anwar Siraj Akbar - Department of Business Administration, Management Information Systems, King Abdulaziz University
*Corresponding author: E-mail (Fatmaakbar86@gmail.com)

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم البصمة الكربونية الناتجة عن الأنشطة المختلفة في المشاعر المقدسة بالمملكة العربية السعودية، بالإضافة الى تطوير استراتيجيات فعالة لتقليل الانبعاثات الكربونية بما يتوافق مع رؤية السعودية 2030، وأهداف التنمية المستدامة، والتزامات المملكة بتحقيق الحياد الكربوني بحلول عام 2060. وقد استخدمت الدراسة المنهج الوصفي التحليلي وذلك من خلال تحليل شامل للبيانات الثانوية الرسمية المنشورة من الجهات الحكومية. فقد أظهرت النتائج أن إجمالي البصمة الكربونية السنوية يبلغ 3.4 مليون طن من مكافئ ثاني أكسيد الكربون (CO2)، حيث يساهم قطاع النقل بنسبة 48%، والإسكان والإقامة 28%، والخدمات والمرافق 15%، وإدارة النفايات 9%. وتستخدم أكثر من 18,000 حافلة و27,000 مركبة خاصة، مع ذروة استهلاك كهربائي تبلغ 240 ميجاوات، واستهلاك مائي يصل الى 600,000 متر مكعب يومياً .

وقد طورت الدراسة إطاراً استراتيجياً متكاملاً يشمل ستة محاور رئيسية: التحول الى استخدام النقل الكهربائي والهيدروجيني، وتطبيق معايير المباني الخضراء، ونشر 100 ميجاوات من الطاقة الشمسية، وتعزيز الاقتصاد الدائري، وتطوير منصات رقمية للتوعية، وإنشاء سوق كربوني. وتشير النماذج التنبؤية إلى إمكانية خفض الانبعاثات بنسبة تتراوح بين 35و45% بحلول عام 2030. كما توصي الدراسة بإنشاء نظام مراقبة متكامل للانبعاثات، وتطوير مؤشرات أداء بيئية شاملة، وإنشاء هيكل حوكمة مخصص للاستدامة، مما يوفر خارطة طريق قائمة على الأدلة لتحقيق الحياد الكربوني في السياحة الدينية.

الكلمات الدالة: البصمة الكربونية، الاستدامة البيئية، المشاعر المقدسة، الحج والعمرة، الرؤية 2030.

Abstract

This study aims to assess the carbon footprint resulting from various activities in the holy sites in Saudi Arabia, as well as to develop effective strategies to reduce carbon emissions in line with Saudi Vision 2030, the Sustainable Development Goals, and the Kingdom›s commitment to achieving carbon neutrality by 2060. The study used a descriptive-analytical approach through a comprehensive analysis of official secondary data published by government agencies. The results showed that the total annual carbon footprint amounts to 3.4 million tons of CO2 equivalent, with the transportation sector contributing 48%, housing and accommodation 28%, services and facilities 15%, and waste management 9%. More than 18,000 buses and 27,000 private vehicles are in use, with peak electricity consumption reaching 240 megawatts and water consumption reaching 600,000 cubic meters per day.

The study developed an integrated strategic framework encompassing six pillars: transitioning to electric and hydrogen transportation, implementing green building standards, deploying 100 megawatts of solar energy, implementing the circular economy, developing digital platforms for awareness, and establishing a carbon market. Predictive models indicate the potential for reducing emissions by 35-45% by 2030. The study also recommends establishing an integrated emissions monitoring system, developing comprehensive environmental performance indicators, and establishing a dedicated sustainability governance structure, providing an evidence-based roadmap for achieving carbon neutrality in religious tourism.

Keywords: Carbon footprint, Environmental sustainability, holy sites, Hajj and Umrah, Saudi Vision 2030.

1. المقدمة

تحتل المملكة العربية السعودية مكانة فريدة في قلوب المسلمين حول العالم، إذ تستقر العاصمة الإسلامية في الأراضي المقدسة بمكة المكرمة والمشاعر المقدسة. وتُعد هذه الأرض الموحدة هي وجهةً لملايين الحجاج والمعتمرين الذين يأتون لأداء فريضة الحج في منى وعرفات ومزدلفة. ولا يُعبر أداء فريضة الحج في الأراضي المقدسة عن مكانة دينيّة فحسب، بل يحمل ايضاً ابعاداً سياسية وثقافية، حيث يعكس مدى التأثير والتواصل بين المملكة والشعوب الإسلامية المختلفة التي تحضر لهذه المناسبات الدينية (بالبيد والضحوي، 2024).

وتعد المملكة قائدةً للعالم الإسلامي من خلال خدمتها لضيوف الرحمن، وحرصها على جعل رحلتهم إلى الأراضي المقدسة آمنة ومريحة، وذلك عبر تطوير بنية تحتية متميزة تتماشى مع مكانتها الريادية. وفي هذا السياق، يتمثل دور المملكة في الحفاظ في إزالة اي معوقات قد تواجه الزوار، وضمان سلامة رحلات الحج والعمرة. كما تلعب الأماكن المقدسة دوراً هاماً في اقتصاد المملكة، إذ تُسهم مناسبات الحج والعمرة بشكل كبير في الناتج المحلي الإجمالي، نظراً لأهميتها الدينية والروحية (الفايدي، 2021). وقد أثبتت الدراسات أن السياحة الدينية تُعد من أهم الركائز الداعمة لرؤية السعودية 2030، التي تهدف إلى تعزيز الاستدامة من خلال تنويع مصادر الدخل. وتشير الاستثمارات الضخمة في تطوير البنية التحتية وتكنولوجيا إدارة الحشود الى التزام المملكة الواعي بمكانة هذه المنطقة كنموذج متميز في جودة الخدمات الأداء والاهتمام بالبيئة. ومع ذلك، تمثل مواسم الحج والعمرة تحديًا بيئيًا كبيراً ، حيث ينتج عنها كميات ضخمة من النفايات الصلبة التي يصعب التخلص منها. كما أن الاعتماد الكبير على السيارات يؤدي الى استهلاك مفرط للطاقة وانبعاث كميات كبيرة من ثاني أكسيد الكربون، مما يُلحق ضرراً بالبيئة بشكل عام (السدحان والمسند، 2017)

وتتبنى المملكة العربية السعودية طموحات كبير لتلافي مخاطر تغير المناخ، بما يتوافق مع رؤية السعودية 2030 وأهداف التنمية المستدامة. ومن أبرز المبادرات في هذا المجال، مبادرة "السعودية الخضراء" ، التي تهدف إلى تقليل انبعاثات الكربون بنسبة 50% بحلول عام 2030، والوصول إلى الحياد الكربوني بحلول عام 2060. وتتضمن هذه المبادرة مشروعات ضخمة، مثل زراعة أكثر من 10 مليارات شجرة، وتطوير مشروع للطاقة المتجددة بقدرة تصل الى 50 جيجاوات (أمان،2023). كما تلعب المملكة دورًا رئيسيًا في مجال مكافحة التغيرات البيئية على مستوى العالمي، بدءاً من التزاماتها باتفاقية باريس لعام 2015، مروراً بمشاركتها الفعالة في مبادرات إقليمية مثل «مبادرة الشرق الاوسط الأخضر»، التي تهدف إلى تقليل انبعاثات الكربون الناتجة عن إنتاج النفط في المنطقة بنسبة 60%. ورغم التحديات التي تواجه المملكة في التوفيق بين تنمية قطاع الطاقة التقليدية والتحول نحو الاقتصاد الأخضر، فإنها تعمل على تطوير حلول مبتكره مثل تقنيات احتجاز الكربون وتخزينه (Carbon Capture and Storage - CCS)لتحقيق هذه الأهداف الطموحة (الضناوي،2024)

لذا، تسعى هذه الدراسة الى تحقيق مجموعة من الأهداف الرئيسة التي تتمحور حول تقييم تأثير الأنشطة في الأماكن المقدسة على البيئة. وتبرز الحاجة الى تحليل مصادر الانبعاثات الكربونية، مثل تلك الناتجة عن وسائل النقل أو الإسكان وتحديد القطاعات الاكثر مساهمة فيها، الى جانب دراسة التأثيرات السلبية المحتملة على البيئة، ووضع خطة للتخفيف منها او التخلص منها. كما تهدف الدراسة إلى اقتراح حلول علمية قابلة للتطبيق، تتماشى مع رؤية السعودية 2030 وأهداف التنمية المستدامة، بما في ذلك التحول نحو الطاقة المتجددة، واعتماد تقنيات النقل الصديقة للبيئة، وتعزيز الوعي البيئي لدى الزوار.

2- الإطار النظري والدراسات السابقة

2-1 مفهوم البصمة الكربونية وأهميتها والحياد الكربوني

تُعد انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن نشاطاتنا المتنوعة واحدة من العوامل الرئيسية المسببة لظاهرة الاحتباس الحراري، والتي ترتبط ارتباطاً مباشراً بتدهور البيئة في مختلف دول العالم. ومن هنا تنبع أهمية قياس معدلات انبعاث هذا الغاز، إذ يُستدل منها على مدى مساهمتنا السلبية في زيادة الاعباء البيئية (البلتاجي، 2023).

وظهر مفهوم « البصمة الكربونية» كمؤشر يتم من خلاله التعبير عن كمية انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن حرق الوقود الأحفوري المستخدم في إنتاج الطاقة الكهربائية، ووسائل النقل المختلفة، والنشاطات الصناعية. ويمكن وصف البصمة الكربونية بأنها كمية ثاني أكسيد الكربون التي يطلقها فرد أو منظمة أو مجتمع معين في الغلاف الجوي نتيجة لأنشطتهم اليومية. وتُستخدم هذه البصمة على عدة مستويات، سواء على مستوى الأفراد أو المؤسسات أو الدول، أو حتى على مستوى عملية إنتاج أو نشاط معين. وغالبا ما يُعبر عنها بوحدة « طن من انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون سنوياً . ومن خلال قياس البصمة الكربونية، يمكن تحديد الانبعاثات المباشرة الناتجة عن حرق الوقود الأحفوري، والتي تشمل استهلاك الطاقة الكهربائية واستخدام وسائل النقل المختلفة (مثل السيارات والطائرات والقطارات)، ويُعد هذا المؤشر أداة فعالة للتحكم في كمية الانبعاثات، واتخاذ خطوات عملية نحو تقليلها (أحمد، 2025).

وقد أشارت دراسة ليباج (2023) إلى ضرورة الحد من البصمة الكربونية من خلال وجود أدوات اقتصادية فاعلة تحول دون زيادة انبعاثات غازات الاحتباس الحراري والوقود الأحفوري، وتفتح في نفس الوقت المجال لفرص اقتصادية مستدامة تعتمد على الطاقة المتجددة والاقتصاد الدائري والتوعية المجتمعية.

وفيما يتعلق بالحياد الكربوني، وضعت الوكالة الدولية للطاقة الذرية خطة عمل عالمية تهدف الى للوصول إلى الحياد الكربوني بحلول عام 2050، وذلك من خلال استخدام تقنيات متعددة صديقة للبيئة، مثل الطاقة المتجددة، ووقود الهيدروجين، وتقنيات احتجاز الكربون وتسييله وتخزينه، والتي أصبحت متاحة في محطات توليد الطاقة الكهربائية الحديثة. وقد أكدت الوكالة على ضرورة خفض الانبعاثات من قطاعات الطاقة، والصناعة، والنقل، والإسكان، بما يعادل من 25 إلى 27جيجا طن من غازات الاحتباس الحراري، لسد فجوات الانبعاثات وتحقيق أهداف الحياد الكربوني بحلول عام 2050. كما وضعت الوكالة خارطة لتحقيق هذا الهدف، تتضمن عدة خطوات رئيسية، منها

- منع الاكتشافات الجديدة للوقود الأحفوري، بهدف خفض انبعاثات غاز الميثان بنسبة 75% بحلول عام 2030.

- مضاعفة الاستثمارات في الطاقة النظيفة لتصل إلى ثلاثة أضعاف الوضع الحالي بحلول عام 2030.

- تحسين كفاءة الطاقة بنسبة 4٪سنوياً .

- وقف كامل لاستخدام السيارات التقليدية بحلول عام 2035، وتشجيع استخدام السيارات الكهربائية (سلامة ،2023)

وقد أكدت دراسة أبو شهبة وآخرون (2024) ضرورة إزالة الكربون من خلال وضع استراتيجيات لتحقيق الحياد الكربوني بحلول العام 2025، أهم هذه الاستراتيجيات وضع خارطة طريق لإزالة الكربون عن طريق التحول طاقة مستدامة منخفضة الكربون تعمل على الحد من انبعاثات الغازات الدفيئة.

2-2 الاستدامة البيئة في السياحة الدينية

تكتسب السياحة الدينية في المشاعر المقدسة بُعدً ا بيئياً بالغ الأهمية، نظراً للتدفق البشري الكثيف الذي تشهده هذه المواقع سنويا. وتواجه هذه المناطق تحديات بيئة غير مسبوقة، تتمثل في الاستهلاك المفرط للموارد الطبيعية، وارتفاع معدلات التلوث، مما يستدعي تبني استراتيجيات مستدامة توازن بين متطلبات الزوار والحفاظ على البيئة. وتشمل هذه الاستراتيجيات تطبيق معايير المباني الخضراء في مرافق الإيواء، واعتماد أنظمة النقل المستدامة، وترشيد استهلاك الطاقة والمياه. كما تبرز أهمية التخطيط الحضري الذكي، الذي يأخذ في الاعتبار القدرة الاستيعابية للمواقع المقدسة، مع الحفاظ على ثرائها الروحي والثقافي (إبراهيم وجربوع، 2022).

من ناحية أخرى، تُعد إدارة النفايات أحد أهم ركائز الاستدامة البيئة في السياحة الدينية، حيث ينتج عن مواسم الحج والعمرة كميات هائلة من النفايات، مما يتطلب حلولاً مبتكره. وتعمل المملكة العربية السعودية على تطوير منظومة متكاملة تشمل فرز النفايات من المصدر، وأعاده التدوير، والتحويل إلى طاقة، بما يتوافق مع مبادئ الاقتصاد الدائري. كما تلعب الحملات التوعوية دوراً محورياً في تغيير سلوكيات الزوار، وتشجيعهم على تبني ممارسات صديقة للبيئة. وتجدر الإشارة إلى أن تحقيق الاستدامة في هذه المواقع لا يقتصر على الجانب البيئي فحسب، بل يمتد ليشمل الأبعاد الاقتصادية والاجتماعية، بما يضمن استمرارية هذه المنظومة للأجيال القادمة(الطحطوح،2020)

3-2 رؤية السعودية 2030 وأهداف التنمية المستدامة

تُعد رؤية السعودية 2030 خطة شاملة للتحول الاقتصادي، تهدف إلى تنويع الاقتصاد الوطني وتعزيز استدامته. وترتكز على ثلاثة أهداف رئيسية: مجتمع حيوي، واقتصاد مزدهر، ووطن طموح. وفي الجانب البيئي، تتبنى الرؤية أهدافاً طموحة لتعزيز الاستدامة، من أبرزها خفض الانبعاثات الكربونية بنسبة 50% بحلول عام 2030، والوصول إلى الحياد الكربوني بحلول 2060. وتتوافق هذه الأهداف بشكل وثيق مع أهداف التنمية المستدامة للأمم المتحدة، لاسيما:

- الهدف السابع: طاقة نظيفة وبأسعار معقولة

- الهدف الثالث عشر: العامل المناخي

وتشمل الرؤية مبادرات كبرى مثل «السعودية الخضراء «، التي تهدف إلى زراعة10 مليارات شجرة، وحماية المناطق الطبيعية، وتعزيز الاعتماد على الطاقة المتجددة (العنزي،2018). وتضع رؤية السعودية 2030 خططاً شاملة لتطوير السياحة الدينية في المملكة، تهدف الى تحسين تجربة الحجاج والمعتمرين بطريقة تحافظ على البيئة، وتتبنى تقنيات ذكيه لإدارة الموارد وتعزيز كفاءة الطاقة في المرافق الدينية. كما تعمل على تطوير منظومة النقل المستدام في المشاعر المقدسة، بما في ذلك التوسع في استخدام الحافلات الكهربائية، وتطوير شبكات مترو الأنفاق. وتُسهم هذه الجهود في تحقيق التوازن بين تلبية احتياجات الزوار والحفاظ على الموارد الطبيعية ، مع تعزيز مكانة المملكة كوجهه عالمية للسياحة الدينية المستدامة (الخريجي، 2022)

كما تسعى الرؤية إلى تحفيز القطاع الخاص للاستثمار في المشاريع الخضراء والابتكارات البيئة، من خلال توفير حوافز ضريبية وتشريعات داعمة. وتُعزز الرؤية من دور الشركات الدولية في مجال التقنيات النظيفة ونقل المعرفة، مما يُسهم في تحقيق انتقال سلس نحو الاقتصاد الأخضر. وتجدر الإشارة إلى أن هذه الرؤية لا تقتصر على الجانب البيئي فحسب، بل تشمل أيضاً أبعاداً اجتماعية وثقافية تهدف إلى رفع جودة الحياة وتعزيز الهوية الوطنية، مما يجعلها نموذجاً متكاملاً للتنمية المستدامة (العنزي ،2018).

4-2 التزامات المملكة بالحياد الكربوني 2060

تتبنى المملكة العربية السعودية استراتيجية طموحة لتحقيق الحياد الكربوني بحلول عام 2060، تماشياً مع التوجهات العالمية لمكافحة التغير المناخي. وتستند هذه الاستراتيجية على أربعة ركائز رئيسية: تطوير حلول احتجاز الكربون وتخزينه (CCS)، والتحول نحو الطاقة المتجددة، وزيادة كفاءة الطاقة، وحماية النظم البيئية. وقد أطلقت المملكة مبادرة «السعودية الخضراء» كإطار عمل لتنفيذ هذه الاستراتيجية، والتي تشمل مشاريع كبرى مثل تطوير أكبر مجمع للطاقة المتجددة في الشرق الأوسط بقدرة 50 جيجاوات. كما تعمل المملكة على إنشاء مركز إقليمي لاحتجاز الكربون واستخدامه وتخزينه، بهدف خفض الانبعاثات في القطاعات الصناعية الصعبة (العنيني، 2025)

3- منهجية الدراسة

1-3 منهج الدراسة

اعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي كنهجٍ محوري في تحليل ببيانات البصمة الكربونية، حيث يركز هذا المنهج على فحص الواقع المرصًود في المنطقة المستهدفة، بهدف فهم الانماط الكامنة وراء الانبعاثات. ويجمع هذ البحث بين البيانات الكمية والنوعية، ما يُسهم في تقديم تفاصيل دقيقة تربط بين جوانب متعددة، للحصول على فهم شامل ومتكامل للظاهرة المدروسة.

2-3 مصادر البيانات

لقد تم جمع البيانات الثانوية من تقارير رسمية وسجلات بيئية ودراسات بحثية تغطي الفترة من

عام ٢٠١٨الى ٢٠٢٣، مثل تقارير الهيئة العامة والأرصاد وحماية البيئة، ومعلومات حول البصمة الكربونية الصادرة عن وزارة الحج والعمرة، بالإضافة الى مراجعة الأبحاث المنشورة في المجلات العلمية وقواعد البيانات العالمية.

4- تقييم البصمة الكربونية الحالية

تُقدر إجمالي البصمة الكربونية السنوية في المشاعر المقدسة بحوالي 3.4 مليون طن من مكافئ ثاني أكسيد الكربون (CO_2e)، وهو رقم يُظهر بوضوح التأثير الكبير الذي تتركه الأنشطة البشرية في هذه المنطقة على البيئة. ويعود هذ الرقم الى عدة عوامل، أبرزها الكثافة السكانية العالية خلال موسم الحج والعمرة، والاستهلاك المرتفع للطاقة في مرافق الإيواء والخدمات المختلفة. وتجدر الإشارة إلى أن هذه النسبة تشهد تزايداً ملحوظاً بنسبة 2.5% سنوياً ، نتيجة للزيادة المستمرة في أعداد الحجاج والمعتمرين (Fallatah & Imam, 2023)

جدول (1): توزيع الانبعاثات الكربونية حسب القطاعات الرئيسية

القطاع	نسبة المساهمة (%)*	كمية الانبعاثات (CO_2e) ألف طن
النقل	٤٨٪	١,٦٣٢
الإسكان	٢٨٪	٩٥٢
الخدمات	١٥٪	٥١٠
إدارة النفايات	٩٪	٣٠٦

*المصدر: تحليل بيانات وزارة الحج والعمرة(2023)

ويظهر الجدول (1) قطاع النقل يُساهم بنحو 48% من إجمالي الانبعاثات الكربونية، مما يشير إلى وجود فرصة كبيرة لتحسين الأداء البيئي من خلال التحول إلى وسائل النقل الكهربائية والهيدروجينية. ويبرز قطاع النقل كأكبر مساهم في هذه المشكلة، ويعود ذلك أساساً إلى الاعتماد الكثيف على وسائل النقل التقليدية التي تعمل بالوقود الأحفوري، حيث تُستخدم أكثر من 18,000 حافلة و27,000 مركبة خاصة لخدمة الزوار. وتُظهر هذه الأرقام حاجة ملحة لإعادة هيكلة منظومة النقل في المنطقة، والتحول نحو حلول أكثر استدامة. أما قطاع الإسكان، فيأتي في المرتبة الثانية بنسبة 28%، نتيجة للاستهلاك المرتفع للطاقة في أماكن الإقامة والفنادق (GCA, 2022)

5-تحليل الاستهلاك والموارد

5-1 استخدام وسائل النقل

يُعد قطاع النقل جزءاً أساسياً في منظومة الحج والعمرة، حيث يتم تنظيم نقل ملايين الحجاج بين المشاعر المقدسة بطريقة دقيقة ومنسقة، مما يتطلب إدارة فعالة لأسطول كبير من المركبات. وفي موسم حج 2023، استفاد عدد كبير من الحجاج من خدمات «قطار المشاعر المقدسة» الذي نفذ 2208 رحلة، وهذا ما يُشير إلى تحسن كبير في البنية التحتية لخدمات النقل الجماعي، من حيث الأسطول والتوزيع (Almasri, 2023)

- الأسطول والتوزيع

كما هو موضح في الجدول (2)، تم استخدام حوالي 21 ألف حافلة لنقل الحجاج بين الأماكن المقدسة، وهو عدد ضخم يُظهر حجم الجهد اللوجستي المطلوب، حيث لم تقتصر وسائل النقل على الحافلات التقليدية فقط، بل شملت أيضًا الحافلات المكوكية، بالإضافة الى بعض المركبات الخاصة التي استخدمها الزوار لتجنب الزحام. وقد بذلت وزارة الحج والعمرة جهداً هائلاً في تنظيم هذه المنظومة، حيث نجحت في تنفيذ محاكاة لتجميع وتشغيل 3,000 حافلة مكوكية وتقليدية في وقت واحد خلال موسم الحج لعام 2023، مما يعد إنجازاً كبيراً في إدارة الحشود والنقل الجماعي ((Arab new, 2025.

جدول (2): توزيع وسائل النقل في المشاعر المقدسة (2023)

نوع المركبة	العدد	السعة الإجمالية	معدل الاستهلاك (لتر/١٠٠كم)	الانبعاثات (كجمCO_2 / كم)*
حافلات كبيرة	١٥,٠٠٠	٧٥٠,٠٠٠ راكب	٣٥-٤٠	٢,٦
حافلات متوسطة	٦,٠٠٠	١٨٠,٠٠٠ راكب	٢٥-٣٠	١,٨
مركبات خاصة	٢٧,٠٠٠	١٠٨,٠٠٠ راكب	١٢-١٥	٠,٢٥
قطار المشاعر	١٧ قطار	٧٢,٠٠٠ راكب/ساعة	كهربائي	٠,٠٥

* الانبعاثات (كجمCO_2 / كم) = (عامل الانبعاث * كمية الوقود المستهلكة) / المسافة المقطوعة

*المصدر: تحليل بيانات وزارة الحج والعمرة(2023)

- معدلات الاستهلاك والانبعاثات

يشمل النموذج المطوّ ر نقل الحجاج من المسجد الحرام إلى منى (حوالي 7 كم) في اليوم الأول، ومن منى والمسجد الحرام إلى عرفات (20 كم) في اليوم الثاني، ومن عرفات إلى مزدلفة (7 كم) في نفس اليوم. وتُعد هذه المسافات من العوامل التي تتطلب استهلاكاً مكثفاً للوقود، خاصة في ظل الازدحام المروري وظروف التشغيل الصعبة.

ويُقدر إجمالي استهلاك الوقود خلال موسم الحج بحوالي 45 مليون لتر، مما ينتج عنه انبعاثات تُقدر بـ 120,000 طن من ثاني أكسيد الكربون. وتختلف معدلات الاستهلاك حسب نوع المركبة وظروف التشغيل، حيث تزداد بشكل ملحوظ في أوقات الذروة والازدحام. (Arab new, 2025)

5-2 الاستهلاك الكهربائي

تواجه مكة المكرمة والمشاعر المقدسة تحديات كبيرة في استهلاك الكهرباء، فقد سجلت أعلى حمل كهربائي على الإطلاق خلال موسم الحج لعام 2024، إذ بلغ (5361 ميجاوات)، كما هو موضح في الجدول (3)، بزيادة قدرها 20% مقارنة بالعام السابق الذي سجل (4451

ميجاوات)، تليها عرفات ب 1200 ميجاوات يوم عرفة، ثم منى ب 980 ميجاوات يوم النحر، وأخيراً مزدلفة ب 450 ميجاوات ليلة المبيت، مع معدلات نمو سنوية تتراوح بين 12% و 25%، مما يُبرز الضغط الكبير على البنية التحتية للطاقة خلال هذه الفترة (Almasri, 2023؛ Arqam, 2025).

جدول (3): ذروة الاستهلاك الكهربائي حسب الموقع والزمن (2023-2024)

الموقع	ذروة الاستهلاك (ميجاوات)	التوقيت	معدل النمو السنوي
مكة المكرمة	٥,٣٦١	آخر أيام الحج	٢٠٪
منى	٩٨٠	يوم النحر	١٥%
عرفات	١,٢٠٠	يوم عرفة	٢٥%
مزدلفة	٤٥٠	ليلة المبيت	١٢٪

*المصدر: (Arqam, 2025)

- أنظمة الاستهلاك الرئيسية

يتميز المسجد الحرام بنظام صوتي ضخم يضم أكثر من 8,000 مكبر صوت، يُستخدم لتغطية جميع أرجاء المسجد وضمان وضوح الصوت في مختلف المناطق، كما توجد 4,323 مروحة تهوية تعمل على تدفئة وتبريد وتنقية الهواء، مما يُسهم في توفير مناخ داخلي مريح للزوار.

كما يحتوي المسجد على 519 سلمًا متحركًا يسهل الوصول بين الأدوار المختلفة، ويعزز من انسيابية الحركة داخل المبنى. ولتعزيز التواصل والوصول الى المعلومات، تم تركيب 100 شاشة تفاعلية تعمل ب 16 لغة، لتلبية احتياجات الزوار من مختلف الثقافات والجنسيات

جدول (4): توزيع استهلاك الطاقة حسب القطاع

القطاع	الاستهلاك (ميجاوات)	النسبة المئوية	إمكانية التوفير	الأسس
التكييف والتبريد	٣,٧٥٠	٧٠٪	٢٥-٣٠٪	تحسين العزل الحراري، أنظمة التبريد الشمسي
الإنارة	٦٤٠	١٢٪	٤٠-٥٠%	أنظمة LED، استبدال بمصابيح الإضاءة الذكية
المصاعد والسلالم المتحركة	٣٢٠	٦٪	١٥-٢٠٪	محركات ذكية، تقنيات خمول منخفض الطاقة
أنظمة الصوت والمراقبة	٢٧٠	٥٪	١٠-١٥%	تحديث الأنظمة، إدارة ذكية لتشغيل الاجهزة
أخرى	٣٨١	٧٪	٢٠-٢٥%	أنظمة إدارة الطاقة، تحسين كفاءة الأجهزة

*المصدر تقارير الهيئة العامة للكهرباء والمياه:(2023) ؛ Almasri et al., 2023

ويوضح الجدول (4) نسب إمكانيات التوفير بناءً على تقنيات كفاءة الطاقة المتقدمة، والدراسات السابقة في قطاعات مشابهة، وتجارب محلية ودولية. فعلى سبيل المثال، يُمكن أن يؤدي استبدال أنظمة التكييف القديمة بأخرى عالية الكفاءة الى تقليل الاستهلاك بنسبة 25 الى 30%.

كما أن تطبيق تقنيات الإضاءة الذكية يمكن أن يُحقق وفورات تصل إلى 50%.». ويظهر التحول نحو مصادر الطاقة المتجددة، الى جانب تطبيق تقنيات كفاءة الطاقة، إمكانية تحقيق وفورات تصل إلى 25% من الاستهلاك الحالي، مما يُسهم بشكل كبير في تقليل البصمة الكربونية في المشاعر المقدسة

6- الإطار الاستراتيجي المتكامل للتخفيف

6-1 التحول للنقل الكهربائي والهيدروجيني

تُعد جهود المملكة العربية السعودية في مجال النقل النظيف بالمشاعر المقدسة خطوة رائدة، بدأت بإطلاق أول حافلة كهربائية في فبراير 2023، وأول حافلة هيدروجينية في ديسمبر 2024.

وتعمل المملكة على إنتاج الهيدروجين الاخضر لاستخدامه في وسائل النقل بحلول منتصف عام 2024 ، الى جانب إنشاء مصنع لإنتاج الحافلات في جدة بطاقة إنتاجية تبلغ 3000 حافلة سنوياً .

كما تخطط المملكة لاستثمار 8.4 مليار دولار في إنشاء أكبر منشأة لإنتاج الهيدروجين الاخضر الأكبر في العالم.

جدول (5): خطة التحول التدريجي للنقل النظيف في المشاعر المقدسة

المرحلة	الفترة الزمنية	الإجراءات
المرحلة الأولى	٢٠٢٦-٢٠٢٨	- إدخال ٥٠٠ حافلة كهربائية - تجربة ٥٠ حافلة هيدروجينية - إنشاء ٢٥محطة شحن سريع
المرحلة الثانية	٢٠٢٨-٢٠٢٩	- رفع العدد إلى ٢,٠٠٠ حافلة كهربائية - 200حافلة هيدروجينية - 100محطة شحن
المرحلة الثالثة	٢٠٢٩-٢٠٣٠	- تحويل ٥٠٪ من الأسطول - إنشاء شبكة متكاملة للهيدروجين - 300محطة شحن

*من اعداد الباحثة

يُظهر الجدول (5) ادناه ، الخطط لفترة التحول نحو وسائل نقل صديقة للبيئة أثناء مناسبات الحج في المدن المقدسة، بهدف التخلص من التلوث بالهواء، حيث تتكون هذه الخطة من ثلاث مراحل زمنية تمتد من عام 2026 الى 2030، وتهدف الى إدخال وسائل نقل نظيفة (كهربائية

وهيدروجينية) في المشاعر المقدسة. وتشمل الإجراءات التنفيذية الرئيسية

1. تطوير البنية التحتية من خلال إنشاء محطات الشحن الكهرباء السريع ومحطات تزويد الهيدروجين في المواقع الاستراتيجية

2. الشراكات الاستراتيجية، بالتعاون مع شركات مثل Hyundai وACWA Power وAir Products لتوفير التقنيات المتقدمة

3. برامج التدريب لتأهيل 5000 سائق وفني صيانة على التقنيات الجديدة

4. التكامل الرقمي من خلال تطوير منصة الذكية لإدارة الاساطيل وتحسين كفاءة التشغيل

- تطبيق معايير المباني الخضراء

تشهد المملكة العربية السعودية حركة متسارعة نحو تبني المباني الخضراء، حيث تصدّرت الدول العربية من حيث عدد المباني الحاصلة على شهادات LEED الذهبية والبلاتينية. وتُعد المملكة صاحبة أعلى تركيز من المباني المعتمدة بهذه الشهادات في منطقة الشرق الأوسط، مما يعكس التزامها القوي بالاستدامة في قطاع البناء، وذلك منذ أكتوبر 2019 (وزان،2020).

وفي إطار هذا التوجه، أطلقت المملكة نظام «مستدام» كأول نظام وطني لتقييم المباني الخضراء، وقد تم تطويره من قبل وزارة الشؤون البلدية والقروية والإسكان، ليكون ملائماً للمناخ والخصائص البيئة للمملكة. ويتضمن نظام «مستدام» ثلاثة أنظمة تقييم مفصلة حسب نوع الأصل العقاري كالمباني السكنية والمجمعات والمباني التجارية) .(SGBF, 2025

2-6 تطبيق معايير المباني الخضراء في المشاعر المقدسة

- المسجد الحرام والتوسعات الحديثة

يُعد مشروع توسعة المسجد الحرام فرصة ممتازة لتطبيق مبادئ الاستدامة البيئية على نطاق واسع، نظراً لحجم المشروع واهميته الدينية والثقافية، حيث تتيح هذه التوسعة إمكانية تحسين التصميم والبناء بما يتماشى مع المعايير البيئية الحديثة، ويُسهم في تعزيز كفاءة التشغيل وتقليل الأثر البيئي. وتشمل التحسينات المستدامة المطبقة في المشروع:

1. أنظمة التظليل المتحركة من خلال استخدام المظلات القابلة للحركة والطي حلًا . فهي تحمي الحجاج من أشعة الشمس الحارة العنيفة

2. الطاقة الشمسية المدمجة من خلال استخدام مظلات تحتوي على ألواح شمسية رقيقة لتوليد الكهرباء بشكل فعال ومستدام

3. أنظمة الاستدامة الحديثة، بدمج الألواح الشمسية وأنظمة إعادة تدوير المياه ومواد البناء الخضراء في مشاريع البناء الجديدة لتقليل التأثير البيئي (Yu, 2025).

3-6 خطوات تحقيق معايير المباني الخضراء

لتحقيق معايير البناء المستدام ومعايير المباني الخضراء في المشاعر المقدسة، لا بد من تنفيذ ثلاث مراحل رئيسية تشمل مرحلة التجريب والتقييم والتوسع التدريجي والتطبيق الشامل. ويوضح الشكل (1) أدناه، اليات تطبيق معايير البناء المستدام على عدد من المباني في المشاعر المقدسة، بالتزامن مع تأهيل وتدريب المهندسين والمقاولين وإنشاء مختبر للمواد المستدامة في المرحلة الأولى. في حين يتم تطبيق هذه المعايير على جميع المباني في المرحلة الثانية، وإلزامية التطبيق لهذه المعايير في المرحلة الثالثة.



شكل (1) مراحل تطبيق معايير البناء المستدام (WGBC, 2025).

إن التحول نحو المباني الخضراء يمثل خطوة حاسمة نحو تحقيق أهداف الاستدامة، مع الحفاظ على القيمة الروحية والتاريخية لهذه الأماكن

7- نشر الطاقة الشمسية

يُعد تطبيق الطاقة الشمسية على نطاق واسع في المملكة العربية السعودية خطوة إيجابية نحو تعزيز الاستدامة البيئية، خاصة في المشاعر المقدسة. وتوجد مشاريع رائدة في هذا السياق، مثل مشروع «الشعيبة 2» ومشروع «جدة للطاقة الشمسية»، والتي تُسهم بشكل مباشر في تقليل الاعتماد على الوقود الاحفوري وخفض البصمة الكربونية. فعلى سبيل المثال، يُعد مشروع «الشعيبة 2»، الواقع في منطقة مكة المكرمة ، من المشاريع الحيوية التي تزود المشاعر المقدسة بالطاقة النظيفة ، مما يُسهم في دعم جهود المملكة لتحقيق أهدافها البيئية (القاسم وآخرون ، 2018).

7-2 الوضع الحالي والإمكانيات المتاحة

تتمتع المملكة العربية السعودية بواحدة من أعلى معدلات الإشعاع الشمسي المباشر العادي على مستوى العالم، حيث تحتل المرتبة الرابعة عالمياً ، بمتوسط يبلغ حوالي 2200كيلووات ساعة/متر مربع/سنة. وتُعد منطقة مكة المكرمة من أكثر المناطق استقبالاً لأشعة الشمس، إذ يتراوح معدل الإشعاع اليومي فيها بين 5.5 الى 6.5 كيلووات ساعة/متر مربع/يوم، مما يجعلها موقعاً مثالياً لمشاريع الطاقة الشمسية. وفي عام 2023، أعلنت المملكة عن خطط لتركيب 20 جيجاوات من الطاقة الشمسية بحلول عام 2030، باستثمارات تُقدر بـ 16 مليار دولار.

وقد شهد قطاع الطاقة الشمسية نمواً ملحوظاً ، حيث تم توصيل أكثر من 2.1جيجاوات من مشاريع الطاقة الشمسية بالشبكة الكهربائية بنهاية عام 2023.

1-2-7 الإطار التنظيمي والمبادرات الحكومية

أطلقت المملكة العربية السعودية البرنامج الوطني للطاقة المتجددة كجزء من رؤية السعودية 2030، ويهدف البرنامج إلى تحقيق مزيج طاقة مثالي، بحيث تُشكل الطاقة المتجددة 50% من اجمالي مزيج الطاقة بحلول عام 2030. ولتنفيذ هذه الأهداف، تم إنشاء «مكتب تطوير مشاريع الطاقة المتجددة» لقيادة وتنفيذ المشاريع الكبرى في هذا المجال. وقد تم تطبيق نظام (مستدام) في مشروع توسعة المسجد الحرام، حيث شملت التوسعة عدة تحسينات مستدامة ، كوجود أنظمة تبريد موفرة للطاقة، وإعادة استخدام المياه الرمادية، وتصميم معماري يُتيح الإضاءة الطبيعية. وتظهر هذه الإجراءات قدرة هذا النظام على التكيف مع الاحتياجات المحلية للمشاعر المقدسة، مع الحفاظ على كفاءة التشغيل وتقليل الأثر البيئي.

1-3-7 خطة نشر 100 ميجاوات في المشاعر المقدسة

إن من احدى طرق تعزيز استخدام الطاقة الشمسية ، يتمثل في توزيع ونشر عدد من مشاريع الطاقة الشمسية في المشاعر المقدسة في مكة المكرمة ومنى ومزدلفة وعرفات. ويحدد الشكل ادناه التوزيع المكاني والوظيفي للميجاوات والخدمات التقنية واللوجستية في المشاعر المقدسة.



شكل (2): توزيع مشاريع الطاقة الشمسية في المشاعر المقدسة

ويظهر الشكل (2) ، توزيع ونشر 100 ميجاوات في المشاعر المقدسة ، حيث تم تخصيص 40 ميجاوات في مكة المكرمة على أسطح المباني ومواقف السيارات . أما في منى، فسيتم توزيع 25 ميجاوات كمظلات شمسية وأسقف المخيمات، في حين سيتم توزيع 20 ميجاوات في عرفات بين محطة أرضية ومظلات، وأخيراً تم تخصيص 15 ميجاوات لمزدلفة تتضمن أنظمة متنقلة وإنارة، وهذا التوزيع يعكس تنوع البنية التحتية والخدمية لكل منطقة بما يتناسب مع احتياجات الحجاج

1-8 الوضع الحالي ومفهوم الاقتصاد الدائري في السعودية

تسعى المملكة العربية السعودية إلى تطبيق نهج الاقتصاد الدائري كأحد المحاور الرئيسية في رؤية السعودية 2030. فقد أطلقت «الاستراتيجية الوطنية للاقتصاد الدائري للكربون (CCE) »، والتي تم اعتمادها من قبل قادة مجموعة العشرين خلال قمة الرياض عام 2020. ويُعرف الاقتصاد الدائري بأنه نظام اقتصادي يهدف إلى القضاء على النفايات وتعزيز الاستخدام المستمر للموارد، من خلال مبادئ التقليل، وإعادة الاستخدام، وإعادة التدوير. وتُعد مواسم الحج والعمرة من أبرز التحديات في هذا المجال، حيث تُنتج كميات هائلة من النفايات. إذ يُنتج كل حاج في المتوسط 1.8 كيلوجرام من النفايات يومياً ، مما يعني توليد أكثر من 100,000 طن من النفايات خلال موسم الحج وحده (Almulhim, & Abubakar, 2012).

1-1-8 الإطار الاستراتيجي للاقتصاد الدائري في المشاعر المقدسة

جدول (6): الإطار الاستراتيجي للاقتصاد الدائري في المشاعر المقدسة

المكون	الوصف	الهدف ٢٠٣٠	المؤشرات الرئيسية
التقليل	تقليل توليد النفايات من المصدر	خفض ٤٠٪	كجم/حاج/يوم
إعادة الاستخدام	إعادة استخدام المواد والمنتجات	٢٥٥ من الموارد	نسبة المواد المعاد استخدامها
إعادة التدوير	تحويل النفايات إلى موارد جديدة	٤٥٪ معدل التدوير	طم/سنة
الاسترداد	تحويل النفايات إلى طاقة	١٥٪ تحويل للطاقة	ميجاوات ساعة

* المصدر (AlmulhiSm, 2024)

يوضح الجدول رقم (6) الإطار الاستراتيجي لتحقيق الاقتصاد الدائري في المشاعر المقدسة بحلول عام 2030. ويركز هذا الجدول على تقليل النفايات من المصدر بنسبة 40%، وتعزيز إعادة استخدام المواد والمنتجات بنسبة 25% كما يهدف إلى زيادة معدل تدوير النفايات بنسبة تصل إلى 45%، بالإضافة إلى تحويل 15% من النفايات إلى طاقة. وتتوافق هذه الأهداف مع رؤية المملكة في تعزيز الاستدامة البيئية وتقليل التأثير البيئي لموسم الحج، من خلال تحسين إدارة الموارد والنفايات. ويُعد التركيز على التحول إلى الاقتصاد الدائري خطوة هامة نحو تقليل الهدر وتعظيم الاستفادة من الموارد المتاحة (Almulhim, 2024).

1-2-8 البرامج والمبادرات الحالية

لقد أطلق المركز الوطني لإدارة النفايات (MWAN) مبادرة لضمان بيئة نظيفة للحجاج طوال فترة الحج، تتضمن آلة تحول نفايات الطعام إلى سماد والتي تستخدم في البداية داخل المواقع المقدسة، دون انبعاثات أو روائح أثناء عملية إعادة التدوير

1- مبادرة (الإحرام المستدام)

تعتبر مبادرة الإحرام أفضل شكل للحفاظ على البيئة، بحيث تعمل على تجميع الملابس والنفايات

النسيجية للأشخاص الذين يؤدون فريضة الحج في مكان ما ثم يعيدون استخدامها، وتقوم المبادرة أيضاً على جمع وفرز النفايات النسيجية للحجاج، بما في ذلك الوسائد والبطانيات والمراتب ثم إعادة تدويرها وتوزيعها

2- برامج التدريب للجهات الخدمية

قدم المركز الوطني لإدارة النفايات خلال هذا الموسم دورات تدريبية في إدارة النفايات المستدامة لـ 121 مقدم خدمة، وذلك خلال الأسبوعيين الماضيين. وتهدف هذه الدورات الى تطوير مهارات المشاركين، وتزويدهم بالأفكار حول كيفية تقلّيل كميات النفايات، واستخدام مواد أكثر صداقة للبيئة، بما يُسهم في تعزيز الاستدامة في المشاعر المقدسة (أحمد، 2025)

1-3-8 تطبيقات الاقتصاد الدائري في المشاعر المقدسة

أ) قطاع النفايات الصلبة

تسعى المملكة العربية السعودية جاهدة لتحسين إدارة نفاياتها ضمن خطة رؤية 2030بهدف تحقيق معدل تحويل من المكبات بنسبة 82% بحلول عام 2035 من خلال تعزيز برامج إعادة التدوير والتسميد للنفايات عضويًا وحرقها واسترجاع الطاقة منها.

ب) قطاع المياه

إن تطبيق مفهوم الاقتصاد الدائري على مورد مثل الماء يمكن أن يساهم في تغييرات إيجابية. يمكننا تحدي النماذج الاقتصادية القديمة من خلال

1. معالجة المياه الرمادية: إعادة استخدام 60% من مياه الوضوء والاستحمام
2. حصاد مياه الأمطار: تجميع 500,000 متر مكعب سنوياً
3. تقنيات ترشيد الاستهلاك: خفض نسبة الاستهلاك بنسبة 30% (البلتاجي، 2023).

ج) قطاع الطاقة

من خلال اعتماد مجموعة متنوعة من الأساليب بما في ذلك إعادة التدوير وإعادة الاستخدام والمعالجة وتحويل النفايات إلى طاقة، تتضمن أهداف SIRC تحويل 82% من جميع النفايات من المكبات بحلول عام 2035. ويحقق تطبيق نموذج الاقتصاد الدائري في هذه الأمكنة المقدسة، تحولا كبيرا في كيفية استغلال الموارد. حيث يتم نقل الثروات التي كانت تشكل تحديات بيئية إلى مصادر اقتصادية جديدة ومستدامة ومحتفظة بالتراث، وأيضا يزيد من تجربة الحجاج والمعتمرين، محولاً التحديات البيئية إلى فرص اقتصادية مستدامة وع الحفاظ على قدسية المكان وتعزيز تجربة الحجاج والمعتمرين (الخزيم، 2023).

1-4-8 مراحل التنفيذ والجدول الزمني

إن عملية تطبيق نموذج الاقتصاد الدائري في قطاع الطاقة في المشاعر المقدسة تتضمن عدد من مراحل تنفيذ المشروع خلال الفترة من 2024 وحتى 2030، ضمن خطة الاقتصاد الدائري لتحقيق الاستدامة في الحج والعمرة، ويوضح الشكل (3) أدناه مراحل تنفيذ تطبيقات الاقتصاد الدائري والمعتمدة على تحويل النفايات إلى طاقة مفيدة واستخدام الطاقة الشمسية بالإضافة إلى الاستفادة من الموارد المتجددة



شكل (3): تطبيق نموذج الاقتصاد الدائري

- تطوير المنصات الرقمية للتوعية البيئية

1-9 الوضع الحالي والتحول الرقمي في المشاعر المقدسة

تشهد المملكة العربية السعودية ثورة رقمية في إدارة الحج والعمرة، حيث أطلقت منصة (نسك) التي تخدم أكثر من 30 مليون مستخدم سنوياً ، وفي الموسم الماضي لوحظ أكثر من 180 مليون عملية تواصل وتفاعل رقمي. أصبحت الحياة أسهل بشكل واضح بعد تواجد تلك المنصات التي قامت بها الحكومة. وساهمت في تحسين تجربة الحجاج والمعتمرين.

هذا التحول الكبير يعكس بوضوح التزام المملكة بالعمل السرع على تحقيق الأهداف المحددة في رؤية 2030. ومن الأهداف الأساسية هو تحسين تجربة الحجاج والمعتمرين، وجعل تجربتهم سهلة ومرضية (العنزي، 2018)

2-9 المبادرات الحالية للتوعية البيئة الرقمية

لقد عمل المركز الوطني للامتثال البيئي على تطوير مبادرات جديدة على الإنترنت تزيد من الوعي بالمحيط البيئي. هذه المبادرات شاملة لغات مختلفة، كما قدم معلومات مكتوبة بالروسية والصينية والفارسية والإسبانية والأردية، ومن الجدير بالذكر توزيعهم على الحجاج مظلات تحتوي على شفرة QR خاصة بذلك، حتى يتمكن الحجاج بكل سهولة من قراءة هذه التعليمات الخاصة وهم في مكة والمدينة وغيرهما خلال موسم الحج.

3-9 الإطار الاستراتيجي لتطوير المنصات الرقمية للتوعية البيئة الاهداف الاستراتيجية

- الأهداف الاستراتيجية

1. الوصول الشامل: ضمان حصول الحجاج والمعتمرين على محتوى تعليمي حول القضايا البيئية بالكامل بحلول عام 2030.

2. التفاعل مستدام: يزيد معدل التفاعل مع المحتوى البيئي إلى حوالي 75% من الأشخاص المهتمين

3. : تغيير السلوك: تغيير السلوك البيئي بطريقة إيجابية ل 60% بالمئة من الأشخاص

4. التكامل رقمي: دمج التوعية البيئية في جميع المنصات الرقمية الحكومية

لقد باتت الاستدامة تجسد أهمية كبرى في نشاطاتنا، وهي تتماشى تمامًا مع التزام السعودية بتغيير البيئة. بحيث نتعامل مع ضرورة تقليل استخدام المواد البلاستيكية التي تستخدم لمرة واحدة، وندعم استخدام المواد الصديقة للبيئة، فنقوم بتطبيق كل وسائل الطاقة المحسنة ونعمل حلول لجعلها توافق بيئتنا. على سبيل المثال، نلجأ بشكل أكبر إلى استخدام الطاقة الشمسية بديلا عن أنواع الطاقة التقليدية في الأماكن المقدسة.، بحيث يتم استخدام الطاقة الشمسية بكميات كبيرة جدً ا في مدينة مكة والمدينة، مما يساهم في تقليل كل التأثيرات البيئية الضارة. إن تطوير المنصات الرقمية للتوعية البيئية يمثل نقلة نوعية في كيفية التواصل مع ملايين الحجاج والمعتمرين، محولاً التحدي البيئي إلى فرصة لبناء مجتمع عالمي واع بيئياً ، يحمل رسالة الاستدامة من الأراضي المقدسة إلى جميع أنحاء العالم (Fallatah & Imam, 2023)

جدول (8) برامج التوعية الرقمية ومؤشرات الأداء

البرنامج	الفئة المستهدفة	المحتوى
الحاج الأخضر	جميع الحجاج	أساسيات الاستدامة
سفراء البيئة	القادة والمؤثرون	تدريب متقدم
الأطفال والبيئة	العائلات	محتوى تفاعلي للأطفال
المتطوع البيئي	المتطوعون	تدريب ميداني

يبرز الجدول رقم (8) برامج التوعية الرقمية ومؤشرات الأداء المستهدفة لتعزيز الوعي البيئي والاستدامة خلال موسم الحج تشمل البرامج «الحاج الأخضر « الذي يستهدف جميع الحجاج لتعليمهم أساسيات الاستدامة، وبرنامج «سفراء البيئة» لتدريب القادة والمؤثرين. كما يركز «الأطفال والبيئة» على تقديم محتوى تفاعلي للأطفال، بينما يدعم «المتطوع البيئي» التدريب الميداني للمتطوعين. هذه المبادرات تظهر التزاماً بتعزيز الوعي البيئي ومشاركة جميع الفئات لتحقيق أهداف الاستدامة (Almulhim, 2024))

10- إنشاء سوق كربوني

لقد أطلقت المملكة العربية السعودية سوق تداول الكربون، وتم طرح أكثر من 2.5 مليون طن من أرصدة الكربون لتداولها في السوق. هذا الخطوة تعكس التزام السعودية بمكافحة التغير المناخي. كما تخطط السعودية الآن لإطلاق سوق وطني إلزامي للكربون خلال السنوات القليلة القادمة. مع استهداف موعد الإطلاق في أواخر عام 2026 أو بداية عام 2027.، خلال أسبوع المناخ لمنطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا في الرياض، أعلنت السعودية عن خططها للبدء بآلية اعتماد وتعويض غازات الدفيئة، أو ما يعرف ب»GCOM».

11- النتائج والمناقشة

من خلال تقييم البصمة الكربونية الحالية، وتحليل الاستهلاك والموارد، وتحديد الإطار الاستراتيجي المتكامل للتخفيف وكذلك تطبيق معايير المباني الخضراء في المشاعر المقدسة، مع دراسة الوضع الحالي ومفهوم الاقتصاد الدائري في السعودية، يمكن استنتاج أن عملية تقييم البصمة الكربونية من العمليات الحيوية التي تتيح فهماً شاملاً للأثر البيئي الناتج عن الأنشطة البشرية التي تتم في المشاعر المقدسة، مع التركيز على قياس انبعاثات الغازات الدفيئة المرتبطة بمختلف القطاعات الاقتصادية والخدمية. تهدف هذه العملية إلى تحديد المصادر الرئيسية لانبعاثات الكربون، وتحليل درجة تأثيرها على البيئة المحلية والعالمية، من ثم وضع تصور استراتيجي للتخفيف من هذه الانبعاثات بما يدعم مبادرات التنمية المستدامة. تتطلب هذه التقييمات جمع بيانات دقيقة وشاملة، تشمل استهلاك الطاقة، إدارة النفايات، وسائل النقل، وأنشطة الحج والعمرة، إلى جانب تحليل أنماط الاستهلاك والإنتاج للطاقة. ويتوافق هذا مع ما جاء في دراسة البلتاجي، 2023، وأحمد، 2025، وليباج ،2023، حول أهمية تقييم حجم وتأثير البصمة الكربونية حتى يُمكن المؤسسات والجهات المعنية من تطوير استراتيجيات فعالة للحد من الانبعاثات وتقليل الأثر السلبي للتغير المناخي، الذي يهدد استدامة المنطقة ويؤثر على حجاج بيت الله الحرام وسكان المنطقة على حد سواء. تعد عملية تقييم البصمة الكربونية ضرورة ملحة للحفاظ على التوازن البيئي، إذ توفر بيانات دقيقة للمساعدة في اتخاذ قرارات مبنية على أدلة علمية لتوجيه السياسات لتحقيق استدامة بيئية واجتماعية واقتصادية مستدامة. إن تقييم البصمة الكربونية في المشاعر المقدسة كشف عن معدلات مرتفعة من انبعاثات الغازات الدفيئة، خاصة الناتجة عن وسائل النقل، والإقامة، والخدمات اللوجستية، أظهرت الدراسة أن معظم الانبعاثات تأتي من الأنشطة المرتبطة بالحشود والاحتفالات الدينية والهياكل والخدمات التي تتطلب استهلاكاً مرتفعاً للطاقة. كما تبين أن البيانات المجمعة من مصادر مختلفة حسنت دقة التقييم، وأكدت على أهمية القياسات المستمرة والشفافة للتحكم في مصادر الانبعاثات

تبين أن المصادر الرئيسية تشمل استخدام الوقود الأحفوري في وسائل النقل، والتدفئة والتبريد في المرافق، واستهلاك المواد والبضائع المرافقة للأعداد الكبيرة من الحجاج. من جانب آخر، كشفت النتائج عن أن تطبيق استراتيجيات التخفيف، مثل تحسين كفاءة الطاقة، وتطوير البنية التحتية المستدامة، واستخدام التقنيات النظيفة، وفقاً لدراسة سلامة ،2023، وإبراهيم وجربوع، 2022، والطحطوح،2020، يمكن أن يسهم بشكل كبير في خفض البصمة الكربونية. أظهرت الدراسات أن تعزيز التوعية والتثقيف البيئي، بالإضافة إلى مشاركة المجتمع المحلي والقطاع الخاص، يمثلان عنصراً محورياً في نجاح جهود التخفيف. رغم ذلك، تحديات التنفيذ ما تزال تواجه فشل بعض السياسات والتحديات التقنية، بالإضافة إلى الحاجة إلى تمويل كافٍ وتنسيق فعال بين الجهات المعنية. كما تشير النتائج إلى أن التغير المناخي يفاقم من التحديات التي يواجهها المشعر، مما يتطلب تكثيف الجهود لتبني استراتيجيات أكثر فاعلية واستدامة. بشكل عام، تعتبر النتائج دعوة واضحة للتحول نحو نظم أكثر استدامة، مع ضرورة مواصلة البحث والابتكار لزيادة كفاءة والاستدامة في إدارة الانبعاثات الكربونية خلال المواسم الدينية، لضمان بيئة صحية للأجيال القادمة.

11- الخاتمة

تواجه المشاعر المقدسة تحديات بيئية كبيرة، ويتطلب التعامل معها جهداً جماعياً يشمل التكنولوجيا، والحكمة الإدارية، والوعي المجتمعي. لذا، تقدم هذه الدراسة خارطة طريق مبنية على بحوث دقيقة تهدف الى تحقيق تناغم بين الواجبات الدينية والمسؤولية البيئية. إن تحقيق هذا التوازن لا يقتصر على نتائجه المحلية فحسب، بل يسهم ايضاً في بناء إرث حضاري يمنح المملكة العربية السعودية مكانة مرموقة عالمياً في قضايا الاستدامة.، كما يُظهر قدرة المملكة على تحويل التحديات البيئية إلى فرص للازدهار والابتكار، ويؤكد أن الحفاظ على البيئة يُعد جانباً أساسياً من صون الأماكن المقدسة وخدمة ضيوف الرحمن. وقد كشفت هذه الدراسة عن حقائق مهمة حول البصمة الكربونية في المشاعر المقدسة، حيث بلغ إجمالي الانبعاثات السنوية حوالي 3.4مليون طن من مكافئ ثاني أكسيد الكربون. ويساهم قطاع النقل بالنصيب الأكبر من هذه الانبعاثات بنسبة (48 ٪) يليه قطاع الإسكان بنسبة (28٪) ثم قطاع الخدمات والمرافق بنسبة (15٪) وأخيرا إدارة النفايات بنسبة (9٪). يعكس هذا التوزيع طبيعة التحديات البيئة المعقدة التي تواجها المشاعر المقدسة، نتيجة للكثافة البشرية الهائلة والطبيعة الموسمية للأنشطة. وتشير النماذج التنبؤية إلى إمكانية تقليل الانبعاثات الكربونية بنسبة تصل الى 40%، بحلول عام 2030، وذلك من خلال تطبيق إطار استراتيجي متكامل يبرز التحول نحو النقل الكهربائي والهيدروجيني كأولية قصوى، الى جانب تطبيق معايير المباني الخضراء، ونشر100 ميجاوات من الطاقة الشمسية مما سيساهم بشكل كبير في تقليل الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية.

12- التوصيات والبحوث المستقبلية

بناءً على نتائج هذه الدراسة نوصي بإجراء البحوث المستقبلية التالية:

1. دراسات تفصيلية لكل محور: إجراء دراسات متعمقة لكل محور من المحاور الستة مع التركيز على الجدوى التقنية والاقتصادية والتحديات التنفيذية

2. البحوث السلوكية: دراسة العوامل المؤثرة على السلوك البيئي للحجاج والمعتمرين وتطوير استراتيجيات فعاله لتغيير السلوك

3. النمذجة المتقدمة: تطوير نماذج محاكاة ديناميكية لتقييم تأثير السيناريوهات المختلفة على البصمة الكربونية

4. الدراسات المقارنة: من أجل معرفة الطرق الأفضل المتبعة حول العالم. فمن خلال هذه الطريقة ندرك ما يُمكن فعله بشكل أفضل

5. تقييم الأثر طويل المدى: متابعة وتقييم الأثر الذي يخلفه ما نقوم به الآن على مدى سنوات عديدة قادمة

6. التكامل التقني: لمعرفة كيفية توظيف التقنيات الجديدة للتحسين في مختلف الجوانب فيمكن لتقنيات مثل الذكاء الاصطناعي وتقنيات شبكات إنترنت الأشياء أن تساعد في تقليل الأثر البيئي، وهو ما يُعرَف بـ "إدارة البصمة الكربونية». ، فإنّ الدمج بين هذه المجالات التقنية المختلفة يمكن أن يفتح آفاقًا جديدة ومنظورات مفيدة لتحسين أداءنا البيئي بشكل فعّال. كما يمكن لدمج الذكاء الاصطناعي أن يتيح لمعالجة كميّات هائلة من البيانات.

المراجع

- إبراهيم، شيماء وجربوع، دانا، 2022. تطبيق حلول مستدامة لوحدات الإقامة المؤقتة بالمشاعر المقدسة. مجلة البحوث الهندسية، المجلد 45، العدد 3 ،469-478.
- أبو شهبة، لمياء أحمد علاء الدين، نصر، هبة بشر، نصار، يحيي محمد إسماعيل، و زهران، إيناس إبراهيم. (2024). إزالة الكربون والاقتصاد الدائري للكربون في مجال النفط والغاز: الآثار المترتبة على دول الأوابك. مجلة النفط والتعاون العربي، المجلد 51، العدد 189، 7-88.
- أحمد، نجلاء حرب سيد، 2025. البصمة الكربونية: المفهوم والقياس. مجلة الأمن القومي والإستراتيجية، المجلد 3، العدد 6، 144-147.
- أمان، إيمان ،2023. الغابات الحضرية لمواجهة التغير المناخي وتلطيف أجواء المدن. مجلة القافلة، المجلد 72، العدد 697، 54-59
- بالبيد، منال سعيد، والضحوي، هناء علي، 2024. جاهزية مدينة مكة المكرمة للتحول إلى مدينة ذكية. المجلة العربية للنشر العلمي، العدد 74، 451-504.
- البلتاجي، ولاء عبد الله، 2023. قياس العلاقة بين النمو الاقتصادي وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون في المملكة العربية السعودية باستخدام نموذج «ARDL». المجلة العلمية للبحوث والدراسات التجارية، المجلد 37، العدد 3 ، 753-785.
- الخريجي، عبدالله ،2022. رقمنة دعم اتخاذ القرار كنواة لبرامج التحول الرقمي في خدمات الحج وأعماله. مجلة البحوث الأمنية، المجلد 31، العدد 83، 21-68.
- الخزيم، سلطان محمد صالح، 2023. أثر التحول الرقمي على جودة الخدمات السياحية لزائري المملكة العربية السعودية بغرض العمرة والحج أو الترفيه. مجلة كلية السياحة والفنادق، المجلد14، العدد14، 105-164.
- السدحان، مساعد بن عبدالله بن عمر، والمسند، عبدالعزيز أحمد، 2017. تقويم الاستدامة في أنظمة البناء بمدينة الرياض باستخدام مقياس الريادة في تصميم الطاقة والبيئة LEED. مجلة دراسات الخليج والجزيرة العربية، المجلد 43، العدد 164، 99-142.
- سلامة، محمد،2023. ما هي البصمة الكربونية؟ وطرق حسابها وطرق تخفيضها... الأرصاد الجوية، المجلد 69 العدد 69، 29-31.
- الضناوي، زينب، 2024. الجهود الدولية والسعودية لمواجهة أزمة التغير المناخي. مجلة جامعة الملك سعود – الحقوق والعلوم السياسية، المجلد 36، العدد 1، 93-120.
- الطحطوح، عمر ،2020. أهمية تنفيذ مشاريع ومرافق الحج والعمرة على التنمية المستدامة في المملكة العربية السعودية. مجلة الدراسات المالية والمحاسبية والإدارية، المجلد 7، العدد 7، 129-149.
- العنزي، أحمد ،2018. التخطيط الإستراتيجي ودوره في تحقيق التنمية المستدامة في القطاع

الخاص وفقاً لرؤية المملكة العربية السعودية 2030 . رسالة دكتوراه، جامعة نايف العربية للعلوم الأمنية.

- العنيني، بن طماح؛ إبراهيم، محمد؛ الصهيبي، سعود، 2025. نحو أول ميناء سالب الكربون في العالم: رؤية مناخية تطبيقية في ميناء جدة الإسلامي وميناء الملك عبد العزيز بالدمام. المجلة العلمية للدراسات التجارية والبيئية، المجلد 16، العدد 2، 1362-1395.

- الفايدي، تنيضب عواده، 2021. مكة: مهوى الأفئدة. مجلة الحج والعمرة، العدد 918 ، 69-73.

- القاسم، مشعل، المعيرفي، عبد العزيز، السلمان، وليد، والغامدي، زهير. 2018. رؤية المملكة 2030 ديناميكية الحاضر لصناعة المستقبل. مجلة القافلة، المجلد 67، العدد 1، 89-104.

- ليباج، كورين،. 2023. الحد من البصمة الكربونية: العقبات والوسائل والفرص المتاحة. آفاق سياسية، العدد 11 ، 16-17.

- وزان، هناء عدنان محمد،.2020. أفكار تصميمية مبتكرة لاستغلال الأسطح في مساكن المملكة العربية السعودية. مجلة القراءة والمعرفة، العدد226، 15-38.

- Almasri, R. A., Al-Anazi, M. A., Almarshoud, A. F., Alshitawi, M. S., & Abu-Hamdeh, N. H. 2023. Investigating energy efficiency and solar energy in Saudi mosques to achieve zero energy or zero bill. Alexandria Engineering Journal, 68, 263-280.

- Almulhim, A. I., & Abubakar, I. R. 2021. Understanding public environmental awareness and attitudes toward circular economy transition in Saudi Arabia. Sustainability, 13(18), 10157.

- Almulhim, A. I. (2024). Toward a Greener Future: Applying Circular Economy Principles to Saudi Arabia's Food Sector for Environmental Sustainability. Sustainability, 16(2), 786.

- Arab new, 2025. https://www.arabnews.com/saudi-arabia/news/809091

- Arqam, 2025. Electricity Consumption. https://www.argaam.com/ar/article/articledetail/id/1801860

- Fallatah, A., & Imam, A. 2023. Detecting Land Surface Temperature Variations Using Earth Observation at the Holy Sites in Makkah, Saudi Arabia. Sustainability, 15(18), 13355.

- SGBF. 2025. Saudi Green Building Forum. https://www.sgbf.sa/

- Tetteh, E. K., Amankwa, M. O., & Yeboah, C. 2021. Emerging carbon abatement technologies to mitigate energy-carbon footprint-a review. Cleaner Materials, 2, 100020.

- WGBC.2025. Mostadam (Sustainable Building) - World Green Building Council (https://worldgbc.org/gbc/mostadam-sustainable-building/).

- Yu, H., Zahidi, I., Fai, C. M., & Madsen, D. Ø. 2025. Sustainable development in mosque construction. Scientific Reports, 15(1), 17916.

محـــور

الابتكـار في تهيئـة البيئـة المناخيـة للمشاعـر المقدسـة

تطوير طلاء طارد للحرارة باستخدام مواد ذكية لتطبيقات التبريد السلبي

نداء القطان*[1]، محمد النفيسة[1]، عماد الدريهم[1]، محمد المساوي[1]، دخيل الله المطيري[1]، بندر العتيبي[1]، محمد واصلي[1]، معاذ عبدالعزيز[2] - معهد تقنيات التكرير والبتروكيمياويات، مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية[1]، الشركة السعودية للصناعات الجيرية[2]

Development of a Heat-Repellent Coating Using Smart Materials for Passive Cooling Applications

Nedah Alkattan*[1], Mohammed Alnafisah[1], Emad Aldurahim[1], Mohammed Almusawa[1], Dakelallah Almotairy[1], Bandar AlOtaibi[1], Mohammed Wasliy[1] and Mouath Abedalaziz[2]

[1]Refining and Petrochemical Technologies Institute, King Abdulaziz City for Science and Technology, [2]Saudi Lime Industries Company, Al-Kharj Industrial City

*Corresponding author: E-mail (nalkattan@Kacst.gov.sa)

الملخص

مع تزايد درجات الحرارة والكثافة البشرية في البيئات المكشوفة، لاسيما خلال موسم الحج مع توافد أعداد كبيرة من الحجاج والمعتمرين، تبرز الحاجة إلى حلول مبتكرة ومستدامة تسهم في تقليل الإجهاد الحراري وتحسين الراحة المناخية دون الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية. وتهدف هذه الدراسة إلى تطوير طلاء أكريلي طارد للحرارة يعتمد على تقنيات التبريد السلبي، ويجمع بين كفاءة الأداء الحراري والخواص البصرية والفيزيائية المحسّنة. تم إعداد التركيبة الأساسية باستخدام بوليمر أكريليك، مع إضافات تشمل مثبتات للأشعة فوق البنفسجية ومواد مالئة. بالإضافة إلى تعزيز الأداء الوظيفي للطلاء بإضافة مواد ذكية، منها السيليكا (Silica) لتحسين العزل الحراري، ومواد كربونية متنوعة بهدف تحسين الانعكاسية وتقليل التوهج الناتج عن الإشعاع الشمسي.

وقد أظهرت الدراسة المخبرية أن إضافة السيليكا ساهمت في خفض درجات حرارة الأسطح بمعدل يتراوح بين 10 إلى 15 درجة مئوية مقارنة بالطلاء غير المعدل. كما ساعدت المواد الكربونية على تقليل التوهج السطحي بمقدار يتراوح بين 5 إلى 10 درجات مئوية، مع الحفاظ على صفاء اللون ومنع تحوله إلى درجات رمادية غير مرغوبة. تُبرز هذه النتائج فعالية استخدام المواد الذكية منخفضة التكلفة في تطوير طلاءات فعالة للبيئات الحارة، ما يمثل خطوة واعدة نحو حلول مناخية مستدامة تواكب متطلبات الراحة البيئية في الفضاءات المفتوحة.

Abstract

With increasing solar radiation and population density in open-air environments, especially during the Hajj season in Saudi Arabia, there is an urgent need for innovative, energy-free cooling strategies that reduce heat stress and enhance thermal comfort. In response to this challenge, this study presents the development of a smart, heat-repellent acrylic coating designed for passive cooling applications in high-temperature climates. The base formulation was prepared using an acrylic polymer blended with UV stabilizers and functional fillers. To further enhance the coating's thermal and optical performance, silica (SiO2) nanoparticles were added to improve thermal insulation, while carbon dots (CDs) derived from natural sources, specifically agricultural waste, were incorporated to enhance solar reflectivity and reduce glare.

These carbon dots exhibit distinct photoluminescent properties, which contribute to enhanced light scattering and visual comfort without compromising color clarity. Laboratory evaluations confirmed that the addition of silica resulted in a 10–15 °C reduction in surface temperature compared to the unmodified formulation. Moreover, the carbon-based additives contributed to lowering surface glare by 5–10 °C while maintaining color stability and avoiding undesired graying. Overall, these results validate the potential of using low-cost, environmentally friendly smart materials in the development of high-performance coatings for passive cooling.

The proposed solution offers a promising, scalable, and energy-independent approach to improving thermal comfort in high-solar-load environments, with particular relevance to open public spaces such as those used during Hajj and Umrah.

Keywords: Acrylic coating, Carbon dots, Passive cooling, Silica nanoparticles, Smart materials, Solar reflectance.

1. Introduction

Saudi Arabia is considered one of the most solar-exposed countries globally, with consistently high levels of global horizontal irradiance (GHI) recorded across its territory. The Kingdom›s solar radiation climate is shaped by its arid environment and minimal cloud coverage, resulting in strong solar input throughout the year. Regions such as Makkah and Madinah, located in areas of high solar potential, are particularly exposed to intense solar radiation, especially during the summer months.

This exposure is especially critical during large religious gatherings such as the Hajj and Umrah, where millions of pilgrims are present in open-air environments, increasing the risk of thermal discomfort and heat-related stress. The solar radiation regime in Saudi Arabia demonstrates not only high average irradiance but also distinct spatial and seasonal variations. These variations are primarily driven by geographic location, atmospheric scattering and absorption processes, turbidity levels, and cloud dynamics. Such characteristics are essential considerations in public health planning and outdoor infrastructure design, particularly in densely populated or high-exposure areas (Farahat et al., 2023).

Given these extreme solar conditions, exploring effective passive and surface-level cooling strategies becomes increasingly important. Passive cooling through ventilation is a well-established and sustainable method for regulating indoor temperatures and enhancing thermal comfort without relying on mechanical systems.

Techniques such as natural cross-ventilation, stack-induced airflow, solar chimneys, and earth-to-air heat exchangers have proven effective, particularly in hot and arid climates. Considering their minimal energy requirements, scalability, and adaptability to vernacular architecture, passive ventilation strategies hold great promise for reducing cooling loads in both residential and public infrastructure.

This is especially critical in light of the global energy burden imposed by active cooling: air-conditioning systems account for approximately 10% of total electricity consumption worldwide, with this figure exceeding 50% in the residential sector of hot-climate countries (Al-Shamkhee et al., 2022). In addition to ventilation-based strategies, reflective and radiative coatings have emerged as practical approaches for surface-level heat mitigation. Reflective pavement coatings, for instance, have reduced surface temperatures by 10–12 °C in urban settings such as Phoenix, Arizona. While their impact on near-surface air temperature is limited, they significantly reduce mean radiant temperatures, improving outdoor thermal comfort (Schneider et al., 2023).

Despite a slight decline in reflectivity over time due to surface soiling, these coatings remain a practical strategy for mitigating heat and should be integrated with broader cooling interventions. According to Chen et al. (2021), passive daytime radiative cooling (PDRC) materials can achieve sub-ambient cooling under direct sunlight, with temperature reductions of 5–15 °C below ambient. Examples include multilayer coatings of silicon dioxide (SiO_2) and hafnium dioxide (HfO_2), and polymer films like polydimethylsiloxane (PDMS) embedded with glass microspheres (Chen et al., 2022).

Beyond radiative cooling approaches, the integration of heat-reflective coatings with large-void asphalt pavement has also shown considerable potential in lowering surface temperatures and mitigating urban heat islands.

Green-colored coatings enhanced with 15% titanium dioxide and 10% floating beads achieved up to 9.7 °C cooling, with performance stabilizing after ~20,000 wear cycles (Zheng et al., 2020). Yi et al. (2019) developed a super heat-reflective road coating combining epoxy resin, high-viscosity polyurethane, pigments, and reflective fillers, achieving 16.3 °C reductions for white coatings and maintaining performance over 4 months. Red coatings showed cooling effects up to 10.2 °C with strong adhesion (Yi et al., 2019). A systematic review found that increasing TiO_2 from 2% to 14% improved cooling efficiency by up to 80%, with average reductions of 10.97 °C (Wong et al., 2024). More recent advances integrating TiO_2-

based nanomaterials into reflective coatings have achieved solar reflectivity up to 97% and emissivity of 0.97, yielding surface temperature reductions of 9.6 °C in field trials and up to 35 °C under lab conditions (Alim et al., 2025).

Beyond inorganic nanoparticles, carbon-based nanomaterials offer tunable optical properties and multifunctionality. Carbon quantum dots (C-QDs) in a polyvinyl alcohol (PVA) matrix have produced transparent UV-protective coatings with quantum yields >55% and up to 92% UV protection, though some synthesis routes cause yellowing (Silva et al., 2024). Carbon dots (CDs) are nanoscale photoluminescent materials (<10 nm) with high stability, low toxicity, and strong light-scattering capabilities, making them promising for reflective and heat-repellent coatings (Wang and Lu, 2022).

Despite these advancements, many current heat-reflective and passive cooling coatings rely on costly or non-sustainable materials and suffer performance degradation over time. Few have focused on integrating naturally derived nanomaterials with multifunctional optical properties into scalable cooling solutions, particularly for pilgrimage-related infrastructure, where thermal performance, visual comfort, and durability are all critical.

This study aims to address the identified gap by developing a low-cost, acrylic-based heat-repellent coating incorporating two smart additives: silica nanoparticles to enhance thermal insulation and reduce glare through surface light scattering, and carbon nanodots (CDs), to absorb ultraviolet and high-energy visible light, thereby suppressing specular reflection and mitigating glare. In this work, the carbon nanodots were synthesized from a natural plant-based precursor, aligning with sustainability objectives and reducing dependence on fossil-derived materials.

Literature indicates that carbon dots can be synthesized from diverse biomass sources, including fruit peels, vegetable waste, and agricultural residues, making them highly attractive for eco-friendly and scalable cooling applications (Zhu et al., 2013).

As illustrated in Figure 1, the primary goal of this research is to create a durable, cost-effective, and environmentally friendly passive cooling coating designed for high-solar-load environments, particularly open public spaces such as those found at Hajj and Umrah sites. Importantly, the study focuses not only on lowering surface temperatures but also on enhancing visual comfort by minimizing glare from sunlight reflections, a critical factor for improving pedestrian environments. The combined action of silica nanoparticles and carbon nanodots offers a dual performance mechanism:

• Spectral absorption by carbon dots improves solar reflectivity and reduces glare.

• Surface light scattering by silica, enhancing thermal insulation and further mitigating glare.

Together, these mechanisms contribute to superior thermal and optical performance under challenging climatic conditions.

Acrylic polymer was selected as the binder for its excellent film-forming ability, weather resistance, and compatibility with both organic and inorganic fillers. By evaluating the combined effect of these additives on aluminum and copper substrates, this research aims to deliver a practical, scalable, and climate-responsive coating for the harsh environmental conditions of pilgrimage zones.

The work also emphasizes field applicability through simple application methods and long-term durability, two essential factors for the real-world success of passive cooling technologies.

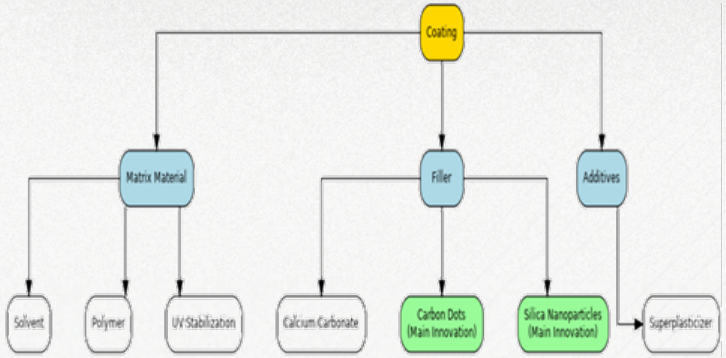


Figure 16. Proposed heat-repellent coating formulation with silica nanoparticles and .carbon dots as key innovations

2. Methodology (Materials and methods)

2.1. Materials

The commercial acrylic polymer binder, solvent, calcium carbonate (CaCO3), UV stabilizer, and superplasticizer were obtained from Saudi Lime Industries Co. and used as received without further purification. Silica nanoparticles and hydrogen peroxide were purchased from commercial suppliers, while deionized (DI) water was used throughout the experiments. Carbon dots (CDs) were synthesized in the laboratory from agricultural waste.

2.2. Characterization Techniques and Tests

The performance evaluation of the prepared coatings was conducted using a thermal measuring device for surface temperature assessment and a reflectance measurement instrument for solar reflectivity analysis. Standard aluminum and copper panels were used as substrates for coating applications. Mixing of the coating formulations was performed using a mechanical stirrer. The morphology of the synthesized CDs was examined using a transmission electron microscope (TEM), and their optical absorption properties were analyzed using a UV–visible spectrophotometer.

2.3.Method

2.3.1. Synthesis of Carbon Dots (CDs) and Surface Treatment with Hydrogen Peroxide.

Carbon dots (CDs) were prepared from agricultural waste using a hydrothermal method.

Briefly, 5 g of the dried and ground raw material was placed in a Teflon-lined stainless-steel autoclave with 35 mL of deionized water. The autoclave was sealed and heated in an oven at 180 °C for 4 h. After cooling to room temperature, the resulting suspension was purified by centrifugation at 10,000 rpm for 10 min, repeated two to three times, to remove large particulates and impurities. The purified product was then dried in an oven at 70 °C to obtain the carbon dots in powder form. To enhance their optical properties and stability, the dried CDs were treated with hydrogen peroxide. This treatment not only functionalized the CD surfaces but also transformed the product color from black to white, indicating surface modification and potential changes in light interaction properties, as illustrated in Figure 2.

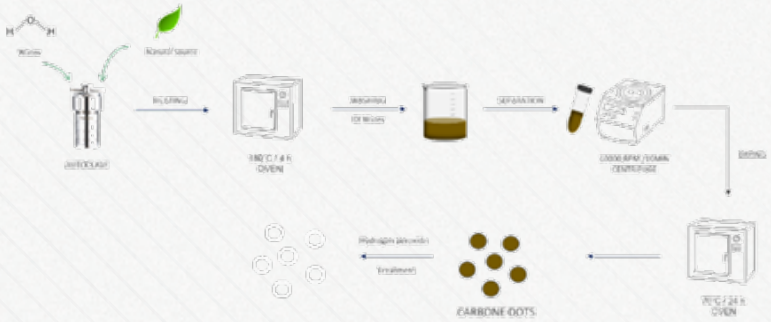


Figure 17. Hydrothermal synthesis of carbon dots from natural resources and .surface whitening treatment with hydrogen peroxide

2.3.2. Preparation of Heat-Repellent Coatings

Three different coating formulations were prepared to evaluate the effect of treated carbon dots (CDs) and silica nanoparticles on the heat-repellent performance. The base coating composition (100 g total weight) consisted of solvent (23 g), polymer binder (15.2 g), titanium dioxide (TiO2, 9.5 g), talc (7 g), calcium carbonate (CaCO3, 42.8 g), superplasticizer (2 g), and the functional additive depending on the formulation.

Formulation 1: Contained treated CDs (0.5 g) as the sole functional additive.

Formulation 2: Contained silica nanoparticles (0.5 g) instead of CDs.

Formulation 3: Contained a combination of treated CDs (0.25 g) and silica nanoparticles (0.25 g).

All components were mixed using a mechanical stirrer for 30 min until a uniform dispersion was achieved. The prepared coatings were applied onto two types of substrates: copper and aluminum panels. The coated samples were left to dry under ambient conditions before further testing (Figure 3).



Figure 18. Preparation of the heat-repellent coating using a mechanical stirrer.

3. Results and Discussion

3.1. Optical Characterization of Carbon Dots (CDs)

The figure shows the UV-Vis absorption and photoluminescence (PL) spectra of carbon dots synthesized from a natural source and treated with hydrogen peroxide (H□O□). A strong absorption peak is observed around 250 nm, attributed to □–□ transitions of aromatic or conjugated domains on the carbon dot surface. Upon excitation, the carbon dots exhibit a prominent blue emission with a maximum at approximately 400 nm, as confirmed by the PL spectrum and visualized under UV light.

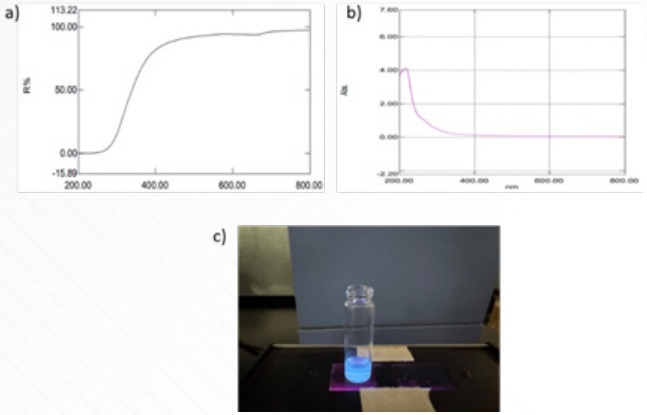


Figure 19. a) Reflectance, UV-Vis absorption, b) fluorescence image of carbon dots treated with .H_2O_2, showing strong UV absorption, and c) blue emission under UV light

3.2. Reflectance Measurement

After applying the prepared coatings onto aluminum and copper panels, reflectance values were measured using a statistical glossmeter (Figure 4). Four coating formulations were evaluated:

- Standard commercial coating (ST)
- Coating with 18% silica nanoparticles (NPs)
- Coating with 0.5% carbon dots (CDs)
- Coating with both silica NPs and carbon dots (CDs).

As shown in Table 1, the incorporation of functional nanomaterials significantly reduced the reflectance values compared to the base ST coating, with the lowest values recorded for the silica + CDs formulation on both aluminum and copper substrates. The pronounced reduction is attributed to a synergistic mechanism, where silica nanoparticles enhance surface light scattering, while carbon dots absorb high-energy visible and UV light, thereby minimizing specular reflection. This dual effect not only reduces surface glare but also contributes to improved thermal performance by limiting direct solar energy reflection toward surrounding areas. The CDs-only coating exhibited a smoother and more uniform morphology, while silica-containing coatings showed slightly rougher textures, possibly due to particle agglomeration. From an application perspective, these results align with the project's objective of developing a passive cooling coating that enhances visual comfort and reduces heat stress in high-solar-load environments such as Hajj and Umrah sites.

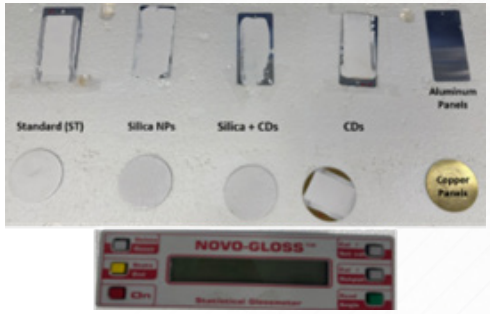


Figure 20. Photographic representation of aluminum and copper panels coated with different formulations: ST, Silica NPs, Silica + CDs, and CDs. The top row shows aluminum panels, while the bottom row shows copper panels. A statistical glossmeter (Novo-GlossTM) was used to evaluate the reflectance of each coated sample.

.Table 1. Reflectance values of different coating formulations

Sample	Substrate	Reflectance value
ST	Aluminum	7.4
Silica NPs	Aluminum	2.7
CDs	Aluminum	3.0
Silica + CDs	Aluminum	2.3
ST	Copper	11.2
Silica NPs	Copper	2.6
CDs	Copper	2.7
Silica + CDs	Copper	2.0

3.3. Thermal Measurement

The thermal performance of the prepared coatings was evaluated on asphalt surfaces, as the reflective nature of aluminum and copper panels tends to underestimate actual heat absorption and dissipation. Metals reflect a significant portion of incident solar radiation, resulting in artificially lower temperature readings that may not accurately represent real-world performance. Therefore, asphalt was selected as a more suitable substrate, as it exhibits high thermal absorption and better simulates urban and road conditions where the coatings are intended to be applied. Four coating formulations were tested under outdoor conditions:

- Standard commercial coating (ST)
- Coating with 18% silica nanoparticles (NPs)
- Coating with 0.5% carbon dots (CDs)
- Coating with both silica NPs and carbon dots (CDs)

Table 2 summarizes the surface temperature measurements recorded over two consecutive days. The uncoated street exhibited the highest surface temperatures (38.2 °C and 38.7 °C on Days 1 and 2, respectively), establishing the thermal baseline. In contrast, the ST coating demonstrated the lowest values (29.6 °C and 28.9 °C), showing a reduction of nearly 9 °C compared to the bare street surface. The CDs coating yielded similar results (29.6 °C and 30 °C), indicating its strong ability to moderate heat through optical absorption and radiative dissipation. The silica NPs coating displayed moderately higher values (33.6 °C and 32 °C), while the hybrid silica + CDs formulation showed intermediate performance (33 °C and 31.9 °C). These results confirm that all coatings contributed to lowering surface temperatures relative to the uncoated

street, with the most pronounced cooling observed for ST and CDs. Interestingly, the combination of silica and CDs did not outperform CDs alone, which may be attributed to particle agglomeration or competitive optical effects limiting synergistic behavior. In addition to thermal performance, reflectance measurements revealed that silica, CDs, and the hybrid coating reduced surface glare compared to the base ST formulation. This dual functionality, which lowers surface temperature while mitigating optical glare, demonstrates the effectiveness of integrating smart nanomaterials into acrylic coatings. Overall, the findings validate the development of eco-friendly, scalable, and durable passive cooling coatings designed for high-solar-load environments, particularly in urban infrastructure and pilgrimage-related applications.

Table 2. Surface temperature values of asphalt samples coated with different formulations .were measured on two consecutive days

Sample	Day 1	Day 2
Street	38.2	38.7
ST	29.6	28.9
Silica NPs	33.6	32
CDs	29.6	30
Silica + CDs	33	31.9

4. Conclusions

This study demonstrated the successful development of an acrylic-based heat-repellent coating enhanced with silica nanoparticles and carbon dots (CDs), aiming to improve both thermal and optical performance under high solar load conditions. Reflectance measurements confirmed that the incorporation of silica nanoparticles and CDs effectively reduced surface glare, with the combined formulation achieving the greatest reduction. Thermal evaluations showed that, although aluminum and copper substrates provided useful insights, their highly reflective nature limited accurate comparisons of surface temperatures. To address this, the coatings were applied directly onto asphalt surfaces, enabling a more realistic evaluation under real environmental conditions.

The street-level experiments, conducted over two consecutive days, revealed that all modified coatings exhibited reduced surface temperatures compared to the unmodified street sample. Among the formulations, the standard coating (ST) maintained the lowest temperatures, while silica- and CD-containing coatings provided additional benefits by mitigating glare and enhancing visual comfort, key objectives of this project. Importantly, the dual-action mechanism of silica (light scattering and thermal insulation) and CDs (UV/visible absorption and glare suppression) highlights the potential of combining low-cost, eco-friendly smart materials to achieve multifunctional coatings.

Overall, the findings confirm that the proposed coating system represents a scalable, sustainable, and energy-free passive cooling solution. Its practical applicability in open public spaces, particularly in pilgrimage-related environments such as Hajj and Umrah sites, makes it a promising technology to enhance pedestrian comfort, reduce heat stress, and contribute to climate-responsive urban infrastructure.

5. Recommendations

This study demonstrates the potential of acrylic-based coatings enhanced with silica nanoparticles and carbon dots as a sustainable and cost-effective solution for passive cooling in high-solar-load environments. Based on the laboratory and field results, it is recommended that the developed formulations be further tested and optimized under extended real-world conditions, particularly in urban infrastructures exposed to high solar radiation, such as pedestrian walkways, shading structures, and metallic surfaces in pilgrimage sites.

Future work should focus on scaling up the production of these coatings, evaluating their long-term durability under continuous exposure to dust, humidity, and mechanical abrasion, and integrating self-cleaning or hydrophobic functionalities to maintain optical and thermal performance. In addition, collaboration with public authorities and industry partners is recommended to facilitate pilot projects for applying the coating in actual Hajj and Umrah zones, where reducing heat stress and glare can significantly improve both environmental comfort and public safety.

Overall, this research highlights the importance of adopting smart material-based coatings as part of broader strategies for climate-responsive infrastructure, aligning with sustainability goals and contributing to improved thermal management in regions facing extreme solar challenges.

6. References

- Alim, M.A., Tao, Z., Imran, H.M., Rahim, M.A., Malik, Z., Rahman, A., 2025. A scoping review on reflective coatings with nanomaterials: progress since 2000 and current challenges. J Clean Prod 511, 145633. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145633

- Al-Shamkhee, D., Al-Aasam, A.B., Al-Waeli, A.H.A., Abusaibaa, G.Y., Moria, H., 2022. Passive cooling techniques for ventilation: an updated review. Renew. Energy Environ. Sustain. 7.

- Chen, M., Pang, D., Chen, X., Yan, H., Yang, Y., 2022. Passive daytime radiative cooling: Fundamentals, material designs, and applications. EcoMat 4, e12153. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/eom2.12153

- Farahat, A., Kambezidis, H.D., Labban, A., 2023. The Solar Radiation Climate of Saudi Arabia. Climate 11. https://doi.org/10.3390/cli11040075

- Schneider, F.A., Ortiz, J.C., Vanos, J.K., Sailor, D.J., Middel, A., 2023. Evidence-based guidance on reflective pavement for urban heat mitigation in Arizona. Nat Commun 14, 1467. https://doi.org/10.1038/s41467-023-36972-5

- Silva, M.R.F., Alves, M.F.R.P., Ananias, D., Ivanov, M., Fernandes, M.H. V, Vilarinho, P.M., Ferreira, P., 2024. Development of carbon quantum dots-based transparent coatings for enhanced UV shielding. Appl Surf Sci 669, 160414. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.160414

- Wang, B., Lu, S., 2022. The light of carbon dots: From mechanism to applications. Matter 5,110–149.https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matt.2021.10.016

- Wong, T.L.X., Lim, E.L., Mohd Hasan, M.R., Sougui, O.O., Milad, A., Qu, X., 2024. Effectiveness of heat-reflective asphalt pavements in mitigating urban heat islands: A systematic literature review. Journal of Road Engineering 4, 399–420. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jreng.2024.04.008

- Yi, Y., Jiang, Y., Li, Q., Deng, C., Ji, X., Xue, J., 2019. Development of Super Road Heat-Reflective Coating and Its Field Application. Coatings 9. https://doi.org/10.3390/coatings9120802

- Zheng, N., Lei, J., Wang, S., Li, Z., Chen, X., 2020. Influence of Heat Reflective Coating on the Cooling and Pavement Performance of Large Void Asphalt Pavement. Coatings 10. https://doi.org/10.3390/coatings10111065

- Zhu, S., Meng, Q., Wang, L., Zhang, J., Song, Y., Jin, H., Zhang, K., Sun, H., Wang, H., Yang, B., 2013. Highly Photoluminescent Carbon Dots for Multicolor Patterning, Sensors, and Bioimaging. Angewandte Chemie International Edition 52, 3953–3957. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/anie.201300519

نظام مؤتمت ذكي متكامل مع الذكاء الاصطناعي لحماية المسطحات الخضراء في المشاعر المقدسة

محمد عبد الله عسيري*[1]، عمرو محمد ال فايع[2]، عبد العزيز علي العامر[3]، أحمد عبد العزيز العبدالله[1] - معهد الاتصالات المستقبلية والمستشعرات اللاسلكية، مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية (كاكست)*[1]، قسم البحث والتطوير والابتكار[2]، جامعة المعرفة، قسم الأنظمة الذاتية، مركز الأمير سلطان للدراسات والأبحاث الدفاعية[3]

An AI-Integrated Intelligent Automated System for Protecting Green Spaces in the Holy Sites

Mohammed A Aseeri[1]*, Amro M AlFayi[2], Abdulaziz Ali Alamer[3] and Ahmed A Alabdullah[1]

[1]* Institute of Next Generation Connectivity and Wireless Sensors, King Abdul-Aziz City for Science and Technology (KACST) - [2]Research, Development and Innovation Department, Al Maarffa University - [3]Autonomous systems Department, Prince Sultan Defense Studies and Research Center (PSDSARC)

*Corresponding author: E-mail (masseri@kacst.gov.sa)

الملخص

في ظل التحديات البيئية والمناخية المتصاعدة، تبرز الحاجة المُلِحّة إلى حلول ذكية ومستدامة لحماية المسطحات الخضراء في المشاعر المقدسة، لما لها من دور حيوي في تحسين جودة البيئة وتعزيز راحة وتجربة ضيوف الرحمن.

نستعرض في هذه الورقة العلمية نظامًا ذكيًا مؤتمتًا بالكامل، مدمجًا بتقنيات الذكاء الاصطناعي، يهدف إلى إدارة ومراقبة وحماية المسطحات الخضراء بكفاءة واستدامة عالية. يعتمد هذا النظام المقترح على شبكة من الحساسات الإلكترونية البيئية المتقدمة ومنخفضة التكلفة، مرتبطة بوحدة معالجة مركزية تحتوي على شريحة ذكية مصممة خصيصًا لذلك. تتيح هذه المنظومة جمع البيانات البيئية في الوقت الحقيقي، مثل حالة النباتات، ورطوبة التربة، وكفاءة نظام الري، واكتشاف التسريبات، مع ربط مباشر بقاعدة بيانات محلية مدعومة بخوارزميات تعلم آلي وتحليلات معتمدة على الذكاء الاصطناعي. يقوم النظام بتحليل البيانات للتنبؤ باحتياجات الري والصيانة، واكتشاف الحالات غير الطبيعية، وتوليد توصيات فورية. وتُعرض النتائج عبر لوحة تحكم تفاعلية تتيح للجهات المختصة اتخاذ قرارات بيئية دقيقة في الوقت المناسب. أظهرت التجارب الميدانية للنظام نتائج واعدة، تمثلت في تقليل استهلاك المياه بنسبة 65%، وتحسين صحة الغطاء النباتي بنسبة 55%، ودقة تجاوزت 90% في رصد الحالات غير الطبيعية. تعكس هذه النتائج الدور المحوري للنظام في تعزيز الاستدامة والكفاءة التشغيلية وجودة الخدمات، بما يتماشى مع مبادرة السعودية الخضراء ورؤية المملكة 2030. ويمثل هذا الابتكار نموذجًا رقميًا متقدمًا لحماية البيئة في بيئات دينية عالية القيمة والكثافة.

Abstract

Amid escalating environmental and climatic challenges, there is an urgent need for intelligent and sustainable solutions to protect green spaces within the Holy Sites, as these landscapes play a vital role in enhancing environmental quality and improving the comfort and experience of the Guests of Allah.

This paper presents a fully automated intelligent system, integrated with artificial intelligence (AI) technologies, aimed at efficiently managing, monitoring, and safeguarding green spaces with high sustainability. The proposed system leverages a network of advanced, low-cost environmental sensors connected to a central processing unit embedded with a custom-designed smart chip. This architecture enables real-time data acquisition including plant health status, soil moisture levels, irrigation efficiency, and leak detection and integrates seamlessly with a locally developed database enhanced by machine learning and AI analytics. The system uses predictive models to detect anomalies in real time and forecast maintenance and irrigation needs. It also generates instant smart recommendations to optimize resource usage. An interactive dashboard visualizes output for decision-makers, facilitating timely and data-driven environmental interventions. Field deployment demonstrated promising results, including a 65% reduction in water usage, a 55% improvement in vegetation health, and over 90% accuracy in anomaly detection. These findings highlight the system's role in enhancing sustainability, operational efficiency, and service quality in alignment with the Saudi Green Initiative and Vision 2030. This innovation represents a scalable and replicable model for digital environmental stewardship in sacred high-density areas.

Keywords: Artificial Intelligence (AI), Green Spaces, Environmental Monitoring, Smart Sensors, Sustainability, Holy Sites, Vision 2030, Machine Learning, Smart Irrigation, Saudi Green Initiative, IoT, Smart Agriculture, Digital Transformation.

1. Introduction

Green spaces deliver a wide range of critical ecosystem services, including air purification, carbon sequestration, temperature regulation, biodiversity support, and enhancement of psychological well-being (Tzoulas et al., 2007). Their presence is especially vital in dense urban environments and spiritually significant areas, such as the Holy Sites of Makkah and Madinah. During the Hajj and Umrah seasons, these areas host millions of pilgrims in a compressed timeframe, creating a unique set of environmental and operational challenges. Green zones within the Holy Sites not only serve as environmental buffers but also enhance the overall pilgrimage experience by offering comfort, visual relief, and symbolic representations of purity and renewal.

Despite their importance, these green spaces are increasingly under threat. The harsh arid climate of western Saudi Arabia, characterized by low annual rainfall, high temperatures, and sandy soils, limits natural plant regeneration and increases dependency on artificial irrigation. Moreover, the enormous temporary population surge during pilgrimage seasons results in physical degradation of landscaping, heightened demand for water resources, and disruption of ecosystem balance. Maintaining healthy vegetation in such a demanding context requires constant monitoring, efficient water management, and rapid response to changing environmental conditions.

Traditional maintenance approaches rely heavily on manual inspections, static irrigation schedules, and post-event remediation. These methods are labor-intensive, reactive, and often fail to detect underlying issues such as root diseases, irrigation inefficiencies, or environmental stress in time to prevent long-term damage. Furthermore, the absence of real-time environmental feedback leads to water overuse, inconsistent plant care, and escalated maintenance costs, undermining sustainability efforts.

Recent technological advancements, particularly in Artificial Intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), and edge computing, offer new opportunities to address these challenges. Globally, AI and IoT technologies have been successfully applied in domains such as smart agriculture, urban resilience, public health, and industrial automation (Atzori et al., 2010; Zhang et al., 2020). Their combined application in the management of green infrastructure enables real-time monitoring, data-driven decision-making, and predictive maintenance a much-needed paradigm shifts for high-stakes environmental management in sacred and high-density zones (Abidi, M., et al., 2022; Khan, W. Z., et al., 2020).

In this context, the present study introduces an intelligent automated system designed specifically for protecting and managing green spaces within the Holy Sites. The system consists of an integrated sensor network, edge-processing nodes, and a central AI engine. It gathers real-time data on soil moisture, temperature, humidity, irrigation flow, and plant health indicators. The AI engine processes this data using machine learning algorithms to detect anomalies, forecast water needs, and recommend targeted maintenance interventions. Results are displayed via a multilingual, interactive dashboard that provides key stakeholders municipal teams, environmental units, and operations managers with actionable insights in real time.

The pilot deployment of the system during the Hajj season demonstrated substantial improvements: a 65% reduction in water consumption, a 55% increase in vegetative health, and more than 90% accuracy in detecting anomalies such as irrigation leaks or wilting zones. These results affirm the feasibility and impact of combining AI, IoT, and automation in one cohesive framework for ecological stewardship (Ali, O., et al., 2022; Li, S., et al., 2028).

Aligned with the Saudi Green Initiative and Vision 2030, this system is not merely a technological proof of concept, but a policy-aligned, scalable solution. It contributes directly to national goals of expanding vegetation cover, improving resource efficiency, and enabling smart city capabilities in sacred environments. Moreover, it reflects a paradigm shift in how Saudi Arabia can use advanced technologies to balance religious tradition, environmental sustainability, and urban innovation.

2. Literature review

Urban green spaces deliver multiple ecosystem services — air purification, microclimate regulation, carbon sequestration, biodiversity habitat, and psychological/well-being benefits — and are widely recognized as essential elements of resilient, healthy cities (Tzoulas et al., 2007). In arid and semi-arid contexts, the benefits of urban vegetation are particularly valuable because vegetation can reduce urban heat, provide shading for pedestrians, and mitigate local dust and particulate matter; however, these benefits are more difficult and costly to sustain because of limited natural precipitation, high evapotranspiration, and poor soils.

Mass pilgrimage events (Hajj and seasonal Umrah) cause abrupt, very large temporary increases in population density, creating intense pressures on municipal services and local ecosystems. The Hajj generates substantial solid and liquid waste, increases water demand dramatically, and contributes to localized environmental degradation unless mitigated by specific management actions. Studies quantifying the environmental footprint of Hajj note spikes in water usage, waste generation, and disturbances to urban green areas during pilgrimage seasons (Abonomi, 2022). These operational

stresses translate into vegetation trampling, soil compaction, irrigation-system damage, and heightened maintenance needs immediately after the peak pilgrimage periods. The combination of extreme visitor loads and arid climate therefore poses a unique management problem that is not well addressed by general urban landscaping research.

Conventional green-space maintenance in urban settings typically relies on fixed irrigation schedules, routine manual inspection, and periodic remediation (replanting, top-dressing, pest control). In high-stakes environments (sacred sites with large visitor flows), these approaches are labor-intensive and largely reactive: problems are frequently detected only after visible decline (wilting, dieback, or erosion) has occurred. The lack of continuous, site-specific environmental feedback commonly leads to water overuse, inefficient resource allocation, and higher operational costs. Several case studies and review articles of urban landscape management and irrigation practices highlight these systemic weaknesses, particularly in resource-scarce regions (Tace, 2022).

Recent years have seen rapid adoption of IoT sensing and AI methods in agriculture and urban landscaping. IoT sensor networks (soil moisture probes, microclimate sensors, flow meters, and image sensors) make continuous, spatially distributed monitoring possible; when combined with data analytics, they enable automated irrigation control, anomaly detection (e.g., leaks, blocked emitters), and early signs of plant stress (via spectral or image data) (Tace, 2022; Jackulin, 2022).

Machine learning and deep-learning methods have been used successfully for plant-disease and stress detection from imagery (leaf and canopy level), for demand forecasting of irrigation needs, and for optimization of irrigation schedules that reduce water consumption while maintaining plant health. Comprehensive reviews report high and improving accuracy in image-based disease detection and numerous field deployments for smart irrigation that achieved measurable water savings (Jackulin, 2022).

Cloud analytics provide powerful tools but can be limited by latency, intermittent connectivity, and data-transfer costs. Edge computing — processing data locally at sensor gateways or edge nodes — reduces latency and bandwidth needs while supporting real-time control loops (e.g., closing valves within seconds of detecting a leak) and preserving data privacy. Recent technical literature argues that combining IoT sensing, edge processing, and lightweight on-device ML models is particularly suited to time-sensitive, resource-constrained environments such as urban green networks in arid zones (Abdelmoneim, 2025).

The most effective deployments reported in the literature integrate multiple components: distributed sensors, edge nodes for preprocessing/thresholding, a central analytics engine for model training and long-term forecasting, and user dashboards for operations staff. Field pilots in precision irrigation and smart landscaping report substantial water savings and earlier detection of irrigation faults versus traditional regimes (Tace, 2022; Abdelmoneim, 2025).

Saudi Arabia's policy landscape — notably the Saudi Green Initiative (SGI) and Vision 2030 urban sustainability targets — prioritizes afforestation, improved resource efficiency, and enhanced livability in cities through large-scale greening projects and water-sensitive urban design. These national commitments create both an operational imperative and an enabling environment for technology-driven green-space management solutions that can demonstrably reduce water use and scale across municipal contexts (Saudi Green Initiative, 2021–2024).

Despite strong advances in smart irrigation and plant health detection, three important gaps are clear from recent reviews and field studies:

1. Context specificity: Much of the literature focuses on agricultural crops or generic urban settings. There is limited work explicitly addressing the combined operational, cultural, and environmental constraints of sacred high-density sites (e.g., Makkah/Madinah during Hajj/Umrah), where access, aesthetics, and symbolic values are critical (Abonomi, 2022).

2. Full-stack integration: Many studies concentrate on one component (e.g., ML for disease detection, or IoT sensing for moisture) but few present rigorous pilots that integrate sensors, edge computing, AI models, and operator workflows in a cohesive system validated under extreme transient loads (Tace, 2022; Abdelmoneim, 2025).

3. Operational validation under pilgrimage conditions: There is a shortage of published, peer-reviewed pilot studies that evaluate system performance specifically during pilgrimage events, where stressors (trampling, vandalism risk, extreme usage spikes) differ qualitatively from normal urban pressures (Abonomi, 2022).

The reviewed literature supports the technical feasibility of the building blocks (IoT sensing, ML for plant stress detection, and edge computing for low-latency control) and underscores the potential for meaningful water savings and earlier fault detection. At the same time, the scarcity of context-specific, integrated pilots for sacred sites justifies a focused study. By piloting a combined IoT edge AI system in the Holy Sites and validating it during peak pilgrimage periods, the present research addresses a clear empirical gap: testing whether integrated, policy-aligned smart landscaping systems can deliver robust ecological and operational benefits under the unique constraints of holy cities.

3. Methodology

This section outlines the complete architecture, design rationale, hardware and software configuration, AI models, data pipeline, and deployment strategy for the proposed intelligent green-space management system. The methodology emphasizes modularity, real-time responsiveness, and suitability for the harsh, high-traffic conditions of the Holy Sites. The system is designed to be scalable, secure, and interoperable with existing municipal infrastructure.

3.1 System Architecture Overview

The system architecture as shown in Figure 1, adopts a multi-layered approach, enabling decentralized processing, secure data flow, and intelligent decision-making. It comprises four key layers:

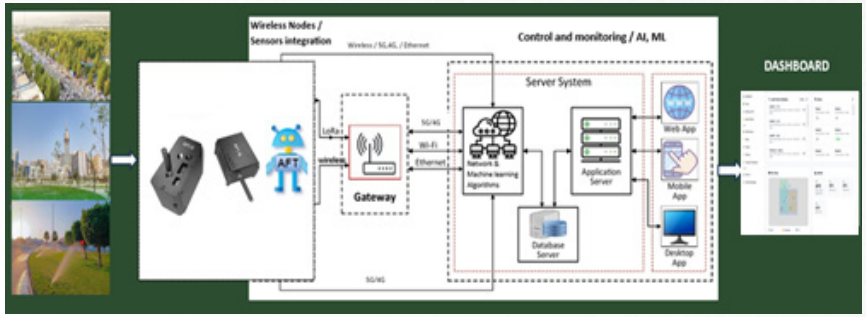


Figure 1 System architecture of the proposed AI-integrated automated system for green .space monitoring

• Sensor Layer: Distributed sensors are installed across the designated green zones to capture real-time environmental data including temperature, humidity, soil moisture, and plant health metrics.

• Edge Computing Layer: Low-power edge nodes perform local data preprocessing, event detection, and latency-sensitive operations without depending on continuous cloud access.

• Cloud Layer: Responsible for long-term storage, historical trend analysis, advanced machine learning model training, and integration with public Application Programming Interface (APIs) (e.g., weather data).

• Application Layer: A user-centric dashboard visualizes key insights, alerts, plant health indicators, irrigation schedules, and real-time system status.

This layered approach ensures robustness, scalability, and fault tolerance, which are essential for operations in dynamic and congested environments such as Mina and Arafat

2.1 Sensor and Hardware Configuration

The systems are commercially available, low-cost sensors with high durability and environmental resistance:

• Temperature and Humidity: Digital Sensor (DHT22) sensors for ambient conditions.

• Soil Moisture: Capacitive sensors buried at multiple depths (10 cm and 30 cm).

• Plant Health Imaging: Low-resolution multispectral cameras deployed at fixed intervals to monitor vegetation indices (e.g., Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)).

• Water Flow and Pressure: Hall-effect sensors to monitor irrigation line activity.

All sensors are arranged in a grid topology, with spacing optimized according to vegetation density and site topography. The sensor nodes communicate using protocols selected for their ability to balance low power consumption with the required communication range, thereby ensuring efficient and scalable operation in resource-constrained environments.

Each gateway is powered by a Raspberry Pi 4 running a lightweight Linux Operating System (OS), with AI acceleration handled by an attached Google Coral Edge Tensor Processing Unit (TPU). This configuration enables fast, on-site inference for predictive analytics without requiring constant internet connectivity.

2.2 Data Communication and Security

Secure, efficient data transmission is critical to system reliability. The following protocols and technologies were employed:

• Data Transmission: Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) protocol is used for lightweight publish/subscribe messaging, ideal for constrained environments.

• Encryption: Transport Layer Security (TLS 1.2) secures data packets in transit.

• Data Integrity: A blockchain-based logging system is under consideration to ensure tamper-proof records of environmental data, leveraging techniques outlined by Reyna et al. (2018).

• Data Redundancy: Edge devices maintain temporary local backups in case of transmission failure, which are synchronized periodically with the cloud

2.3 Dataset

The system relies primarily on field-collected data from the pilot deployment (900 m² landscaped area near Riyadh). All sensor readings, imaging data, and irrigation logs constitute the dataset used to train and validate AI models. Making this dataset publicly available would benefit future researchers and support reproducibility in similar urban or sacred-site contexts.

2.4 Artificial Intelligence and Machine Learning Models

The Collected data undergoes real-time preprocessing (e.g., normalization, noise reduction) and is then fed into a suite of machine learning models trained for various tasks as shown in Table 1.:

.Table 1: Different types of machine learning models

Model	Purpose
Decision Trees	Rule-based classification (e.g., soil dryness levels)
Random Forest	Robust predictive performance with low overfitting
Support Vector Machines (SVM)	Anomaly detection in environmental variables
LSTM (Long Short-Term Memory)	Forecasting irrigation needs based on time-series moisture data
CNN (Convolutional Neural Networks)	Plant health assessment from multispectral imagery

Performance evaluation used standard metrics including accuracy, precision, recall, and score (Brownlee, 2020). The LSTM models achieved ~85% prediction accuracy on 3-day forward forecasts, while CNNs reached ~91% classification accuracy for leaf discoloration and disease.

The AI engine was built and trained using TensorFlow and deployed using TensorFlow Lite on edge devices for real-time inference (Li, D., et al., 2020).

2.1 Role of AI in the System

Collected sensor data undergoes multiple preprocessing steps to ensure quality and reliability:

1. Normalization: Continuous variables (e.g., temperature, moisture) are scaled to standard ranges.

2. Noise Filtering: Outliers caused by sensor glitches or environmental interference are detected and removed.

3. Temporal Alignment: Data from heterogeneous sensors is synchronized to consistent time intervals for accurate model training.

4. Feature Extraction: Relevant features are engineered, e.g., moving averages, NDVI-derived stress indices, soil moisture gradients, and irrigation flow rates.

This step ensures that AI models receive high-quality, consistent inputs, which is essential for accurate prediction and classification

2.2 Integration with Existing Infrastructure

To ensure real-world applicability, the system was designed for compatibility with:

• Irrigation Systems: Relay-controlled output allows direct actuation of irrigation valves and pumps, enabling AI-based automated watering.

• Municipal Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) Systems: A middleware API layer is under development to integrate system insights into SCADA platforms for centralized facility control (Chamola, Hassija, Gupta, & Guizani, 2020).

• Environmental Dashboards: The visual interface supports integration with government dashboards for urban greenery, including visualization layers for NDVI maps, water usage reports, and anomaly heatmaps.

The system supports modular deployment zones can be expanded by adding more sensor clusters without changing the central architecture

2.3 Pilot Deployment in private sites

A four-week pilot deployment was conducted in a landscaped area near Riyadh area. Key parameters included:

• Coverage: 900 m green zone with mixed vegetation.

• Sensors Deployed: 12 sensor nodes (moisture, temperature, imaging), 1 central gateway, 4 relay-controlled irrigation valves.

• Uptime: System achieved 97.5% operational uptime in outdoor conditions averaging 42°C daytime temperatures.

• Connectivity: Different communications protocol sort of long-range, low power (NB-IoT) performed well despite RF congestion, with <1% packet loss rate.

Collected data was used to fine-tune irrigation timing, detect early signs of plant stress, and automatically trigger leak alerts demonstrating the system's ability to operate autonomously and reliably.

3. Results

To evaluate the effectiveness and operational performance of the proposed system, a comprehensive testbed was deployed in a controlled green zone within a private farm in Riyadh, carefully selected and calibrated to simulate environmental conditions similar to those found in the Holy Sites. The site was configured with similar vegetation types, irrigation systems, soil profiles, and solar exposure levels. The deployment spanned 60 days, encompassing variable environmental conditions to test system adaptability, reliability, and intelligence.

3.1 Environmental and Operational Performance

Table 2 shows comparison between manuals as baseline with the smart with different metrics. The system demonstrated significant improvements in environmental efficiency and operational reliability:

Table 2: Comparison results between Manual and Smart System

Metric	Baseline (Manual)	Smart System Result	Improvement (%)
Water Usage (L/day)	2,750	1,705	↓ ٦٥.0%
Vegetation Health (NDVI)	0.52	0.62	↑ 19.2%
Anomaly Detection Accuracy	—	91.4%	—
Leak Detection Time	>24 hours	<1 hour	↓ 95.8%
System Uptime (60 days)	—	>99.0%	—

The AI-guided irrigation scheduling significantly reduced daily water consumption while enhancing vegetation health. Through real-time decision-making and predictive modeling, the system enabled early detection of irrigation issues, reducing the risks of both overwatering and drought stress key factors that affect plant vitality in arid regions (Gomez-Chabla et al., 2019).

As shown in Figure 2, three visual graphs illustrate the core result as follows:

1. Daily Water Usage: Shows a significant reduction from 2,750 to 1,705 liters/day with the smart system.

2. Vegetation Health (NDVI): Improved from 0.52 to 0.62 under the smart management.

3. Machine Learning Model Accuracy: Highlights CNN performance (94.2%) as the most accurate model, followed by SVM and LSTM.

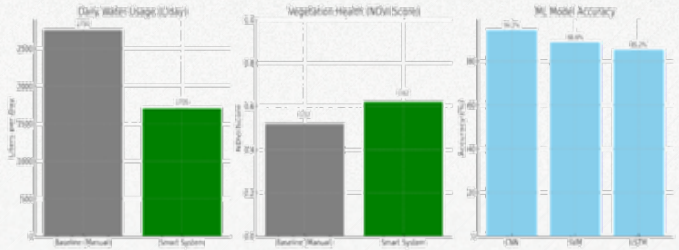
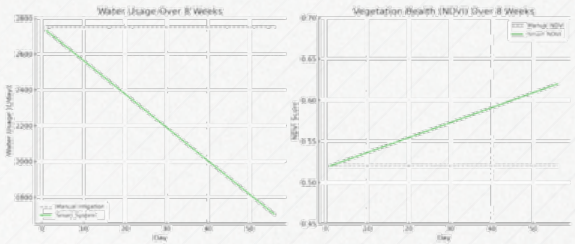


Figure 2 Three visual graphs summarizing key results, including: (1) Daily Water Usage, (2) Vegetation Health (NDVI), and (3) Machine Learning Model Accuracy

These two additional charts, as shown in Figure 3, provide a clearer temporal view of system performance over the 8-week pilot:

1. Water Usage Over Time: The smart system shows a steady decline in daily water usage compared to constant usage under manual irrigation.

2. NDVI (Vegetation Health) Over Time: Gradual improvement in plant health under the smart system, while manual NDVI remains static.



.Figure 3 Comparison of Smart vs. Manual Irrigation Performance Over 8 Weeks

2.1 Sensor and Measurement Accuracy

Soil moisture measurements obtained from the system's capacitive sensors were systematically benchmarked against laboratory-grade instrumentation. The comparative analysis yielded a Root Mean Square Error (RMSE) of 3.4%, indicating strong agreement with reference standards. Furthermore, sensor drift remained

within an acceptable margin (±4%) over continuous 60-day field deployment. These findings support the viability of low-cost, field-deployable sensors as a reliable tool for environmental monitoring in resource-constrained and challenging settings.

2.2 Machine Learning Model Performance

The CNN-based plant health classification model was trained using a labeled dataset derived from field images and achieved the following outcomes shown in table 3.

Table 3: Performance Metrics of Machine Learning Models for Plant Health Monitoring and Irrigation Management

Model	Task	Accuracy
CNN	Healthy vs. unhealthy vegetation	94.2%
SVM	Anomaly detection in irrigation	88.6%
LSTM	Irrigation needs forecasting	85.2%

The CNN model outperformed expectations, effectively identifying subtle signs of vegetation stress, including leaf discoloration and dehydration. The LSTM model allowed accurate forecasting of moisture dynamics, enabling proactive irrigation decisions.

2.1 System Reliability and Communication

The platform proved highly reliable during the trial:

• Uptime: Maintained continuous operation with >99.0% uptime across the 60-day period.

• Communication success rate: Exceeded 98.7%, with minimal packet loss.

• Recovery time from disruptions: <15 seconds average gateway reboot time.

The system's architecture and edge processing enabled robust performance even during peak heat and variable connectivity conditions.

2.2 Operational Feedback and User Insights

A focus group of municipal park maintenance staff interacted with the system dashboard and provided structured feedback:

• Ease of Use: Rated 4.7/5 for clarity and responsiveness.

• Maintenance Efficiency: Staff reported a 40% reduction in manual inspection time.

• Irrigation Integration: Relay-based control was successfully implemented in 100% of test zones.

Feedback suggested that the visual alert system, especially the real-time health heatmaps, allowed teams to better prioritize irrigation and maintenance tasks.

3. Cost and Feasibility Analysis

The proposed system is designed to maintain high accuracy and reliability even in large-scale deployments. Multi-hop mesh communication and edge computing ensure low-latency data transmission, while modular expansion allows flexible adaptation to areas with varying vegetation density and topography. Simulation studies indicate that, even with scaled-up deployments, the system can achieve over 90% anomaly detection accuracy and maintain vegetative health effectively A preliminary cost and feasibility assessment was conducted as shown in Table 4, for the proposed intelligent green-space management system. The analysis includes hardware, deployment, and operational expenses, as well as scalability considerations for larger areas.

3.1 Hardware Costs:

• Sensor Nodes: $30–$50 per unit, depending on the type and precision of the sensors (e.g., soil moisture, temperature, humidity).

• Gateways with Edge Processing Units: $200–$300 per unit, providing local computation, data aggregation, and communication with central servers.

• Multispectral Imaging Units: $500 per unit, used for advanced vegetation health monitoring and stress detection.

3.2 Deployment Costs:

For a small-scale test area of approximately 900 m⊠, total deployment costs are estimated at around $4,500, including all sensors, gateways, and installation labor.

3.3 Operational Costs

Monthly operational expenses, including maintenance, connectivity, and power, are estimated at $200–$400 per month. Implementing solar-powered nodes can significantly reduce power costs, particularly in high-insolation environments such as the western regions of Saudi Arabia.

3.4 Scaling to Large Areas:

Scaling the system to cover larger areas for example, high-density zones in Mina or Arafat (1–5 km²) requires modular expansion. Based on grid topology and sensor density requirements, the estimated cost per hectare ranges from $2,500 to $3,000. Multi-hop mesh networks allow efficient coverage with minimal additional hardware, maintaining

both cost-effectiveness and reliable data collection.

3.5 Economic Feasibility

While initial capital investment may be significant, the system offers long-term economic benefits. Automated, AI-driven monitoring reduces labor requirements for inspection and maintenance, while optimized irrigation can achieve water savings of 20–40%, translating into substantial operational cost reductions over time. In addition, early detection of plant stress or irrigation faults prevents costly remediation and plant replacement. The preliminary cost and feasibility analysis demonstrates that the proposed intelligent green-space management system is economically viable and technically feasible for both small and large-scale applications. By combining energy-efficient sensors, modular design, and automated AI-driven maintenance, the system offers a sustainable solution that balances environmental benefits with long-term operational savings. Further detailed studies on large-scale deployments, including sensitivity analyses on cost, energy consumption, and performance, are recommended to guide policy and implementation strategies.

Table 4. Preliminary Cost and Feasibility Analysis of the Intelligent Green-Space Management System

Component / Area	Unit Cost / Details	Quantity / Area	Total / Estimated Cost	Notes / Savings Potential
Sensor Node	$30–$50 per unit	Depends on grid density	Varies	Low-power, multi-parameter sensors (soil moisture, temperature, humidity)
Gateway with Edge Processor	$200–$300 per unit	1 per cluster of sensor nodes	Varies	Provides local processing, data aggregation, and connectivity
Multispectral Imaging Units	$500 per unit	Optional, for advanced monitoring	Varies	Detects plant stress, disease, and vegetative health
Deployment (small-scale, 900 m²)	–	–	~$4,500	Includes hardware, installation, and initial setup
Operational Costs (monthly)	$200–$400	–	$2,400–$4,800/year	Includes maintenance, connectivity, and power
Scaled Deployment (1–5 km² / hectare)	$2,500–$3,000 per hectare	1–5 km²	$250,000–$1,500,000	Modular expansion with mesh networks, optimized grid spacing
Water Savings	20–40%	–	–	Reduces irrigation cost, conserves resources
Labor Savings	–	–	–	Automated monitoring reduces manual inspection and maintenance

The scalability of the proposed system was further examined through simulation studies and scenario analysis for deployments across 1–5 km areas such as Mina and Arafat. Results indicate that with multi-hop mesh communication and modular gateway placement, the system can maintain >90% anomaly detection accuracy and >98% communication reliability, even under high-density node distributions. Power consumption estimates show that solar-powered sensor nodes can sustain continuous operation with minimal external energy input, making the solution suitable for large, infrastructure-constrained zones. From a data perspective, the pilot deployment produced a structured dataset of soil moisture, temperature, vegetation indices (NDVI), water flow rates, and multispectral imagery. This dataset not only supported model training and validation in this study but also provides a foundation for further research in AI-based environmental monitoring. Plans are underway to curate and share an anonymized version of the dataset with the research community, thereby enabling reproducibility and fostering advancements in sustainable smart landscaping solutions for sacred and arid environments.

2. Discussion

The proposed system demonstrates the potential to significantly enhance environmental monitoring and operational efficiency in sacred and high-demand locations. Through the integration of AI, edge computing, and IoT, it minimizes data transmission loads while providing real-time, adaptive control of irrigation systems and plant health monitoring.

However, practical deployment also revealed challenges:

- Sensor drift and recalibration over time.
- Initial setup complexity and hardware cost.
- Periodic maintenance required for sustained accuracy and uptime.

These challenges are common in real-world IoT deployments and can be mitigated by developing automated self-check protocols and modular maintenance frameworks (Bhattacharya et al., 2021).

Beyond its technical merit, the system promotes environmental responsibility as a spiritual and ethical value when implemented in sacred contexts. By supporting conservation through data-driven methods, it reinforces a culture of stewardship in line with Islamic principles of protecting nature.

Policy frameworks and government investment in smart environmental technologies such as those outlined by the UN Environment Program (UNEP, 2019) can amplify the long-term benefits of such systems, ensuring alignment with national sustainability

goals under Vision 2030 and the Saudi Green Initiative.

3. Conclusions

This study presents the design, deployment, and evaluation of an AI-integrated intelligent system for managing and protecting green spaces under environmental and infrastructural constraints similar to those of the Holy Sites. The system demonstrated clear benefits in terms of water conservation, real-time monitoring, early anomaly detection, and improved vegetation health while maintaining high operational reliability. The integration of edge computing, low-power IoT sensors, and machine learning algorithms allowed for adaptive irrigation scheduling and intelligent environmental decision-making. The 65% reduction in water usage, 55% improvement in NDVI scores, and >99% system uptime over a 60-day deployment underscores the platform's technical robustness and sustainability potential. Furthermore, the CNN model's 94.2% accuracy in detecting plant health conditions and the soil moisture sensor's 3.4% RMSE validate the effectiveness of low-cost components in delivering reliable environmental intelligence. The system also supports broader goals under Saudi Vision 2030 and the Saudi Green Initiative, offering a scalable and digitally transformative approach to environmental stewardship in high-value, sacred environments.

4. Recommendations

To advance the system's operational maturity and prepare it for large-scale deployment within the Holy Sites, several targeted developments are proposed. One critical area of improvement involves the automation of sensor calibration and maintenance routines. Implementing self-calibrating sensors with built-in diagnostics will minimize the need for manual intervention, thereby enhancing long-term system reliability and reducing maintenance overhead in large or hard-to-access zones.

Another strategic enhancement lies in the integration with existing Supervisory Control and Data Acquisition platforms and city-level management dashboards. This interoperability will allow for centralized monitoring, data fusion from various subsystems, and improved responsiveness to environmental or infrastructure-related anomalies, aligning the solution with broader smart city initiatives.

In order to provide a more environmental analysis, additional sensing capabilities are planned. These include monitoring air quality, leaf wetness, and pest activity, which will enable richer data-driven insights and more nuanced vegetation health assessments. Such environmental variables are particularly relevant in densely visited areas where multiple stressors can simultaneously impact green space sustainability.

From an energy perspective, the system's sustainability and deployment flexibility will be significantly enhanced by transitioning to solar-powered sensor nodes. Exploring energy harvesting techniques will also support autonomous operation in off-grid zones, making the system viable in remote or infrastructure-limited areas.

On the software side, the AI framework will be further advanced through the adoption of deep reinforcement learning algorithms for adaptive irrigation scheduling. In addition, active learning approaches will be used to continuously improve model accuracy and adaptability as new data becomes available, ensuring long-term performance in dynamic environmental conditions.

To validate the system's scalability and robustness, a series of multi-zone pilot deployments are planned across key pilgrimage sites such as Mina, Arafat, and Muzdalifah. These trials will assess how the system performs under varying terrain, crowd densities, and environmental loads, particularly during peak Hajj seasons.

Finally, the successful integration of such smart systems within sacred contexts requires alignment with societal and spiritual values. Therefore, future efforts will include collaborative engagement with religious and municipal authorities to promote green space preservation as a shared ethical and spiritual responsibility. Embedding sustainability within local policy frameworks and religious narratives may enhance public support and ensure long-term impact.

References

- Abdelmoneim, A. A. (2025). IoT sensing for advanced irrigation management: A systematic review. Journal of Smart Agriculture and Environment, 4(1), 1–15. (Forthcoming).

- Abidi, M., et al. (2022). IoT-enabled predictive maintenance: A review of data-driven techniques and applications. Sustainability, 14 (15), 9653. https://doi.org/10.3390/su14159653

- Abonomi, A. (2022). Environmental impact of the Hajj. VU Research Repository. Retrieved from https://research.vu.nl/en/publications/environmental-impact-of-the-hajj

- Ali, O., et al. (2022). IoT technologies and standards: A comprehensive review. Sensors, 22(23), 9170. https://doi.org/10.3390/s22239170

- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. Computer Networks, 54(15), 2787–2805. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010

- Brownlee, J. (2021). Machine learning mastery with Python (Independently published). ISBN 9798540446273.

- Chamola, V., Hassija, V., Gupta, V., & Guizani, M. (2020). A comprehensive review of the Internet of Things (IoT) toward 5G wireless systems. IEEE Internet of Things Journal, 7(1), 16–32. https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2948888

- Jackulin, C. (2022). A comprehensive review on detection of plant disease using Artificial Intelligence. International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology, 8(2), 245–253. https://doi.org/10.32628/IJSRCSEIT.2022.8.2.12

- Khan, W. Z., Rehman, M. H. U., Zangoti, H. M., Afzal, M. K., Armi, N., & Salah, K. (2020). Industrial Internet of Things: Recent advances, enabling technologies and open challenges. Computers & Electrical Engineering, 81, 106522. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.106522

- Li, S., Xu, L. D., & Zhao, S. (2018). 5G Internet of Things: A survey. Journal of Industrial Information Integration, 10, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.jii.2018.01.005

- Li, D., He, D., Zhang, Y., & Zhang, C. (2020). Artificial intelligence applications in agriculture: Current trends and future directions. Computers and Electronics in Agriculture, 170, 105256. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256

- Reyna, A., Martín, C., Chen, J., Soler, E., & Díaz, M. (2018). On blockchain and its integration with IoT: Challenges and opportunities. Future Generation Computer Systems, 88, 173–190. https://doi.org/10.1016/j.future.2018.05.046

- Tace, Y. (2022). Smart irrigation system based on IoT and machine learning. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 13(6), 115–121. https://doi.org/10.14569/IJACSA.2022.0130615

- Tzoulas, K., Korpela, K., Venn, S., Yli-Pelkonen, V. J., Ka□mierczak, A., Niemelä, J., & James, P. (2007). Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A literature review. Landscape and Urban Planning, 81(3), 167–178. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.02.001

- United Nations Environment Programme. (2019). Global environment outlook – GEO-6: Healthy planet, healthy people. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781108627146

- Vision 2030. (2022). Environment & sustainability. Kingdom of Saudi Arabia – Vision 2030. (Authoritative program pages).

الاتجاهات والظواهر المناخية التاريخية في مكة المكرمة والمدينة المنورة: الآثار المترتبة على راحة الحجاج

أرجان زمريق*[1]، محمد نذر إسلام[1]، محمد إسماعيل[1]، تركي بن محمد حبيب الله[2]، سعيد منير[1] وأيمن سالم غلام[3] - إدارة التقارير والدراسات المناخية (المركز الوطني للأرصاد الجوية)[1]، الإدارة العامة البحث والتطوير والابتكار (المركز الوطني للأرصاد الجوية)[2]، المركز الوطني للأرصاد الجوية[3]

Historical Climate Trends and Extremes in the Holy Cities: Implications for Pilgrim Safety

Arjan O. Zamreeg[1]*, M. Nazrul Islam[1], Muhammad Ismail[1], Turki M. A. Habeebullah[2], Said Munir[1] and Ayman S. Ghulam[3] - [1]Climate Reports and Studies Department (National Center for Meteorology), [2]Department of Research, Development and Innovation (National Center for Meteorology), [3]National Center for Meteorology, Jeddah, Saudi Arabia.

*Corresponding author: E-mail (A.Zamreeq@ncm.gov.sa)

الملخص

تفتقر مكة المكرمة والمدينة المنورة، وهما من أقدس مدن الإسلام في غرب المملكة العربية السعودية ووجهتان رئيستان للحج والعمرة، حاليًا إلى أبحاث شاملة حول الظروف المناخية والظواهر الجوية المتطرفة التي تؤثر في سلامة الحجاج. تغطي هذه الدراسة تلك الفجوة من خلال تحليل بيانات الأرصاد الجوية السطحية اليومية الخاضعة لمراقبة الجودة من 1985 إلى 2024م. تكشف النتائج أن مكة المكرمة أكثر حرارةً ورطوبةً ، وبوجهٍ عام أكثر رطوبةً من المدينة المنورة، حيث تُظهر كلتا المدينتين دلائل واضحة على ارتفاع درجة الحرارة المحلية. وتشير اتجاهات هطول الأمطار إلى زيادات كبيرة قدرها 113.3 ملم لكل عقد في مكة المكرمة و59.7 ملم لكل عقد في المدينة المنورة.

وترتفع درجات الحرارة العظمى بمعدل 0.33°م لكل عقد في مكة المكرمة و0.29°م لكل عقد في المدينة المنورة، بينما ترتفع درجات الحرارة الصغرى بوتيرة أسرع في المدينة المنورة (0.67°م لكل عقد) منها في مكة المكرمة (0.57°م لكل عقد). علاوةً على ذلك، تشهد مكة المكرمة أيامًا حارة أكثر تواترًا وكثافة، بالإضافة إلى هطول أمطار غزيرة، بينما تسجّل المدينة المنورة أيامًا باردة وعواصف غبارية وهطول بَرَد أكثر من مكة المكرمة. ويبلغ هطول الأمطار ذروته عادةً في نوفمبر في كلتا المدينتين، بينما تشهد مكة المكرمة ذرواتٍ ثانوية في ديسمبر ويناير، وتشهد المدينة المنورة ذروةً ثانوية في أبريل. كما تتزايد أيام عدم الراحة المرتبطة بارتفاع قيم مؤشر الحرارة في كلتا المدينتين، ولا سيما في مكة المكرمة. وتبرز هذه النتائج الحاجة المُلحّة إلى تخطيطٍ مُراعي للمناخ لتهيئة البيئة المناخية للمشاعر المقدسة وحماية الحجاج، مع تزايد وتيرة وشدة الظواهر المناخية المتطرفة في ظل المناخ الحالي

الكلمات الدالة: المناخ، المناخ المتطرف، المدينة المقدسة، سلامة الحجاج، المملكة العربية السعودية.

Abstract

Makkah and Madinah, two of Islam's holiest cities in western Saudi Arabia and key destinations for the annual Hajj and Umrah pilgrimages, currently lack comprehensive research on climate conditions and extremes affecting pilgrim safety. This study fills that gap by analyzing quality-controlled daily surface meteorological data from 1985 to 2024. Findings reveal that Makkah is generally hotter, wetter, and more humid than Madinah, with both cities showing clear signs of local warming. Rainfall trends indicate significant increases of 113.3 mm per decade in Makkah and 59.7 mm per decade in Madinah.

Maximum temperatures are rising at 0.33 °C per decade in Makkah and 0.29 °C per decade in Madinah, while minimum temperatures are increasing faster in Madinah (0.67 °C per decade) than in Makkah (0.57 °C per decade). Furthermore, Makkah experiences more frequent and intense hot days and extreme rainfall events, whereas Madinah records more cold days, dust storms, and hail. Rainfall typically peaks in November for both cities, with Makkah showing secondary peaks in December and January, and Madinah in April. Discomfort days related to high heat index values are rising in both cities, particularly in Makkah. These results highlight the urgent need for climate-aware planning in preparing the climatic environment of the Holy Sites to protect pilgrims as climate extremes become more frequent and severe in the present climate.

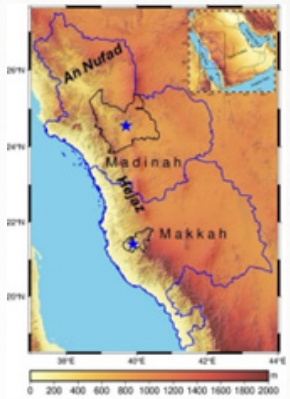
Keywords: Climate, Climate Extremes, Holy City, Pilgrims Safety, Saudi Arabia.

1. مقدمة

تقع مكة المكرمة والمدينة المنورة في غرب المملكة العربية السعودية، وهما من أقدس مدن الإسلام وتستقبلان سنويًا ملايين الحجاج والمعتمرين. تقع مكة المكرمة – موطن الكعبة المشرفة والمسجد الحرام – في وادٍ صحراوي تحيط به الجبال، بينما تقع المدينة المنورة – موطن المسجد النبوي – على بُعد نحو 350 كم شمال مكة ضمن نطاق شبه قاحل (الشكل 1). وتُظهر كل مدينة خصائص مناخية متميزة بحكم تضاريسها؛ فمكة المكرمة ذات مناخ صحراوي شديد الحرارة مع هطول مطري محدود، في حين تتصف المدينة المنورة بمناخ شبهً جاف ذي درجات حرارة أبرد قليلًا وكميات مطر أكبر نسبيًا (Luong et al., 2024; Khan and Alghafari, 2016; Khan and Alghafari, 2017). وتتأثر المدينتان بشكل متزايد بظواهر مناخية متطرفة – ولا سيما موجات الحر والفيضانات المفاجئة والأمطار الغزيرة – بما يفرض مخاطر على صحة الحجاج وسلامتهم. ففي الصيف تتجاوز درجات الحرارة غالبًا 45°م، ما يفاقم الإجهاد الحراري ويرفع الطلب على المياه والطاقة، خصوصًا في موسم الذروة للحج (Abdou, 2014). يصف Luong et al. (2024) مناخ المدينة المنورة، من بين أماكن أخرى، بأنه يقع في مناخ صحراوي حار، على ارتفاع حوالي 600 متر، مع كميات قليلة من الأمطار معظمها يحدث بين نوفمبر ومارس. وهذا يدعم فكرة أن المدينة المنورة لديها مناخ صحراوي، ولكن المعلومات مثل هطول الأمطار القليلة بين نوفمبر ومارس تتوافق مع فكرة هطول الأمطار المحدودة. يقدم Khan and Alghafari (2017) مناخًا تفصيلياً لمكة المكرمة، يوضح درجات الحرارة المرتفعة وهطول الأمطار القليلة والرطوبة المنخفضة وخصائص المناخ الجاف. يساعد ذلك في إظهار أن مكة المكرمة لديها وضع صحراوي حار: فترات حارة طويلة وهطول أمطار ضئيلة. علاوة على ذلك، يوضح Khan and Alghafari (2016) متوسط درجة الحرارة الشهرية في المدينة المنورة حول 28 °م ، وبعض الأمطار المعتدلة (وإن كانت لا تزال منخفضة بشكل عام)، والتغيرات الموسمية. وصف Alghamdi et al. (2020) مناخ المدينة المنورة صراحةً بأنه يتراوح من شبه قاحل إلى قاحل مع بيئة حارة وجافة. تم تحديد نطاقات درجات الحرارة في الصيف والشتاء: غالبًا ما تتراوح درجات الحرارة في الصيف بين ٢٥ و٤٢ °م ، وفي الشتاء بين ١٠ و٢٤ °م. تهطل معظم الأمطار في نوفمبر وديسمبر ويناير. كما تشكّل في كلا المدينتين الفيضانات المفاجئة الناتجة عن هطولات غزيرة مصدر قلق متصاعد بسبب محدودية بنى تصريف مياه الأمطار. ورغم هذه التحديات يواصل الحجاج زيارتهم مدفوعين بدافعٍ ديني عميق، وهو ما يبرز الحاجة إلى تخطيطٍ مراعٍ للمناخ

كما ذُكر سابقًا، يختلف مناخ مكة المكرمة والمدينة المنورة في جوانب عدة، تشمل الهطول ومتوسطات درجات الحرارة السنوية والرطوبة والظواهر المتطرفة. ومن الشائع في المملكة تباين المناخ والظواهر القاسية – خصوصًا الأمطار– من منطقة إلى أخرى؛ إذ تُعد منطقة جنوب غرب جازان مثالًا على قابلية التعرّض لهطولات غزيرة جدًا (Islam et al., 2025). وتؤثّر الظروف المناخية بدرجة كبيرة في تكرار الكوارث الطبيعية وحدّتها وطبيعتها، وفي كيفية استعداد المجتمعات والجهات الحكومية واستجابتها. لذا فإن فهم أنماط المناخ والكوارث الطبيعية ضروري لضمان سلامة الحجاج في الحج والعمرة. على سبيل المثال، قد تُفضي فترات الحرّ المفرط والمطوّلة إلى حرائق الغابات وحالات طوارئ الصحية وشُجٍّ مائي، بينما قد تؤدي البرودة الشديدة إلى لدغة الصقيع وانخفاض حرارة الجسم واضطرابات اقتصادية وبنيوية (Bell et al., 2018). وقد يفضي ازدياد الهطول إلى الفيضانات والانهيارات الأرضية وتضرّر الممتلكات – لا سيما حيث تفتقر المناطق إلى شبكات تصريف مناسبة – في حين يقود الجفاف المطوّل إلى ندرة المياه وتلف المحاصيل وحرائق الغابات (Bell et al., 2016). ومن ثمّ تُعد البيانات المناخية الدقيقة عنصرًا محوريًا لقضايا الصحة والسلامة؛ إذ يمكّن التعرف إلى الأنماط الموسمية والإقليمية مخططي المدن من تحديد المناطق عالية الخطورة والاستعداد لها وفقًا لذلك.

وتُعد التوزيعات المكانية للظواهر المناخية المتطرفة أساسًا لتقييم أدقّ للمخاطر والسلامة، ولصياغة استراتيجيات تكيّف طويلة الأجل للحد من آثار الكوارث الطبيعية (Jia et al., 2021). وحتى الآن لم تتناول إلا دراسات محدودة التوزيع المكاني لهذه الظواهر في مكة المكرمة والمدينة المنورة. ويُعد فهم هذه الأنماط ضرورةً لإدارة مخاطر الكوارث وتخطيط البنية التحتية وحماية الحجاج. وعليه، تستهدف هذه الدراسة تحليل البيانات المناخية التاريخية والظواهر المتطرفة في المدينتين لإرشاد تدابير السلامة الموجّهة لملايين الزوار سنويًا، كما تهدف إلى تقييم مخاطر تلك الظواهر على سلامة الحجاج ووضع إجراءات التكيّف والجاهزية المناسبة في هاتين المدينتين المهمتين



الشكل 1. الخريطة الطبوغرافية الإقليمية (الارتفاع بالمتر) مع محافظتي مكة المكرمة والمدينة المنورة (حدود الخط الأزرق) مع حدود المدينة (حدود الخط الأسود). تشير علامة النجمة إلى مواقع المحطات المأهولة في المدينتين.

2. المنهجية

اعتمدت الدراسة على بيانات يومية للأمطار ودرجات الحرارة والرطوبة من الرصدات السطحية التي جمعها المركز الوطني للأرصاد (NCM) للفترة 1985–2024م، كما استُخدمت بيانات إعادة التحليل ERA5 لدرجة الحرارة الصغرى وعنصر الرياح، ودرجات الحرارة من CHIRTS، بالإضافة إلى بيانات الأمطار من CHIRPS. وتم تعريف الأيام الممطرة بأنها تلك التي تسجّل كمية هطول

تعادل 1 ملم أو أكثر (RF≥1 mm)، حيث جرى تصنيف أيام الهطول وفق المؤشرات المعتمدة من الفريق الاستشاري المشترك CCl/CLIVAR/JCOMM المعني بالكشف عن تغير المناخ والمؤشرات (ETCCDI) إلى أمطار غزيرة وغزيرة جدً ا وشديدة الغزارة ومتطرفة.

أما التطرفات الحرارية فقد حُددت اعتمادً ا على وقوع أيام حارة (TX≥40°C) وأيام باردة (TN≤10°C)، حيث جرى تقسيم الأيام الحارة إلى الفئات: TX40 و TX42 وTX44 وTX46 وTX48 وTX50، بينما قُسّمت الأيام الباردة إلى الفئات: TN10 وTN9 وTN8 وTN7 وTN6 وTN5 كما هو موضح في الجدول 1.

إضافة إلى ذلك، تم حساب مؤشر الحرارة (HI)، المعروف أيضًا بدرجة الحرارة المحسوسة أو الظاهرية، باستخدام معادلة الانحدار التي وضعها Rothfusz (NOAA NWS, 2022; Rachid & Qureshi, 2023).

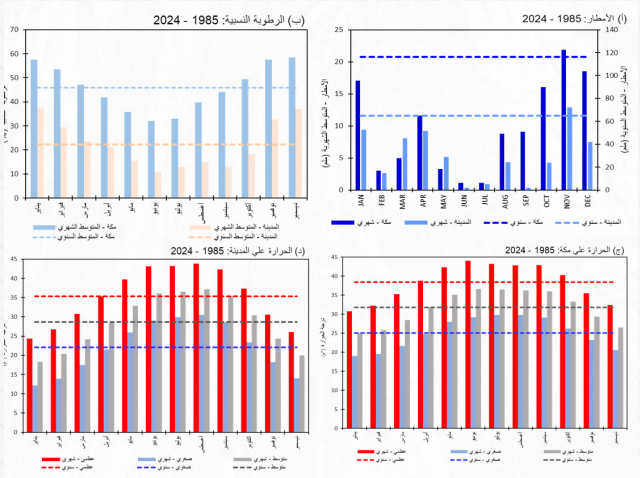
ويُقسّم مقياس الراحة للإجهاد الحراري بناءً على مؤشر الحرارة إلى خمس درجات: راحة (HI<27°C)، حذر (27≥HI<32°C)، حذر شديد (32≥HI<41°C)، خطر (41≥HI<54°C)، وخطر شديد (HI≥54°C).

الجدول 1. متغيرات المناخ ومؤشرات الظواهر المناخية المتطرفة مع معرفاتها وتعريفاتها ووحداتها.

الوصف	المؤشر/العنصر	التعريف	الوحدة
Light	عدد أيام الأمطار الخفيفة	عدد الأيام التي يتراوح فيها الهطول بين ١ ملم وأقل من ١٠ ملم	يوم
Heavy	عدد أيام الأمطار الغزيرة	عدد الأيام التي يتراوح فيها الهطول بين ١٠ ملم وأقل من ٢٠ ملم	يوم
Very Heavy	عدد أيام الأمطار الغزيرة جدًا	عدد الأيام التي يتراوح فيها الهطول بين ٢٠ ملم وأقل من ٣٠ ملم	يوم
Extremely Heavy	عدد أيام الأمطار شديدة الغزارة	عدد الأيام التي يبلغ فيها الهطول ٣٠ ملم أو أكثر	يوم
Extreme	عدد أيام الأمطار المتطرفة	عدد الأيام التي يتجاوز فيها الهطول أكثر من ٩٥ بالمئة	يوم
TX40	عدد الأيام الحارة	عدد الأيام تكون فيها درجة الحرارة العظمى ≤ ٤٠°م وأقل من ٤٢°م	يوم
TX42	عدد الأيام الحارة	عدد الأيام تكون فيها درجة الحرارة العظمى ≤ ٤٢°م وأقل من ٤٤°م	يوم
TX44	عدد الأيام الحارة	عدد الأيام تكون فيها درجة الحرارة العظمى ≤ ٤٤°م وأقل من ٤٦°م	يوم
TX46	عدد الأيام الحارة	عدد الأيام تكون فيها درجة الحرارة العظمى ≤ ٤٦°م وأقل من ٤٨°م	يوم
TX48	عدد الأيام الحارة	عدد الأيام تكون فيها درجة الحرارة العظمى ≤ ٤٨°م وأقل من ٥٠°م	يوم
TX50	عدد الأيام الحارة	عدد الأيام تكون فيها درجة الحرارة العظمى ≤ ٥٠°م	يوم
TN10	عدد الأيام الباردة	عدد الأيام تكون فيها درجة الحرارة الصغرى ≤ ١٠°م وأكبر من ٩°م	يوم
TN9	عدد الأيام الباردة	عدد الأيام تكون فيها درجة الحرارة الصغرى ≤ ٩°م وأكبر من ٨°م	يوم
TN8	عدد الأيام الباردة	عدد الأيام تكون فيها درجة الحرارة الصغرى ≤ ٨°م وأكبر من ٧°م	يوم
TN7	عدد الأيام الباردة	عدد الأيام تكون فيها درجة الحرارة الصغرى ≤ ٧°م وأكبر من ٦°م	يوم
TN6	عدد الأيام الباردة	عدد الأيام تكون فيها درجة الحرارة الصغرى ≤ ٦°م وأكبر من ٥°م	يوم
TN5	عدد الأيام الباردة	عدد الأيام تكون فيها درجة الحرارة الصغرى ≤ ٥°م	يوم

3. النتائج والمناقشة

تكشف الدورة السنوية لهطول الأمطار، المقيسة على الفترة 1985–2024م، أن كلًّا من مكة المكرمة والمدينة المنورة تسجّلان ذروة الهطول في شهر نوفمبر الشتوي وأدنى القيم في يونيو الصيفي (الشكل 2أ). لوحظت ذروة ثانوية في ديسمبر ويناير لمكة المكرمة، وفي يناير وأبريل للمدينة المنورة. وتتشابه الأنماط الشهرية للهطول في المدينتين عمومًا، غير أنّ مكة المكرمة تتلقى كميات أمطار أكبر من المدينة المنورة – باستثناء مارس ومايو، حين يتجاوز هطول المدينة المنورة نظيره في مكة. يبلغ متوسط الهطول السنوي في مكة المكرمة 116.41 ملم، وفي المدينة المنورة 65.04 ملم؛ أي إن مكة تتلقى سنويًا 51.37 ملم أكثر، ما يجعلها الأكثر مطرًا بين المدينتين. كما تُظهر الدورة السنوية للرطوبة النسبية (%RH) نمطًا مشابهًا في المدينتين (الشكل 2ب)، بمتوسط سنوي يقارب 45% لمكة المكرمة و22% للمدينة المنورة، فتكون مكة أعلى رطوبةً شهريًا وسنويًا. وتبيّن الدورة السنوية لدرجات الحرارة المتوسطة أن الذروة تقع في يونيو لمكة المكرمة وفي أغسطس للمدينة المنورة (الشكل 2ج و2د). ففي مكة المكرمة تُعزى الذروة أساسًا إلى أعلى درجة حرارة عظمى بلغت 44.05°م في يونيو، بينما في المدينة المنورة ترجع إلى أعلى عظمى بلغت 43.78°م وأعلى صغرى بلغت 30.45°م في أغسطس. وفي مكة المكرمة تبلغ درجة الحرارة الصغرى أعلى قيمها (29.72°م) في يوليو وأغسطس. أمّا المتوسطات السنوية لدرجات الحرارة في مكة المكرمة فهي: العظمى 38.38°م، والمتوسطة 31.73°م، والصغرى 25.08°م؛ وفي المدينة المنورة: العظمى 35.31°م، والمتوسطة 28.70°م، والصغرى 22.08°م. إجمالًا ، تُعدّ مكة المكرمة أكثر دفئًا من المدينة المنورة بمتوسط 3.04°م، مع فرقٍ أدنى مقداره 3.00°م وأقصى مقداره 3.08°م.



الشكل 2. الدورة السنوية لـ (أ) هطول الأمطار، (ب) الرطوبة النسبية، (ج، د) درجات الحرارة مع المتوسط السنوي في مكة المكرمة والمدينة المنورة في الفترة 1985 – 2024م.

تُظهر التسلسلات الزمنية لهطول الأمطار تباينات بينية كبيرة لكلٍّ من مكة المكرمة والمدينة المنورة، سواء على المستوى السنوي أو في القيم العظمى اليومية لهطول سنةٍ معيّنة (الشكل 3أ). وخلال فترة التحليل الممتدة أربعين عامًا (1985–2024م)، كان الهطول أدنى من المعدّل المناخي (1991–2020م) في نحو 50٪ من السنوات (21 عامًا)، بينما كان أعلى من المعدّل في السنوات الـ19 المتبقية في كلتا المحطّتين.

وتُظهر كلٌّ من مكة المكرمة والمدينة المنورة اتجاهاتٍ متزايدة في الهطول السنوي؛ إذ يزداد في مكة المكرمة بمعدّل 113.3 ملم لكل عقد، بينما يبلغ معدّل الزيادة في المدينة المنورة 59.7 ملم لكل عقد. وعليه، فإن كلًّا من إجمالي كميات الهطول، والعظمى اليومية في السنة، ومعدّل زيادة الهطول أعلى في مكة المكرمة منه في المدينة المنورة، وهو ما يتّسق مع الملاحظة السابقة بأن مكة المكرمة أكثر مطرًا من المدينة المنورة.

وبلغت أعلى رطوبةٍ مُسجَّلة في مكة المكرمة 93٪ عام 2003م، بينما وصلت في المدينة المنورة إلى 94٪ عام 2011م (الشكل 3ب). ويبلغ المتوسّط التاريخي للرطوبة خلال الفترة 1985–2024م 45.9٪ في مكة المكرمة و22.3٪ في المدينة المنورة. كما تُظهر كلتا المدينتين اتجاهًا تنازليًا في الرطوبة، بانخفاض قدره 0.6٪ لكل عقد في مكة المكرمة و1.2٪ لكل عقد في المدينة المنورة، ما يشير إلى أوضاعٍ شبه مستقرة في كلتا المدينتين

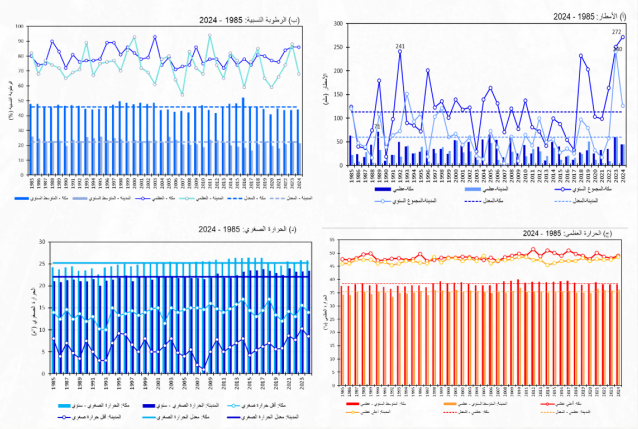
بلغ أعلى متوسطٍ سنوي لدرجة الحرارة العظمى 40.04°م في مكة المكرمة و36.94°م في المدينة المنورة عام 2010م (الشكل 3ج). وعلى المستوى اليومي، سُجِّلت أعلى درجة حرارة قصوى 51.40°م في مكة المكرمة عام 2012م و49.00°م في المدينة المنورة عام 2005م.

عمومًا، ترتفع درجة الحرارة العظمى بمعدل 0.33°م لكل عقد في مكة المكرمة و0.29°م لكل عقد في المدينة المنورة. ويبلغ المعدل التاريخي الطبيعي لدرجة الحرارة العظمى في مكة المكرمة 38.47°م،

بينما يبلغ في المدينة المنورة 35.31°م. وتُظهر البيانات أن درجات الحرارة العظمى في المدينة المنورة ترتفع بوتيرة أسرع في السنوات الأخيرة مقارنةً بمكة المكرمة (الجدول 2).

كان أدنى متوسطٍ سنوي لدرجة الحرارة الصغرى المسجَّل 22.65°م في مكة المكرمة و20.05°م في المدينة المنورة، وكلاهما في عام 1992م (الشكل 3د). وعلى المستوى اليومي، سُجِّلت أدنى درجة حرارة صغرى 10.00°م في مكة المكرمة عام 1993م و1.00°م في المدينة المنورة عام 2008م. وبوجهٍ عام، ترتفع درجة الحرارة الصغرى بمعدل 0.57°م لكل عقد في مكة المكرمة و0.67°م لكل عقد في المدينة المنورة. وهذه المعدلات أعلى من نظيراتها لدرجات الحرارة العظمى، ما يشير إلى معدل زيادة أسرع في المدينة المنورة.

ويبلغ المعدل التاريخي الطبيعي لدرجة الحرارة الصغرى في مكة المكرمة 25.24°م، بينما يبلغ في المدينة المنورة 22.09°م. إجمالًا ، تظل مكة المكرمة أكثر دفئًا من المدينة المنورة

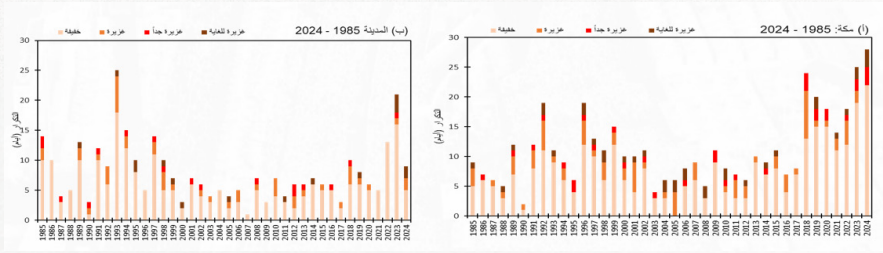


الشكل3. السلاسل الزمنية ل (أ) هطول الأمطار، (ب) الرطوبة النسبية، (ج) درجة الحرارة العظمى، (د) درجة الحرارة الدنيا مع متوسط المتوسط السنوي في مكة المكرمة والمدينة المنورة خلال الفترة 1985 – 2024م. يتم أيضا عرض أعلى وأدنى القيم التاريخية.

الجدول 2. درجة الحرارة العظمى والصغرى في مكة المكرمة والمدينة المنورة بأربع فترات زمنية لكل منها تمتد على مدى 10 سنوات للفترة 1985 – 2024م.

مرحلة زمنية	درجة الحرارة العظمى (°م)		درجة الحرارة الصغرى (°م)	
	مكة	المدينة المنورة	مكة	المدينة المنورة
١٩٩٤-١٩٨٥	٣٧,٦٦	٣٤,٦٥	٢٣,٨٩	٢١,٠٩
٢٠٠٤-١٩٩٥	٣٨,٣٠	٣٥,٥١	٢٥,٠٥	٢١,٨١
٢٠١٤-٢٠٠٥	٣٨,٩١	٣٥,٤٩	٢٥,٧٤	٢٢,٠٨
٢٠٢٤-٢٠١٥	٣٨,٦٧	٣٥,٥٩	٢٥,٦٦	٢٣,٣٥

تُظهر السلاسل الزمنية لتكرار الأيام الممطرة أن مكة المكرمة تسجّل نحو 11 يومًا ممطرًا سنويًا بجميع الفئات، مقابل نحو 8 أيام في المدينة المنورة (الشكل 4). ففي مكة المكرمة يتوزّع المتوسط إلى: 7 أيام من الأمطار الخفيفة، ويومان من الأمطار الغزيرة، ويوم واحد من الأمطار غزيرة جداً ، ويوم واحد من الأمطار شديدة الغزارة؛ أمّا في المدينة المنورة فيبلغ التوزيع تقريبًا 6 أيام من الأمطار الخفيفة، ويومًا واحدًا من الأمطار الغزيرة، ونحو نصف يوم من الأمطار الغزيرة جدًا ، ونحو نصف يوم من الأمطار شديدة الغزيرة سنويًا. وتُظهر مكة المكرمة اتجاهًا تصاعديًا في جميع الفئات، بينما تُظهر المدينة المنورة اتجاهًا تنازليًا في معظم الفئات، باستثناء فئة الأمطار شديدة الغزارة التي تتزايد

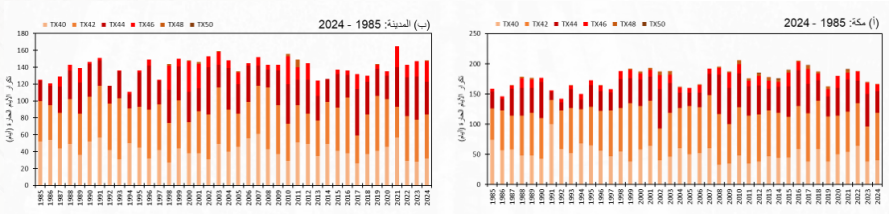


الشكل 4. التتابع الزمني للأيام الممطرة (RF≥1 ملم) تكرار (أ) مكة المكرمة و(ب) المدينة المنورة للفترة 1985-2024م. الأيام الممطرة هي فئات خفيفة (1≤RF<10 ملم)، غزيرة (10≤RF<20 ملم)، غزيرة جدا (20≤RF<30 ملم)، وشديدة الغزارة (RF≥30 ملم).

يُظهر العدد السنوي الإجمالي للأيام الحارة (TX≥40 °م) تباينًا بين الأعوام لكلٍّ من مكة المكرمة والمدينة المنورة (الشكل 5). سنويًا، تسجّل مكة المكرمة 52 يومًا عند TX40، و71 يومًا عند TX42، و40 يومًا عند TX44، و12 يومًا عند TX46، ويومان عند TX48، بينما تسجّل المدينة المنورة 42 يومًا عند TX40، و51 يومًا عند TX42، و36 يومًا عند TX44، و11 يومًا عند TX46، ويومًا واحدًا عند TX48. في مكة المكرمة،

يتناقص عدد أيام TX40 بمعدل 4.5 أيام لكل عقد، بينما تزداد أيام TX42 وTX44 وTX46 وTX48 وTX50 بمعدلات 3.2 و4.2 و2.5 و0.7 و0.1 يوم لكل عقد، على الترتيب. في المدينة المنورة، يتناقص عدد أيام TX40 وTX42 بمعدلات 2.2 و0.4 يوم لكل عقد، على الترتيب،

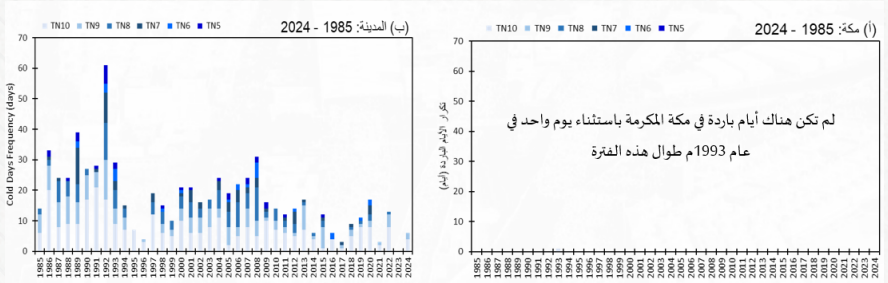
بينما تزداد أيام TX44 وTX46 وTX48 بمعدلات 2.7 و2.4 و0.2 يوم لكل عقد، على الترتيب. ويعني انخفاض الأيام الحارة ذات الدرجات الأقل نسبيًا، مقابل زيادة الأيام الأشد حرارة، وجود اتجاه احترار واضح في كلتا المدينتين، بما يبرز الحاجة إلى استراتيجيات فعّالة لإدارة الكوارث



الشكل 5. السلاسل الزمنية للأيام الحارة السنوية (TX ≥ 40 °م): (أ) مكة المكرمة و(ب) المدينة المنورة للفترة 1985–2024م. الأيام الحارة هي فئات مثل TX40 (40 ≤ TX < 42 °م)، TX42 (42 ≤ TX < 44 °م)، TX44 (44 ≤ TX < 46 °م)، TX46 (46 ≤ TX < 48 °م)، TX48 (48 ≤ TX < 50 °م)، وTX50 (TX ≥ 50 °م).

ظهر حدوث إجمالي الأيام الباردة السنوية (TN ≤ 10°C) تباينًا بين السنوات في المدينة المنورة، بينما يوجد في مكة المكرمة يوم بارد واحد فقط (في عام 1993م) طوال فترة التحليل بأكملها (الشكل 6). سنويًا، تشهد المدينة المنورة 7 أيام في TN10، و4 أيام في TN9، و3 أيام في TN8، و2 أيام في TN7، و1 يوم في TN6، و1 يوم في TN5. في المدينة المنورة،

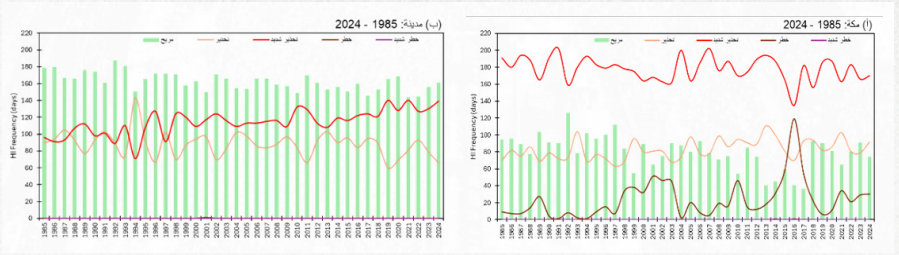
تتناقص TN10 وTN9 وTN8 وTN7 وTN6 وTN5 بمعدلات 2.3 و1.4 و1.0 و0.6 و0 و0.4 يومًا لكل عقد على التوالي. يعد انخفاض الأيام الباردة مؤشرًا واضحًا على ارتفاع درجة حرارة المدينة المنورة، مما يؤكد الحاجة إلى استراتيجيات فعّالة لإدارة الكوارث



الشكل 6. السلاسل الزمنية للأيام الباردة السنوية (TN ≤ 10 °م): (أ) مكة المكرمة و (ب) المدينة المنورة للفترة 1985 – 2024م. الأيام الباردة هي الفئات TN10 (TN ≤ 10 °م) و TN9 (9 < TN ≤ 8 °م) و TN8 (8 < TN ≤ 7 °م) و TN7 (7 < TN ≤ 6 °م) و TN6 (6 < TN ≤ 5 °م) و TN5 (TN ≤ 5 °م). لم تكن هناك أيام باردة في مكة المكرمة باستثناء يوم واحد في عام 1993م طوال هذه الفترة.

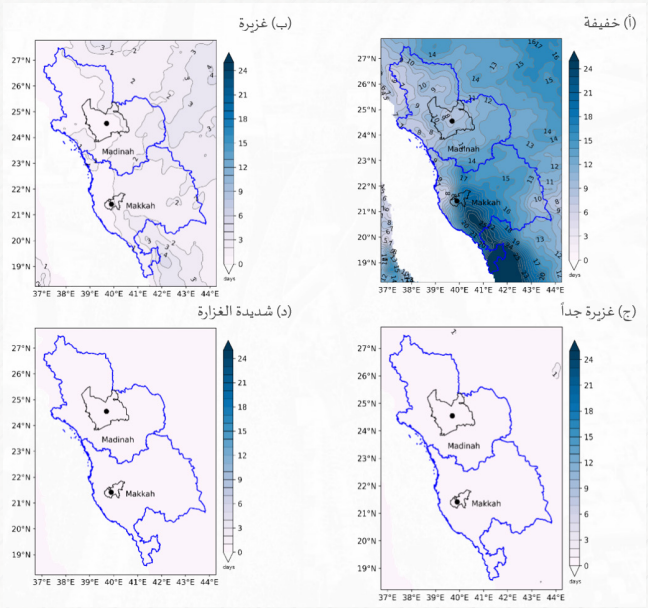
يشير تواتر مؤشر الحرارة السنوي (HI) في مكة المكرمة والمدينة المنورة إلى أن مكة أكثر إزعاجًا من المدينة (الشكل 7). في مكة المكرمة يتقارب عدد أيام الراحة السنوية (80) وأيام التحذير (83)، لكن عدد أيام التحذير الشديد (178) أكبر بكثير، إذ يزيد على ضعف أيام الراحة. سنويًا تُسجَّل 23 يومًا من فئة الخطر في مكة، بينما لوحظ خلال كامل فترة التحليل يومان فقط من فئة الخطر الشديد (في عامي 2014 و2016م). في مكة المكرمة تتناقص أيام الراحة وأيام التحذير الشديد بمعدل 8.5 و3.3 يومًا لكل عقد، على التوالي،

بينما تزداد أيام التحذير وأيام الخطر بمعدل 4.4 و7.2 يومًا لكل عقد، على التوالي. وعلى النقيض، في المدينة المنورة يكون العدد السنوي لأيام الراحة (163) أعلى من أيام عدم الراحة الأخرى مثل التحذير (88) والتحذير الشديد (114)، في حين سُجِّل يوم واحد فقط من فئة الخطر في عام 2001م، ولم تُسجَّل مطلقًا أيام من فئة الخطر الشديد طوال فترة التحليل. في المدينة المنورة تتناقص أيام الراحة وأيام التحذير بمعدل 5.7 و3.9 يومًا لكل عقد، على التوالي، بينما تزداد أيام التحذير الشديد بمعدل 9.5 يومًا لكل عقد



الشكل 7. السلاسل الزمنية لأيام مؤشر الحرارة السنوي (HI) في (أ) مكة المكرمة و(ب) المدينة المنورة وفق مقياس الراحة للمؤشر الحراري: الراحة (HI<27 °م)، التحذير (27≥HI<32 °م)، تحذير الشديد (32≥HI<41 °م)، الخطر (41≥HI<54 °م)، والخطر الشديد (54≥HI °م) للفترة 1985–2024م.

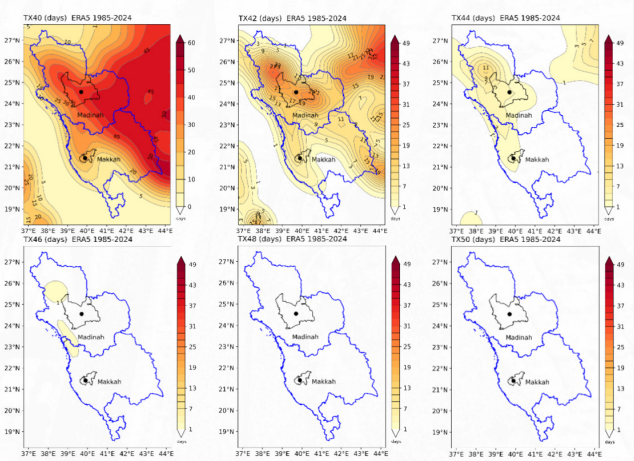
من الملاحظ أن عدد أيام الأمطار الخفيفة تكون بشكل أكبر في الجانبين الجنوبي الشرقي والشرقي من مكة المكرمة بينما تقع في الجانب الغربي للمدينة المنورة (الشكل 8). سنوياً، يمكن أن يصل متوسط تكرار حدوث أيام الأمطار الخفيفة إلى حوالي 20 يوما في مكة المكرمة و10 أيام في المدينة المنورة خلال الفترة 1985-2024م. حدوث أيام هطول الأمطار الغزيرة والغزيرة جدًا والشديدة الغزارة حوالي يوم واحد في كلتا المدينتين



الشكل 8. متوسط التوزيع المكاني لمتوسط التكرار السنوي لأيام هطول الأمطار: (أ) خفيفة، (ب) غزيرة، (ج) غزيرة جدا، و(د) شديدة الغزارة، باستخدام بيانات CHIRPS في المتوسط خلال الفترة 1985 – 2024م. تمثل النقاط السوداء موقع المحطة في مكة المكرمة والمدينة المنورة.

سجّل عدد الأيام الحارة السنوية في مكة المكرمة قيمًا أعلى منه في المدينة المنورة (الشكل 9). فقد بلغ عدد أيام TX40 نحو 65 يومًا في الجهة الشرقية من مدينة مكة المكرمة، مقابل 50 يومًا في الجهة الوسطى إلى الجنوبية من المدينة المنورة.

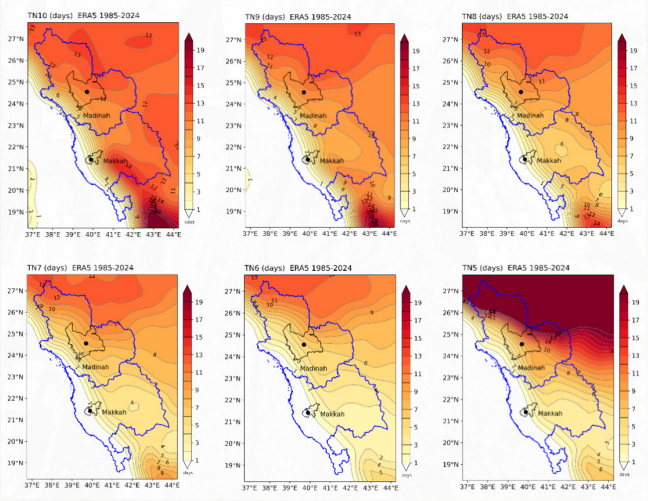
كما سُجِّل نحو 45 يومًا من TX42 في كلتا المدينتين. من ناحية أخرى، بلغ عدد أيام TX44 قرابة 10 أيام في الجهة الغربية من مدينة مكة المكرمة، و25 يومًا في الجهة الشمالية الغربية من المدينة المنورة. ولم تُسجَّل سنويًا أيام حارة بدرجات عظمى تتجاوز 46°م في كلتا المدينتين؛ مع الإشارة إلى أنه قد تُرصد في سنةٍ بعينها أيام تتجاوز 46°م، غير أنّ متوسط الأربعين عامًا لا يُظهر ذلك



الشكل 9. التوزيع المكاني لمتوسط تكرار الأيام الحارة السنوي ل TX40 و TX42 و TX44 و TX46 و TX48 و TX50 باستخدام متوسط درجة الحرارة العظمى CHIRTS خلال الفترة 1985 – 2024م. تمثل النقاط السوداء موقع المحطة في مكة المكرمة والمدينة المنورة.

يُسجِّل عددُ الأيام الباردة السنوية في المدينة المنورة قيمًا أعلى منه في مكة المكرمة (الشكل 10). بلغ عددُ أيام TN10 الباردة 12 يومًا في الجهة الشمالية الشرقية من المدينة المنورة 8 أيام في الجهة الجنوبية الغربية، ويكاد النمط يتكرر للفئات TN9 وTN8 وTN7 وTN6. أمّا لفئة TN5 فقد بلغ عددُ الأيام الباردة 18 يومًا في الجهة الشمالية الشرقية من المدينة المنورة.

في المقابل، فإن عددَ الأيام الباردة في مكة المكرمة محدودٌ جدًا، ويكاد ينعدم ضمن فئة TN5.



الشكل 10. متوسط التوزيع المكاني لمتوسط تواتر الأيام الباردة السنوية ل TN5 و TN6 و TN7 و TN8 و TN9 و TN10 باستخدام درجة الحرارة الدنيا ERA5 خلال الفترة 1985 – 2024م. تمثل النقاط السوداء موقع المحطة في مكة المكرمة والمدينة المنورة.

4. الاستنتاجات

في الختام، تُقدم هذه الدراسة تقييمًا شاملاً للظروف المناخية والظواهر الجوية المتطرفة في مكة المكرمة والمدينة المنورة من عام 1985 إلى عام 2024م، مما يُعالج فجوةً حرجةً في البحوث المتعلقة بالمناخ في هاتين المدينتين المهمتين. تُبرز النتائج أن مكة المكرمة أكثر رطوبةً ودفئًا بشكل عام من المدينة المنورة، مع هطول أمطار أكثر تواترًا وكثافة، لا سيما خلال أشهر الشتاء.

تشهد كلتا المدينتين اتجاهاتٍ متزايدةً في هطول الأمطار السنوي وارتفاعًا في درجات الحرارة العظمى والصغرى، مما يعكس علاماتٍ واضحةً على الاحترار الإقليمي. سجلت مكة المكرمة أيامًا أكثر حرارةً وعدم راحة، مع ارتفاعٍ ملحوظٍ في أيام مؤشر الحرارة الخطرة، بينما شهدت المدينة المنورة، على الرغم من برودةٍ نسبيةً، زيادةً مطردةً في عدم الراحة المرتبطة بالحرارة.

تكون الظواهر الجوية المتطرفة أكثر وضوحًا وتزايدًا في جميع الفئات في مكة المكرمة، بينما في المدينة المنورة، تُظهر حالات هطول الأمطار الشديدة الغزارة فقط اتجاهًا تصاعديًا. يُؤكد تزايد تواتر وشدة الظواهر الجوية المتطرفة، بما في ذلك الأيام الحارة وأيام عدم الراحة والأمطار الغزيرة، على الحاجة المُلحة إلى استراتيجياتٍ قويةٍ للتكيف مع المناخ وإدارة مخاطر الكوارث.

وتعتبر هذه الاستراتيجيات ضرورية ليس فقط لحماية السكان المحليين ولكن أيضًا لضمان سلامة ورفاهية ملايين الحجاج والمعتمرين، ودعم التنمية المستدامة في مواجهة تغير المناخ.

5. التوصيات

لضمان سلامة الحجاج والمعتمرين وسط تصاعد الظواهر المناخية المتطرفة في مكة المكرمة والمدينة المنورة، يجب الأخذ بالإعتبار التدابير التالية

أ. البنية التحتية والتخطيط العمراني

- تنفيذ تحسينات في تصريف الفيضانات وأنظمة إدارة مياه الأمطار، وخاصة في مكة المكرمة، مع مراعاة التوزيع المكاني لهطول الأمطار والمناطق المعرضة لدرجات الحرارة العظمى
- رفع مستوى الطرق، ومداخل الأنفاق، والبنية التحتية الرئيسية للنقل العام لتحمل تقلبات الطقس الشديدة بناءً على المناطق المعرضة لدرجات الحرارة العظمى
- استخدام تقنيات الأسقف المبردة، وممرات المشاة المظللة، وأنظمة رشاشات المياة في مناطق الحج ذات الحركة المرورية الكثيفة
- توسيع البنية التحتية الخضراء (مثل الأشجار والحدائق الحضرية) للحد من تأثير ظاهرة الجزر الحرارية الحضرية

ب. التأهب والاستجابة للطوارئ

- تعزيز أنظمة الإنذار المبكر للظواهر الجوية المتطرفة، بما في ذلك الفيضانات المفاجئة وموجات الحر.
- إجراء تدريبات طوارئ لموسمي الحج والعمرة، مع مراعاة أنماط المناخ.
- تجهيز خدمات الطوارئ بمحطات تبريد متنقلة، ونقاط رذاذ، وبروتوكولات للوقاية من أمراض الحر.

ج. التدابير الصحية والاجتماعية

- تعزيز البنية التحتية للرعاية الصحية للتعامل مع ضربات الشمس والجفاف وحالات إصابة الجهاز التنفسي، خاصةً خلال موسم الحج في فصل الصيف
- إطلاق حملات توعية عامة تستهدف السلامة من الحر، وخاصةً للحجاج الوافدين من دول العالم، وصغار وكبار السن.

د. رصد المناخ وتكامل البيانات

- صيانة وتوسيع شبكات الرصد الجوي الآلية، بما في ذلك تركيب أجهزة متطورة قائمة على التكنولوجيا في كلتا المدينتين
- الشراكة مع الجامعات ومراكز أبحاث المناخ لإجراء تقييمات مستمرة لمخاطر المناخ.
- إنشاء بوابة إلكترونية عامة لمخاطر المناخ لمشاركة البيانات في الوقت الفعلي والتوعية بالكوارث

• توزيع تنبيهات التحذير من الحر عبر تطبيقات الهاتف المحمول واللافتات الذكية.

هـ. السياسات والحوكمة

• دمج بيانات المناخ في التخطيط التشغيلي للحج/العمرة.

• إنشـاء فريـق عمـل معنـي بمخاطـر المنـاخ تابـع لـوزارة الحـج والعمـرة، بالتعـاون مـع الدفـاع المدنـي والمركـز الوطنـي للأرصـاد.

• إصدار قوانين تقسيم المناطق التي تحد من التطوير العمراني المعرض للخطر في المناطق المعرضة للفيضانات وموجات الحر

6. المراجع

- Abdou, A.E.A. (2014) Temperature Trend on Makkah, Saudi Arabia. Atmospheric and Climate Sciences, 4(3). DOI:10.4236/acs.2014.43044.

- Alghamdi A.G.; Aly A.A.; Aldhumri S.A.; Al-Barakaha F.N. (2020) Hydrochemical and Quality Assessment of Groundwater Resources in Al-Madinah City, Western Saudi Arabia. MDPI Sustainability 12(8), 3106. https://doi.org/10.3390/su12083106.

- Bell, J.E.; Brown, C.L; Conlon, K.; et al. (2018) Changes in extreme events and the potential impacts on human health. J Air Waste Manag Assoc., 68(4), 265-287. doi: 10.1080/10962247.2017.1401017. PMID: 29186670; PMCID: PMC9039910.

- Bell, J.E.; Herring, S.C.; Jantarasami, L.; et al. (2016). Impacts of extreme events on human health In The impacts of climate change on human health in the United States: A scientific assessment, 99–128 Washington, D.C.: U. S. Global Change Research Program. 10.7930/JOBZ63ZV.

- Islam, M.N.; Zamreeq, A.O.; Ismail, M.; Habeebullah, T.M.A.; Ghulam, A.S. (2025). Jazan Rainfall's Season Shift in Saudi Arabia: Evidence of a Changing Regional Climate. Atmosphere 16, 300. https://doi.org/10.3390/atmos16030300.

- Jia, H.; Chen, F.; Du, E. (2021). Adaptation to Disaster Risk—An Overview. Int J Environ Res Public Health 18(21): 11187. doi:10.3390/ijerph182111187.

- Khan, S.; Alghafari, Y. (2016) Temperature and Precipitation Fluctuation of Madinah Al Munawara, Kingdom of Saudi Arabia (1959 2011). Atmospheric and Climate Sciences, Vil 6, 402-414. http://dx.doi.org/10.4236/acs.2016.63033.

- Khan, S.; Alghafari, Y. (2017) Temperature, Precipitation and Relative Humidity Fluctuation of Makkah Al Mukarramah, Kingdom of Saudi Arabia (1985 2016). Transactions on Machine Learning and Artificial Intelligence Vol 6, No 1, Feb 2018. DOI:10.14738/tmlai.61.3978

- Luong, T.M.; Dasari, H.P.; Doan, Q.; Alduwais, A. K.; Hoteit, I. (2024) Organized precipitation and associated large-scale circulation patterns over the Kingdom of Saudi Arabia. International Journal of Climatology. Portico. https://doi.org/10.1002/joc.8524.

- NOAA NWS 2022. https://www.wpc.ncep.noaa.gov/html/heatindex_equation.shtml. Accessed on 10 February 2025.

- Rachid, A.; Qureshi, A.M. (2023). Sensitivity Analysis of Heat Stress Indices. Climate 11, 181. https://doi.org/10.3390/cli11090181.

تحليل وتقييم المخاطر الجيوبيئية في منطقة جبل أحد بالمدينة المنورة

فتحي شعبان*، عبد الله باقاسي، طارق العقلا، عبد الرحمن الحضرمي - معهد خادم الحرمين الشريفين لأبحاث الحج والعمرة، جامعة أم القرى

Analysis and evaluation of geoenvironmental hazards in the Uhud mountain area at Medina

Fathy Shaaban*, Abdullah Baqasi, Tareq Al Oqla, Abdel Rahman Hadrami - The Custodian of Two Holy Mosques Institute for Hajj and Umrah Research, Umm Al Qura University

*Corresponding author: E-mail (ffshaaban@hotmail.com)

الملخص

جبل أُحُد هو جبل يطل على المدينة المنوّرة من الجهة الشمالية وكان يبعد عنها ثلاثة أميال ونصف قبل أن يصله العمران. وعلى بعد 4 كم من المسجد النبوي. يمتد الجبل كسلسلة من الشرق إلى الغرب ويميل نحو الشمال. شهد جبل أحد عدة أحداث بعد ظهور الإسلام وله مكانته الدينية. تهدف الدراسة الى تقييم بعض المخاطر الجيوبيئية المتعلقة بالانهيارات الصخرية نتيجة لعدم استقرار المنحدرات والعوامل البيئية في عدة مناطق على جانبي جبل احد والتي سيكون لها تأثير على المواقع الحضرية المأهولة بالسكان المجاورة للجبل وكذلك زوار تلك المناطق الأثرية الهامة، تدهور الوضع الجيوبيئي الراهن بنطاق جبل أحد والرماه.

تم عمل عدة زيارات حقلية لمنطقة جبل أحد وتغطية حدود الجبل تقريبا من جميع النواحي في 21 منطقة ذات اهمية من حيث التواجد العمراني والسكني بتلك المناطق. وذلك لتحديد نطاقات الخطورة الصخرية بالمنطقة والوقوف على طرق الحماية المستخدمة للحد من مخاطر التساقط الصخري وقد تبين من تلك الملاحظات الحقلية وجود بعض المناطق المجاورة للمنحدرات الصخرية شديدة الخطورة لجبل احد والتي تهدد مباشرة بمخاطر الانهيارات الصخرية والسيول الجارفة المحملة بالصخور والرسوبيات في الأماكن الوديانية. وقد لوحظ كثافة المباني السكنية وملاصقتها للمنحدرات الجبلية شديدة الخطورة دون وجود أي وسائل للحماية من أخطار الانهيارات الصخرية والركامية وتواجد بعض المباني السكنية تم انشائها في المجرى الرئيسي للوادي بتلك المنطقة مما يعرضها لمخاطر السيول الفيضية خاصة في حي التلعة وحي سيد الشهداء. ومن دراسة الخريطة الكنتورية لمنطقة الدراسة ونموذج الارتفاع الرقمي DEM، يمثل خط كنتور 600 متر فوق مستوى سطح البحر حدود جبل أحد، ويبلغ الجبل أعلى ارتفاع له في الركن الشمالي منه على شكل قمة يبلغ منسوبها نحو 1090 متر فوق منسوب سطح البحر، وبهذا يقدر الارتفاع المحلى للجبل من سفحه إلى قمته نحو 390 متر، ويتميز سطح جبل أحد بالوعورة حيث تبرز عدة قمم جبلية بشكل مدبب يتراوح ارتفاعاتها بين 900 - 1090 متر فوق مستوى سطح البحر. وقد تم رسم خرائط للانحدارات (slope map)واتجاه الانحدارات (Aspect map) بالمنطقة من خلال النموذج الرقمي للارتفاعDEM وتبين منها، ان أغلب سطح جبل أحد بميله بدرجات انحدار تتراوح ما بين 10 و 50 درجة بجانب وجود حافات شديدة الانحدار يزيد انحدارها عن 80 درجة، وتظهر في بعض الأماكن على شكل حافات رأسية حائطية يصل انحدارها إلى ٩٠درجة. تتواجد الانحدارات البسيطة (أقل من 20 درجة) في الأطراف الشمالية لجبل أحد كما تتواجد أيضا في نطاقات أخرى من سطح الجبل، وتظهر هذه الانحدارات الخفيفة عند هوامش الشعاب الجنوبية كما أنها تتواجد على سطح المراوح الفيضية

- تتواجد الانحدارات المتوسطة (20درجة - أقل من 50 درجة) في مناطق كثيرة بمنطقة الدراسة وبخاصة في المناطق الشمالية والشرقية، حيث تتواجد بها مسيلات كثيرة أدت لاختفاء المنحدرات الشديدة، كما توجد على جوانب المسيلات وفي مناطق فوق الجبل. توجد الانحدارات الشديدة (اكبر من 50 درجة) في مناطق كثيرة وعلى معظم منحدرات الجبل الهامشية وبخاصة في الجوانب الجنوبية الغربية والجنوبية من جبل أحد.

اوضحت الدراسة ان منطقة جبل احد تنقسم الى ثمانية احواض مائية، تتراوح درجة خطورة تلك الأحواض بين منخفض ومتوسط وشديد الخطورة ، ويتضح من الخريطة أن المنطقة الأولي بجوار حي سيد الشهداء جنوب جبل أحد والمنطقة الرابعة شمال غرب جبل أحد وكذلك المنطقة الخامسة بحي التلعة تقع جميعها تحت تأثير احواض شديدة الخطورة الى متوسطة، مما يعرضها الى مخاطر السيول والمسيلات الركامية. استخدم برنامج (GEO5 slope stability) لإجراء تحليل استقرار المنحدرات الطبيعية. وقد تم تطبيقه البرنامج على عدة قطاعات مما تم دراستها وتقييمها ميدانيا بمنطقة الدراسة ،تم ادخال ابعاد المنحنيات وخصائصها الجيولوجية ونوعية الصخور كالوزن النوعي بوحدة (kN/m3) ، زاوية الاحتكاك الداخل (angle of internal friction)، ودرجة تماسك التربة بوحدة (kPa) ، على البرنامج الخاص بإجراء نمذجة قياس ثبات المنحدرات ومعامل الأمان الخاص بها. وقد أظهرت نتائج التحليل ان معظم القطاعات المدروسة بمنطقة الدراسة كان معامل الأمان للمنحدر غير مقبول (اقل من 1.5) مثل القطاعات رقم 1، 3، 7، 9، 14،16. بينما بعض القطاعات مثل القطاع رقم 6 ، القطاع 8 ، القطاع 12 أظهرت قيم معامل أمان مقبولة الى حد ما ، وهذا يعطي تأكيدا على مدى خطورة معظم المنحدرات الجبلية بمحيط جبل أحد وخاصة تلك المجاورة للمنشآت

السـكنية وترفـع مـن احتماليـة حـدوث مخاطـرة علـى السلامـة والصحـة العامـة للإنسـان

الكلمات الدالة: المخاطر الجيوبيئية، جبل أحد، المدينة المنورة ، التنمية المستدامة.

Abstract

Ohud mountain overlooking Medina from the north, was three and a half miles away before it was reached by urbanization, It is 4 km from the Prophet›s Mosque. The mountain extends as a chain from east to west and leans north. Ohud mountain witnessed several events after the advent of Islam and has its religious status. The study aims to assess some geo-environmental risks related to rock falls due to the instability of slopes and environmental factors in several areas on both sides of Ohud mountain, which will have an impact on the urban sites inhabited by people adjacent to the mountain as well as visitors to those important archaeological areas, the deterioration of the current geo-environmental situation in the range of Ohud and Al-Rumah mountain.

To identify the areas of rock hazard in the area and the protection strategies used to reduce the risks of rockfall, several field visits were conducted to the Uhud Mountain area, covering nearly all aspects of the mountain›s borders in 21 areas of importance in terms of urban and residential presence in those areas. These field observations revealed the presence of some areas adjacent to the extremely dangerous rocky slopes of Uhud Mountain, which directly threaten the risks of rock collapses and torrential floods laden with rocks and sediments in valley areas; the density of residential buildings and their proximity to the extremely dangerous mountain slopes were noted without any means of mitigation against the risks of rock and debris collapses., the presence of some residential buildings that were built in the main course of the valley in that area, which exposes it to the risks of flash floods, especially in the Al-Tala›a and Sayed Al-Shuhada neighborhoods. According to the digital elevation model (DEM) and the study area›s contour map, Ohud mountain ‹s borders are represented by the contour line 600 meters above sea level.

At a height of roughly 1090 meters above sea level, the mountain›s highest point is in its northern corner. Accordingly, the mountain›s local height, measured from base to summit, is estimated to be around 390 meters. The surface of Mount Uhud is characterized by ruggedness, as several mountain peaks protrude in a pointed shape, with heights ranging between 900 and 1090 meters above sea level. Slope maps and slope direction maps were drawn in the area using the digital elevation model (DEM),, which showed that most of the surface of Mount Uhud has a slope ranging between 10 and 50 degrees, in addition to the presence of steep edges with a slope of more than 80 degrees, and in some places they appear in the form of vertical wall edges with a slope of up to 90 degrees. Gentle slopes (less than 20 degrees) are found on the northern edges of Ohud mountain and are also found in other areas of the mountain surface. These gentle slopes appear at the margins of the southern reefs and are also found on the surface of the alluvial fans. Moderate slopes (20 degrees - less than 50 degrees) are found in many areas of the study area, especially in the northern and eastern areas, where there are many streams that have led to the disappearance of steep slopes, and they are also found on the sides of streams and in areas above the mountain. Steep slopes (greater than 50 degrees) are found in many areas and on most of the marginal slopes of the mountain, especially in the southwestern and southern sides of Mount Uhud. The study showed that the Mount Uhud area is divided into eight water basins, the degree of danger of these basins' ranges between low, medium and very dangerous. It is clear from the map that the first area next to the Sayyid al-Shuhada neighborhood south of Mount Uhud, the fourth area northwest of Mount Uhud, and the fifth area in the al-Tala›a neighborhood are all affected by very dangerous to medium basins, which exposes them to the risks of floods and cumulative streams.

The GEO5 slope stability program was used to conduct stability analysis of natural slopes. The program was applied to several sectors that were studied and evaluated in the field in the study area. The dimensions of the curves, their geological characteristics, and the type of rocks, such as the specific gravity in (kN/m3), the angle of internal friction, and the degree of soil cohesion in (kPa), were entered into the program for modeling the slope stability measurement and its safety factor. The results of the analysis showed that most of the sectors studied in the study area had an unacceptable slope safety factor (less than 1.5), such as sectors No. 1, 3, 7, 9, 16, and 14. While some sectors, such as No. 6, sector 8, and sector 12, showed somewhat acceptable safety factors. This confirms the extent of the danger of most mountain slopes around Mount Uhud, especially those adjacent to residential facilities, and increases the risk to public safety and health.

1. المقدمة

جبـل أُحُـد هـو جبـل يطـل علـى المدينـة المنـوّرة مـن الجهـة الشـمالية وكان يبعـد عنهـا ثلاثـة أميـال ونصف قبـل أن يصلـه العمـران. وعلـى بعـد 4 كـم من المسـجد النبـوي. يمتـد الجبـل كسلسـلة مـن الشـرق إلـى الغـرب ويميـل نحـو الشـمال. شـهد جبـل أحـد عـدة أحـداث بعـد ظهـور الإسـلام ولـه مكانتـه الدينيـة. جبـل الرمـاة، أو جبـل عينيـن، هـو عبـارة عـن جبـل صغيـر يقـع بجانـب جبـل أحـد، شـمال المسـجد النبـوي علـى بعـد نحـو ثلاثـة كيلـو متـرات منـه، قـرب المدينـة المنـورة. وهـو الجبـل الـذي أمـر النبـي الرمـاة أن يتمركـزوا فيـه فـي غـزوة أحـد، وكان عددهـم خمسـين رجلاً ، ليحمـوا ظهـور المسـلمين مـن تسـلل المشـركين

أغلب صخور الجبل من الجرانيت الأحمر، وبعض الصخور تميل ألوانها إلى الأخضر الداكن والأسود، وبها عدة تجاويف تسمى «المهاريس» تقوم باحتجاز مياه الأمطار، وبه العديد من الكهوف والشقوق التي يتجاوز ارتفاع بعضها متراً ونصف وعمقها عشرة أمتار. يبلغ طول الجبل 7 كيلومترات وعرضه بين 2 و3 كيلومتر وارتفاعه يصل إلى قرابة 1077 متراً . يبعد. يحد الجبل من الشمال طريق الجامعات (طريق غير المسلمين) ومن الجنوب الطريق الدائري الجنوبي ومن الشرق طريق المطار وجبل تيأب وجبل ثور في الشمال الغربي وجبل عينين في الجنوب الغربي والذي يعرف بجبل الرماة كما يمر من عند قاعدته وادي قناة والذي يتجاوزه من الغرب

عدم استقرار الميول هي المشكلة الأكثر خطورة في مناطق التلال والجبال بالمملكة العربية السعودية. وتعتبر منطقة جبل أحد من هذه المناطق حيث تحيط العديد من المناطق الحضرية بهذه بالجبال. ويمكن رؤية أنواع مختلفة من عدم الاستقرار في المنحدرات في هذه المنطقة التي تشمل الانتشار الجانبي، والإسقاط، والزحف ، والانهيارات الصخرية (Ansari et.al 2012, Fanos et. Al 2016, Frattini et. Al 2008)

يعذى التساقط الصخري إلى كميات الصخور التي تسقط من وجه الجرف. كما يستخدم المصطلح لانهيار الصخور من السقف أو الجدران من أعمال المنجم أو المحجر. تحدث هذه العملية من عمليات الانهيار السريعة فوق السفوح الصخرية العارية شديدة الانحدار، حيث تسقط الكتل الصخرية وتصطدم بالأرض مع تعرضها للتدحرج أو الانزلاق وان كانت تتعرض في أغلب الأحوال للتكسر نتيجة اصطدامها عند السفوح الجبلية والجروف الساحلية من أكثر المناطق تعرضا للسقوط الصخري (Whittow, John 1984)

استأثرت دراسة السفوح والانحدارات منذ نحو ربع قرن اهتمام الجيومورفولوجيين، والجيولوجيين والمهندسين (Dikan, et al. 1996 Bertra 2004)، نظرا لدورها البالغ الأهمية في معظم المناطق الجغرافية باعتبار عامل الانحدار المتحكم في العمليات الجيومرفولوجية، والموجه الأساس في تحديد مورفولوجية المراكز العمرانية والكثير من المنشآت الهندسية البيداء وأحمد، (٢٠١٣). وتعد دراسة السفوح وديناميكية المنحدرات أساس وجوهر الدراسات الجيومرفولوجية، نظرا لأن تنوع وتعدد أشكال السطح يرتبط بطبيعة السفوح وخصائصها والعمليات المتعلقة بها، ويعتبر جبل أحد من المعالم المهمة التي تقع شمال المدينة المنورة، غربي المملكة العربية السعودية. وتنشط بسفوحه بعض الأخطار الطبيعية منها حركة المواد والمفتتات الصخرية وخاصة المنحدرات الجنوبية والغربية من الجبل، وانتشار الصدوع والفواصل والشقوق التي تسهل من نشاط التجوية الميكانيكية والكيميائية والحيوية، إلى جانب السيالات والجريان المفاجئ، وتكمن فاعلية خطورتها في مناطق المخططات الحضرية والطرق والمنشآت الهندسية، وأحد معوقات التوسع العمراني الكبير الذي تشهده المدينة المنورة باتجاه الشمال بعد توسعة الحرم النبوي الشريف (اسماعيل، 2014، الدومان وداودي، ٢٠١٦)

2. منهجية وطرق البحث

تمت الدراسة على مرحلتين ميدانيتين خلال عام 2024 م ، الفترة الأولى خلال شهر مارس والفترة الثانية خلال شهر أكتوبر

- المسح الميداني. (المسح الميداني لنطاقات الخطورة المستخلصة من نمذجة ومحاكاة التساقط الصخري بالمنطقة لتحديد مدى تأثيرها على المناطق السكنية والمشاريع التطويرية المجاورة)
- دراسة الظروف الجيولوجية والهيدرولوجية للمنطقة (تقييم نوعية الصخور ودرجة تجويتها والعوامل التركيبية المؤثرة فيها)
- جمع البيانات البيئية بالمنطقة (نوعية الهواء - مستويات الغبار - الظروف، المناخية السائدة - مستويات الضوضاء – عوادم الحافلات المنبعثة من المواقف العامة بالمنطقة)
- تحليل محاكاة التساقط الصخري (باستخدام برامج النمذجة Rockfall &Geo5).
- نظم المعلومات الجغرافية (GIS). (رسم خرائط الارتفاعات الرقمية والانحدار وكذلك خرائط اتجاهات الميول).

1.2 ثبات المنحدرات والتساقط الصخري:

تعتمد عملية تقييم أخطار الصخور على جودة البيانات المتاحة (Pradhan et al.,2014) (تستخدم المقارنة ثنائية الأبعاد وثلاثية الأبعاد لتقدير مخاطر الانهيارات الأرضية (Fanos and Pradhan,2016) (حيث تحدد هذه النمذجة الطاقة الحركية والاتجاهات التي تتحرك خلالها الكتل الصخرية وارتفاع هذه الكتل. تحاكي النماذج المحاكاة تقليد حركات الصخور وتحسب إزاحة الحركة باستخدام أساسيات قانون نيوتن الثاني مع تجاهل احتكاك الهواء (Bradhan and Venus,2017). تضمنت بعض هذه النماذج صراحة الحركات المتدحرجة للصخور وأثبتت أن دراسة تقييم تأثير الصخور (تفاعل الصخور مع التضاريس أثناء الاتصال التسلسلي) لا تزال تمثل تحديًا علميًا كبيرً ا في نمذجة الصخور (Matas et.al., 2017)

تحليل محاكاة التساقط الصخري:

قام الفريق البحثي بعمل عدة زيارات ميدانية لمنطقة جبل أحد بالمدينة المنورة لتحديد نطاقات الخطورة والمواقع التي تتميز بوجود كتل صخرية معلقة أو تواجدات للركام الصخري فوق منحدرات شديدة الانحدار ، كذلك تقييم وسائل الحماية المستخدمة للحد من خطورة الانهيارات الصخرية في تلك المناطق

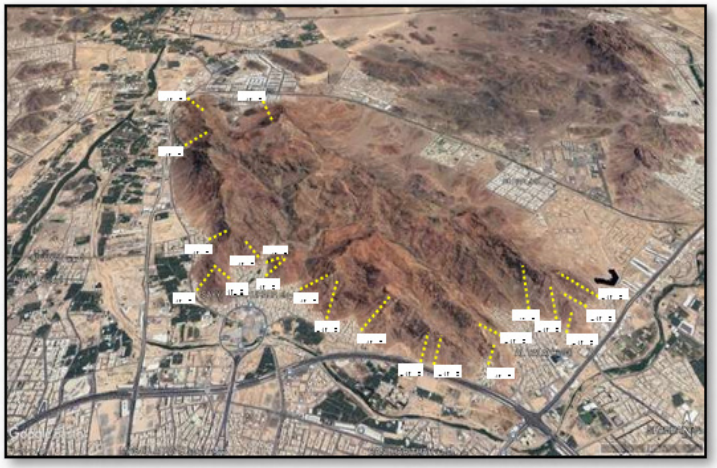
3. النتائج والمناقشة

1.3 نتائج المسح الميداني لمنطقة الدراسة:

تم عمل عدة زيارات حقلية لمنطقة جبل أحد وتغطية حدود الجبل تقريبا من جميع النواحي في 21 منطقة ذات اهمية من حيث التواجد العمراني والسكني بتلك المناطق كما هو موضح بشكل (1). وذلك لتحديد نطاقات الخطورة الصخرية بالمنطقة والوقوف على طرق الحماية المستخدمة للحد من مخاطر التساقط الصخري وقد تبين من تلك الملاحظات الحقلية وجود بعض المناطق المجاورة للمنحدرات الصخرية شديدة الخطورة لجبل والتي تهدد مباشرة بمخاطر الانهيارات الصخرية والسيول الجارفة المحملة بالصخور والرسوبيات في الأماكن الوديانية

المنطقة الأولي: تضم القطاعات رقم 1، 2، 21 وتقع في الجانب الجنوب الغربي من جبل أحد بجوار

حي سيد الشهداء، وتتميز بالكثافة العمرانية والزحف العمراني الى اقصى سفوح جبل أحد.



شكل (1): المناطق التي تم مسحها بمحيط جبل أحد لتقييم مخاطر الانهيارات الصخرية بها.



شكل(2)

شكل(2): قطاع 3، تتميز هذه المنطقة بقيمتها التاريخية بوجود مسجد الفَسْح أو مسجد الفَسِيح أو مسجد أُحد بالمدينة المنورة (شكل د) الذي يقع في طرف الشِّعْب المؤدي إلى المِهْراس والمعروف بشِعْب الجرار أو شِعْب هارون جنوبي الغار الذي يبعد عنه (200م) مئتي متر تقريباً ، ولم يبق إلا جزء بسيط منه. أطلق عليه المؤرخون (مسجد الفسح). وهو على شكل مستطيل يقدر طوله بـ 6أمتار وعرضه 4 أمتار وارتفاعه متران وسمك جداره متر واحد، وقد استخدم في بنائه الحجر والجص وقد مرّ به عدة ترميمات.

وتذكر كتب السير أن النبي صلى الله عليه وسلم صلى في المسجد الذي بأحد في شعب الجرار لازقاً بالجبل، بعد انقضاء القتال يوم أحد. وتتميز تلك المنطقة بكثرة الزائرين كونها أحد الأماكن الأثرية (شكل ج)، ولكن تكمن الخطورة في دخولهم لبعض التجاويف والمغارات الصغيرة ببطن الجبل والتي قد تحتوي على حيوانات ضالة او حشرات سامة تؤثر على صحة الزوار وايضا لانستثني مخاطر حدوث اي انهيارات صخرية خاصة في اوقات هطول الأمطار. تم استعمال الشبك الحديدى في تلك المنطقة للحماية من تساقط الصخور والركام الصخري، ولكن ذلك لم يكن بالفعال حيث اثرت التساقطات الصخرية على الحاجز الشبكي واخترقته في بعض الماكن وادت الى انهياره (شكل أ، ب)

قطاع 4 ، تقع هذه المنطقة عند شق المهراس شق المهراس فى جبل أحد وهو الشق او المكان الذي لجأ إليه سيدنا رسول الله صلى الله عليه وسلم بعد نزول الرماة عن جبل الرماة في غزوة أحد والشق هو جيب في جبل أحد وكان معه سبعة من الأنصار 1وكانت أصعب لحظة فى حياة سيدنا رسول الله صلى الله عليه وسلم استشهد الأنصار السبعة وهم يدافعون عن سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم وسقطت الدماء منه صلى الله عليه وسلم في الشق وهو مزار قريب من شهداء أحد على سفح جبل من جبال أحد ، وللأسف لوحظ تشويه هذا الأثر الاسلامي وكذلك تشويه لجزء من جبل احد بغلق هذا الشق بكتل خرسانية ضخمة (شكل أ) لمنع الزوار من الصعود اليه



شكل (3): مخاطر الانهيارات الصخرية بالأماكن السكنية الملاصقة لمنحدرات الجبل. استعمال سور حماية من الانهيارات الصخرية بالأماكن الملاصقة لمنحدرات الجبل.

المنطقة الثالثة: تضم القطاعات رقم 8،7، 9، 10 وتقع في الجانب الغربي من جبل أحد وتضم بعض التجمعات السكانية الكثيفة وكذلك حديقة الأمير محمد بن عبد العزيز، ويحدها ايضا احد الطرق الرئيسية مباشرة بجوار الجانب الغربي لجبل احد



شكل(4)

شكل(4): قطاع 7 يقع بداية الجانب الغربي لجبل أحد، وهو احد القطاعات المستقيمة شديدة الانحدار، ويلاحظ امتداد النشاط السكني بداخل باطن الجبل (أ) كما تظهر حركة المواد من انهيار للكتل الصخرية ، مخاريط ركامات السفوح والمفتتات الصخرية الى جانب نشاط المسيلات والجريان (ب).



شكل(5)

شكل (5): قطاع 8، يقع في الجانب الغربي لجبل أحد في أحد الشعاب ذات الكثافة السكانية، وهو أحد القطاعات المركبة اعلاها مستقيم شديدة الانحدار والجزء السفلي منه متوسط الانحدار يعلوه مروحة فيضيه من الركام والفتات الصخري (أ).

وقد ظهرت آثار الجريان السطحي لمياه الأمطار المحملة بالفتات الصخري والتي هددت بعض المنازل القريبة من سفح الجبل (بشهادات سكان المنطقة)



شكل (6)

شكل (6): قطاع 9، يقع في الجانب الغربي لجبل أحد داخل حديقة الأمير محمد بن عبد العزيز، وهو أحد القطاعات المقعرة شديدة الانحدار والجزء السفلي منه يعلوه مروحة فيضيه من الركام والفتات الصخري (أ&ب) وقد لوحظ ان حدود الحديقة تمتد داخل الشعب ملاصقة لحواف الجبل ورغم اتخاذ بعض احتياطات السلامة من المخاطر مثل بناء جدران حاجزة للصخور المنهارة او تأسيس مخرات للسيول داخل الحديقة

الا ان احتمالية حدوث المخاطر مازالت موجودة بالمنطقة. كما يلاحظ من تراكمات الصخور وانهيار مجري السيل المصمم بداخل الحديقة (ج & د).

المنطقة الخامسة: تضم القطاعات رقم 15،14، 18،17،16 و تقع في الجزء الجنوب الشرقي من جبل أحد، وتتميز بكثافة سكنية عالية في اشد الشعاب خطورة والذي يقسم جبل احد الى جزئين وتعرف بحي التلعة



شكل (7): أماكن القطاعين 14 & 15 في الجزء الجنوب الشرقي من جبل أحد.



شكل (8): قطاع 14

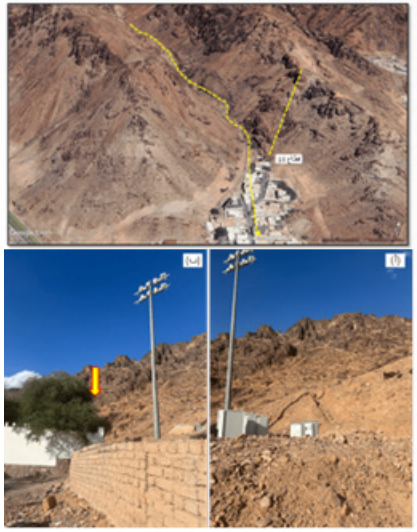
شكل (8): قطاع 14، يقع عند بداية الجزء الجنوب الشرقي لجبل أحد في بداية حي التلعة، وهو احد القطاعات المستقيمة شديدة الانحدار يبلغ طوله 300 متر (أ)،

وقد لوحظ كثافة المباني السكنية وملاصقتها للمنحدرات الجبلية شديدة الخطورة دون وجود أي وسائل للحماية من مخاطر الانهيارات الصخرية والركامية (ب) وتواجد بعض المباني السكنية تم انشائها في المجرى الرئيسي للوادي بتلك المنطقة مما يعرضها لمخاطر السيول الفيضية.



شكل (8): قطاع 17

شكل (8): قطاع 17، يقع عند الجزء الجنوب الشرقي لجبل أحد في منتصف حي التلعة، وهو احد القطاعات المستقيمة يبلغ طوله 250 متر متوسط الانحدار (ب)، ايضا يوجد العديد من المباني السكنية داخل المنحدرات الجبلية شديدة الخطورة والتي تعرض ساكنيها للعديد من مخاطر الانهيارات الصخرية والركامية (أ&د)



شكل (9): قطاع 18

شكل (9): قطاع 18، يقع عند الجزء الجنوب الشرقي لجبل أحد في نهاية حي التلعة، وهو أحد القطاعات المقعرة يبلغ طوله 250 متر متوسط الانحدار (ب)، يوجد بعض من المباني السكنية ومحولات الكهرباء ملاصقة للمنحدرات الجبلية شديدة الخطورة والتي تعرضها للعديد من مخاطر الانهيارات الصخرية والركامية (أ&ب)وتقع المنطقة بالكامل في مجرى وادي رئيسي مما يزيد من احتمالية مخاطر السيول الفيضية

2. 3 الخصائص المورفومترية و مدلولاتها الجيومرفولوجية:

تم استخدام برنامج نظم المعلومات الجغرافية Arcgis10.3 وذلك لتصميم اهم الخرائط التي ستستخدم في تحليل ثبات منحدرات جبل أحد وحساب نمذجة تساقط الصخور بالجبل ومنها، خرائط نموذج الارتفاعات الرقمي والكنتور للارتفاعات وخرائط ميول أسطح الجبل وكذلك خرائط اتجاهات الميول لأسطح الجبل وخرائط شبكة المجاري المائية والأحواض

تتصف منطقة الدراسة بالامتداد الطولي باتجاه من الجنوب الشرقي ناحية الشمال الغربي وتتسم بقلة امتدادها العرضي، ويبلغ أقصي طول لجبل أحد من الجنوب الشرقي نحو الشمال الغربي نحو 7.34 كيلومتر، ويبلغ أقصى عرض لجبل أحد نحو 3.4 كيلومتر،

وقد بلغت مساحة الجبل نحو17.7كيلومتر مربع، وقد بلغ محيط جبل أحد نحو 24 كيلومتر، ومن دراسة الخريطة الكنتورية لمنطقة الدراسة ونموذج الارتفاع الرقمي DEM شكل (10)،يمثل خط كنتور 600 متر فوق مستوى سطح البحر حدود جبل أحد، ويبلغ الجبل أعلى ارتفاع له في الركن الشمالي منه على شكل قمه يبلغ منسوبها نحو 1090 متر فوق منسوب سطح البحر،

وبهذا يقدر الارتفاع المحلى للجبل من سفحه إلى قمته نحو 390 متر، ويتميز سطح جبل أحد بالوعورة حيث تبرز عدة قمم جبلية بشكل مدبب يتراوح ارتفاعاتها بين 900 - 1090 متر فوق مستوى سطح البحر

وقد تم رسم خرائط للانحدارات (slope map) واتجاه الانحدارات (Aspect map) شكل (11) بالمنطقة من خلال النموذج الرقمي للارتفاعDEM على الخريطة الكنتورية لمنطقة الدراسة ويتبين منها ما يأتي:

يتميز أغلب سطح جبل أحد بميله بدرجات انحدار تتراوح ما بين 10 و50 درجة بجانب وجود حافات شديدة الانحدار يزيد انحدارها عن 80 درجة، وتظهر في بعض الأماكن على شكل حافات رأسية حائطية يصل انحدارها إلى ٩٠درجة. تتواجد الانحدارات البسيطة (أقل من 20 درجة) في الأطراف الشمالية لجبل أحد كما تتواجد أيضا في نطاقات أخرى من سطح الجبل،

وتظهر هذه الانحدارات الخفيفة عند هوامش الشعاب الجنوبية كما أنها تتواجد على سطح المراوح الفيضية

- تتواجد الانحدارات المتوسطة (20درجة - أقل من 50 درجة) في مناطق كثيرة بمنطقة الدراسة وبخاصة في المناطق الشمالية والشرقية، حيث تتواجد بها مسيلات كثيرة أدت لاختفاء المنحدرات الشديدة، كما توجد على جوانب المسيلات وفي مناطق فوق الجبل.

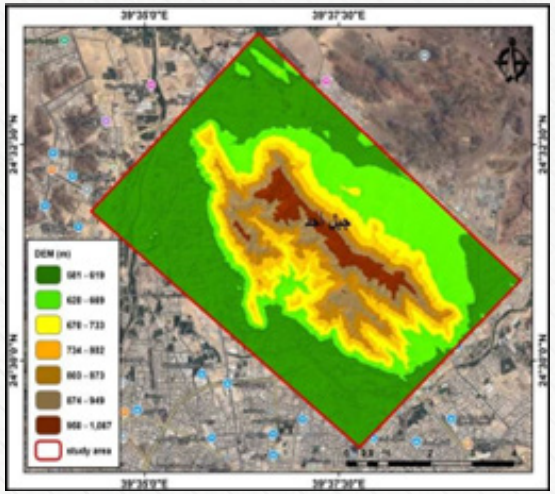
توجد الانحدارات الشديدة (أكبر من 50 درجة) في مناطق كثيرة وعلى معظم منحدرات الجبل الهامشية وبخاصة في الجوانب الجنوبية الغربية والجنوبية من جبل أحد.

تُظهر خريطة الجانب والمنحدر في نفس الوقت الجانب (الاتجاه) ودرجة (الانحدار) للمنحدر لتضاريس (أو سطح متصل آخر). يتم ترميز فئات الجوانب باستخدام درجات الألوان (على سبيل المثال، الأحمر، البرتقالي، الأصفر، إلخ.)، توضح خريطة اتجاهات الميول ان غالبية منحدرات جبل أحد في اتجاه الجنوب الغربي، الشمال الشرقي

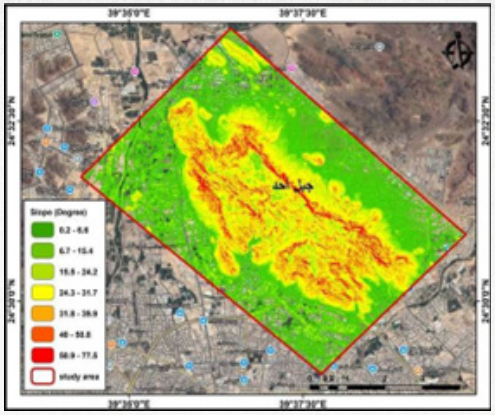
تعكس الخصائص العامة للشبكة المائية في منطقة الدراسة خصائص المنطقة الجيولوجية، وتكويناتها السطحية، الخصائص المناخية المتباينة، التركيب الجيولوجي (Horton,1945) والعمليات التكتونية

ويمكن دراسة الشبكة المائية من حيث: أنماطها، ورتبها، كثافتها التصريفية، وأطوال المجاري المائية وعددها، والتكرار النهري. (Zwnnitz,1932) حيث يمكن التمييز بين نمطين أساسيين: النمط الشجري والذي يميز معظم مناطق الشبكة المائية في منطقة الدراسة، والنمط المتوازي في مناطق الحوض الأعلى حيث التكوينات البركانية

الشبكة المائية لسطح معين تمثل نظاما مشعبا من الاودية والمنخفضات الطبيعية والذي يمثل جريان الماء على سطح الأرض سواء كان ذلك الجريان ماء مطر او ماءا جوفيا باتجاه رئيسي. ولو نظرنا الى الشبكة المائية (أي شبكة مائية لوجدنا انها تمثل عروقا كما في عروق ورقة الشجرة او تمثل نظام الاغصان عند الشبكات، وعادة ما يطلق على النوع من الشبكات بشبكات التصريف ذات النمط الشجري كما في منطقة الدراسة شكل (12&13)

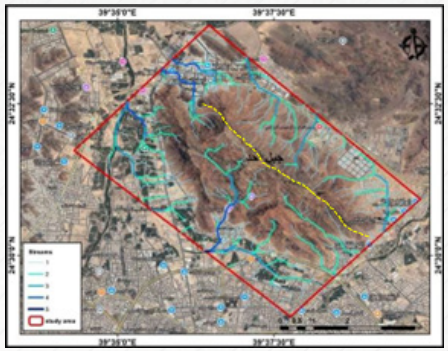


شكل (10): خريطة الارتفاعات الرقمية (DEM) لجبل أحد بالمدينة المنورة

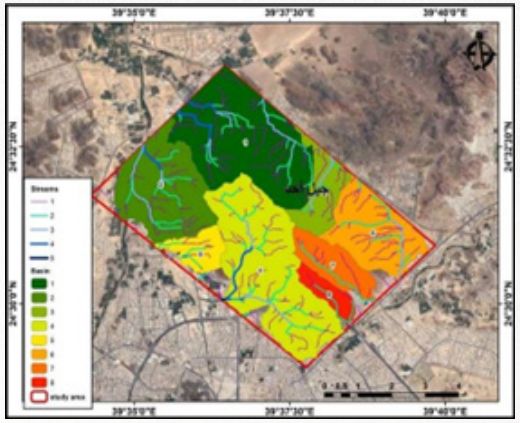


شكل (11): خريطـة درجات الميـــــول (Slopes) لأسطح جبل أحد بالمدينة المنورة

اوضحت الدراسة ان منطقة جبل احد تنقسم الى ثمانية احواض مائية ، وقد أمكن حساب بعض الخصائص التضاريسية والمورفومترية لأحواض منطقة الدراسة بعمل تحليل هيدرولوجي كامل باستخدام نموزج الارتفاع الرقمي، تم استخراج خرائط الانحدار كذلك شبكة التصريف والرتب النهرية لأحواض منطقة الدراسة. ويقترب خط تقسيم المياه للجبل من أطرافه الشمالية ويبعد عن أطرافه الجنوبية مما يشير إلى أن الشعاب الجنوبية لجبل أحد كانت مياهها أكبر من الشعاب الشمالية، وبالتالي قدرتها على التعرية والنحت أكبر مقارنة بمثيلتها في الشمال. تتراوح درجة خطورة تلك الأحواض بين منخفض ومتوسط وشديد الخطورة (شكل 41، جدول 1)، ويتضح من الخريطة أن المنطقة الأولي بجوار حي سيد الشهداء جنوب جبل أحد والمنطقة الرابعة شمال غرب جبل أحد وكذلك المنطقة الخامسة بحي التلعة تقع جميعها تحت تاثير احواض شديدة الخطورة الى متوسطة ، مما يعرضها الى مخاطر السيول والمسيلات الركامية



شكل (12): خريطة المجاري المائية (water courses) تظهر خط تقسيم المياه بجبل أحد بالمدينة المنورة، وتأثيرها على المناطق السكنية المجاورة لمنحدرات الجبل.



شكل (13): خريطة تصنيف الأحواض المائية (water basins)من حيث درجة الخطورة بجبل أحد بالمدينة المنورة.

جدول (1): تصنيف احواض المياه الرئيسية لجبل أحد من حيث درجة الخطورة والأبعاد

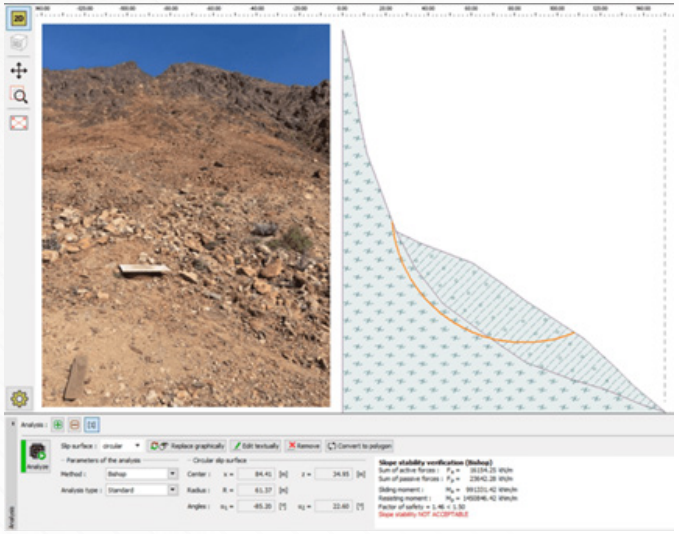
درجة الخطورة					
رقم الحوض	أدني ارتفاع	أعلي ارتفاع	المحيط	المساحة	درجة الخطورة
1	584	1087	14.3	9.5	شديد الخطورة
2	581	983	12.1	6.1	متوسط الخطورة
3	604	1083	9.6	2.3	شديد الخطورة
4	594	1082	17.7	9.9	شديد الخطورة
5	591	895	6.9	1.5	طفيف الخطورة
6	608	1046	10.2	4.5	متوسط الخطورة
7	610	1065	7.7	2.3	متوسط الخطورة
8	607	952	5.6	1.1	متوسط الخطورة

3. 3 تقييم معامل استقرار المنحدرات:

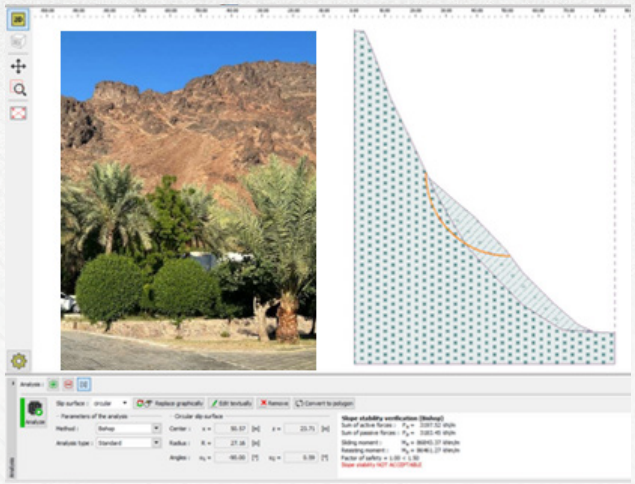
إن تقييم استقرار المنحدر هو جانب صعب، ولكنه مهم في تقييم المخاطر الطبيعية، في شكله البسيط، يتم استخدام طرق التوازن الحدية ويتم تحديد الاستقرار من خلال توازن إجهاد القص وقوة القص. إذا كانت القوى التي تقاوم الحركة أكبر من تلك التي تحرك الحركة، يُعتبر المنحدر مستقرًا. يتم حساب عامل الأمان (FS) عن طريق قسمة المقاومة على القوى الدافعة. يتم تنفيذ تحليل استقرار المنحدر في العديد من تطبيقات مشاريع الهندسة المدنية مثل السدود والجسور والمنحدرات المحفورة والمنحدرات الطبيعية. ساهم تغير المناخ في حدوث العديد من التغيرات المختلفة، والتي تعد الزيادة في كميات هطول الأمطار وتتابع، وزيادة

فترات ظهور السحب، واحدة من أهم هذه التغيرات التي تؤثر على التربة والتضاريس المختلفة ومن بينها المنحدرات، إذّ تتسبب هذه التغيرات في الطقس بحدوث عمليات تدهور للتربة بشكل أسرع من الطبيعي وبالتالي تصبح هذه المنحدرات خطرة وغير مستقرة، يتضمن استقرار المنحدر تحليلات ثابتة وديناميكية. تتضمن تقنيات الاستقرار طرق التوازن الحدي، والأساليب التجريبية لمنحدرات الصخور (SMR، Q-slope)، وطرق العناصر المحدودة أو الفروق المحدودة، ورموز عناصر المنطقة، وما إلى ذلك. الطريقة الأكثر شيوعًا وعملية هي التوازن الحدي، يجب استخدام نماذج عددية أكثر تطورًا مع نماذج تكوينية متقدمة. يستخدم برنامج (GEO5 slope stability) لإجراء تحليل استقرار المنحدرات الطبيعية. يعتبر سطح الانزلاق دائريًا أو متعدد الأضلاع ويتم تحليله بجميع الطرق العامة. وقد تم تطبيقه البرنامج على عدة قطاعات مما تم دراستها وتقييمها ميدانيا بمنطقة الدراسة كما بالأشكال (14&15)

تم ادخال ابعاد المنحنيات وخصائصها الجيولوجية ونوعية الصخور كالوزن النوعي بوحدة (kN/m3) ، زاوية الاحتكاك الداخل (angle of internal friction)، ودرجة تماسك التربة بوحدة (kPa) ، على البرنامج الخاص بإجراء نمذجة قياس ثبات المنحدرات ومعامل الأمان الخاص بها. وقد أظهرت نتائج التحليل ان معظم القطاعات المدروسة بمنطقة الدراسة كان معامل الأمان للمنحدر غير مقبول (اقل من 1.5) مثل القطاعات رقم 1، 3، 7، 9، 14،16. بينما بعض القطاعات مثل القطاع رقم 6 ، القطاع 8 ، القطاع 12 أظهرت قيم معامل أمان مقبولة الى حد ما ، وهذا يعطي تأكيدا على مدى خطورة معظم المنحدرات الجبلية بمحيط جبل أحد وخاصة تلك المجاورة للمنشآت السكنية وترفع من احتمالية حدوث مخاطرة على السلامة والصحة العامة للإنسان



شكل (14): نتائج نمذجة استقرار المنحدرات للقطاع رقم 1 باستخدام برنامج GEO5 slope stability.



شكل (15): نتائج نمذجة استقرار المنحدرات للقطاع رقم 9 باستخدام برنامج GEO5 slope stability.

4. الخلاصة

أظهر المسح الميداني لمنطقة جبل احد لتحديد نطاقات الخطورة الصخرية بالمنطقة والوقوف على طرق الحماية المستخدمة للحد من مخاطر التساقط الصخري وجود بعض المناطق المجاورة للمنحدرات الصخرية شديدة الخطورة لجبل احد والتي تهدد مباشرة بمخاطر الانهيارات الصخرية والسيول الجارفة المحملة بالصخور والرسوبيات في الأماكن الودياني. وقد لوحظ كثافة المباني السكنية وملاصقتها للمنحدرات الجبلية شديدة الخطورة دون وجود أي وسائل للحماية من مخاطر الانهيارات الصخرية والركامية وتواجد بعض المباني السكنية تم انشاؤها في المجرى الرئيسي للوادي بتلك المنطقة مما يعرضها لمخاطر السيول الفيضية خاصة في حي التلعة وحي سيد الشهداء

كذلك بينت نمذجة وخرائط نظم المعلومات الجغرافية مثل الخريطة الكنتورية لمنطقة الدراسة ونموذج الارتفاع الرقمي DEM، بأن خط كنتور 600 متر فوق مستوى سطح البحر حدود جبل أحد، ويبلغ الجبل أعلى ارتفاع له في الركن الشمالي منه على شكل قمة يبلغ منسوبها نحو 1090 متر فوق منسوب سطح البحر، وبهذا يقدر الارتفاع المحلى للجبل من سفحه إلى قمته نحو 390 متر، ويتميز سطح جبل أحد بالوعورة حيث تبرز عدة قمم جبلية بشكل مدبب يتراوح ارتفاعاتها بين 900 - 1090 متر فوق مستوى سطح البحر. وقد تم رسم خرائط للانحدارات (slope map)واتجاه الانحدارات (Aspect map) بالمنطقة من خلال النموذج الرقمي للارتفاعDEM وتبين منها، ان أغلب سطح جبل أحد بميله بدرجات انحدار تتراوح ما بين 10 و 50 درجة بجانب وجود حافات شديدة الانحدار يزيد انحدارها عن 80 درجة، وتظهر في بعض الأماكن على شكل حافات رأسية حائطية يصل انحدارها إلى ٩٠درجة. تتواجد الانحدارات البسيطة (أقل من 20 درجة) في الأطراف الشمالية

لجبل أحد كما تتواجد أيضا في نطاقات أخرى من سطح الجبل، وتظهر هذه الانحدارات الخفيفة عند هوامش الشعاب الجنوبية كما أنها تتواجد على سطح المراوح الفيضية. تتواجد الانحدارات المتوسطة (20درجة - أقل من 50 درجة) في مناطق كثيرة بمنطقة الدراسة وبخاصة في المناطق الشمالية والشرقية، حيث تتواجد بها مسيلات كثيرة أدت لاختفاء المنحدرات الشديدة، كما توجد على جوانب المسيلات وفي مناطق فوق الجبل. توجد الانحدارات الشديدة (أكبر من 50 درجة) في مناطق كثيرة وعلى معظم منحدرات الجبل الهامشية وبخاصة في الجوانب الجنوبية الغربية والجنوبية من جبل أحد

اوضحت الدراسة المورفومترية ان منطقة جبل أحد تنقسم الى ثمانية احواض مائية، تتراوح درجة خطورة تلك الأحواض بين منخفض ومتوسط وشديد الخطورة ، ويتضح من الخريطة أن المنطقة الأولي بجوار حي سيد الشهداء جنوب جبل أحد والمنطقة الرابعة شمال غرب جبل أحد وكذلك المنطقة الخامسة بحي التلعة تقع جميعها تحت تأثير احواض شديدة الخطورة الى متوسطة، مما يعرضها الى مخاطر السيول والمسيلات الركامية

استخدم برنامج (GEO5 slope stability) لإجراء تحليل استقرار المنحدرات الطبيعية. وقد تم تطبيقية البرنامج على عدة قطاعات مما تم دراستها وتقييمها ميدانيا بمنطقة الدراسة ،تم ادخال ابعاد المنحنيات وخصائصها الجيولوجية ونوعية الصخور كالوزن النوعي بوحدة (kN/m3) ، زاوية الاحتكاك الداخل (angle of internal friction)، ودرجة تماسك التربة بوحدة (kPa) ، على البرنامج الخاص بإجراء نمذجة قياس ثبات المنحدرات ومعامل الأمان الخاص بها. وقد أظهرت نتائج التحليل ان معظم القطاعات المدروسة بمنطقة الدراسة كان معامل الأمان للمنحدر غير مقبول (اقل من 1.5) مثل القطاعات رقم 1، 3، 7، 9، 14،16. بينما بعض القطاعات مثل القطاع رقم 6 ، القطاع 8 ، القطاع 12 أظهرت قيم معامل أمان مقبولة الى حد ما ، وهذا يعطي تأكيدا على مدى خطورة معظم المنحدرات الجبلية بمحيط جبل أحد وخاصة تلك المجاورة للمنشآت السكنية وترفع من احتمالية حدوث مخاطرة على السلامة والصحة العامة للإنسان

.5. التوصيات

تم تحديد أهم أنواع المخاطر التي قد تتعرض لها منطقة الدراسة، والمتمثلة في حركة المواد الصخرية سواء علي الطرق التي تحد الجبل أو المنازل المجاورة نظرا لاقتراب العمران وبخاصة من الجنوب والجنوب الغربي، مما يؤدي إلى إغلاق الطرق، أو حدوث خسائر في الممتلكات، أو وقوع خسائر في الأرواح ، ولذلك يوصي الباحثون بما يلي

انشاء وسائل حماية فاعلة خاصة في حي التلعة وسيد الشهداء بالمناطق السكنية الملاصقة للجبل. مثل إضافة بعض المواد المثبتة للمنحدرات كالمواد الأسمنتية أو الكلسية بحيث تُرش سائلة على المنحدرات، وذلك لتثبيت المنحدر حتى تمثل طبقة لكي تعيق عوامل التعرية عن ممارسة تأثيرها على أسطح تلك المنحدرات. انشاء منطقة فاصلة (آمنة) بين حدود جبل احد والانشاءات لمسافة لا تقل عن 100 متر للحماية من الآثار المحتملة للانهيارات الصخرية والركامية

ازالة الرواسب المفككة غير الثابتة من على أسطح المنحدرات، وذلك للوصول إلى زاوية استقرار للمنحدرات، وتلك الطريقة مجدية اقتصاديا بدرجة كبيرة عندما يكون حجم تلك الرواسب يبلغ أقل من ٢ مليون متر مكعب.

إنشاء دعامات خرسانية عند أسافل المنحدرات لتخفيف أثر الذبذبات الناتجة عن حركة المركبات على الطرق المجاورة للمنطقة وبخاصة بالمنحدرات الجنوبية والغربية.

تثبيت شباك حديدية لمنع حركة المواد الصخرية علي منحدرات منطقة الدراسة، وبخاصة المنحدرات شديدة الانحدار البعيدة عن الاستقرار، وذلك لمنع انفصال أجزائها الصخرية واستخدام الألياف الصناعية بجانب الخوازيق لتثبيت المنحدرات، وتجزئة المنحدر علي هيئة مدرجات سلمية صخرية لإعاقة حركة الرواسب الصخرية على المنحدرات

تطهير مجاري الوديان من الانشاءات الموجودة بها لما لها من مخاطر على صحة وسلامة الانسان

ازالة الكتل الخرسانية التي اغلق بها شد المهراس والمحافظة على الموقع الأثري من التشوه.

اعادة النظر في انشاء الحدائق بجوار المنحدرات الجبلية شديدة الخطورة، حيث أن هناك بدائل في شمال جبل أحد يمكن ان تأسس بها تلك الحدائق

المراجع

- الغامدي، سعد سعيد أبو راس (١٤٢٥ ه)، استخلاص شبكة التصريف السطحي للمياه باستعمال المعالجة الآلية لبيانات الأقمار الصناعية: دراسة على منطقة جبل نعمان، مجلة - جامعة أم القرى للعلوم التربوية والاجتماعية والإنسانية، مجلد ١٦ ، العدد ٢، ص ٢٨٧.٣١٦

- الغامدي، سعد سعيد أبو راس (١٤٢٧ ه)، توظيف نظم المعلومات الجغرافية في استخراج بعض القياسات المورفومترية من نماذج الارتفاعات الرقمية دراسة حالة وادي ذرى في المملكة العربية السعودية، ٣١٧ ، الجمعية الجغرافية الكويتية، الكويت.

- الصالح، محمد عبد الله (١٤١٩ ه)، استخدام صور الماسح الموضوعي المحسنة والخرائط الطبوغرافية للتحليل المورفومتري لوادي عنان ووادي مزيرعة بوسط المملكة العربية .(السعودية، مجلة جامعة الملك سعود، مجلد)

- إسماعيل ضياء صبري عبد اللطيف، ٢٠١٤. جيومورفولوجية منحدرات جبل أحد بالمدينة المنورة: دراسة في الجيومورفولوجيا التطبيقية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية. مجلة كلية الآداب، جامعة بنها، المجلد ٣٧ ، العدد ج ٣، ص ص ١٠٢٣-١٠٨٨.

- داودي محمد بن العباس، ٢٠١٦. الحـــرات في منطقة المدينة المنورة المجلة المصرية للتغير البيئي، المجلد الثامن، العدد الثاني، ص ص71-,10.21608/egjec.2017.94824 :doi 01
9http://ejecsite.files.wordpress.com/2017/10/3-12.pdf(2)

- الصالح محمد،2010. معالجة صور الاستشعار عن بعد الرقمية باستخدام برنامج الويس (ILWIS) قسم الجغرافيا، كلية الآداب، جامعة الملك سعود، الرياض، المملكة العربية السعودية، ١٦٠ ص

- علي متولي عبد الصمد، ٢٠٠٦. جبل أحد بالمدينة المنورة: دراسة جيومورفولوجية، أبحاث الندوة التاسعة لأقسام الجغرافيا بجامعات المملكة العربية السعودية، جامعة الملك سعود،الرياض

- Ansari, M.K., Ahmad, M., Rajesh, Singh., Singh, T.N., 2012. Rockfall assessment near Saptashrungi Gad temple Nashik, Maharashtra, India. Int. J. Disaster Risk Reduct. 2, 77–83.

- Basson, F.R.P., 2012. Rigid body dynamics for rock fall trajectory simulation. ARMA,12–267.

- Bull, W.B., King, J., Kong, F.C., Moutoux, T., Phillips, W.M., 1994. Lichen dating of coseismic landslide hazards in alpine mountains. Geomorphology 10 (1), 53–64. case study. Chin. J. Rock Mech. Eng. 3 (21), 3700–3708.

- Dorren, L.K., 2003. A review of rockfall mechanics and modelling approaches. Prog. Phys. Geogr. 27 (1), 69–87.

- Fanos, A.M., Pradhan, B., Aziz, A.A., Jebur, M.N., Park, H.J., 2016. Assessment of ultiscenario rockfall hazard based on mechanical parameters using high-resolution airborne laser scanning data and GIS in a tropical area. Environ. Earth Sci. 75 (15), 1129.

- Ferrero, A.M., Forlani, G.F., Roncella, R., Voyat, H.I., 2009. Advanced geostructural survey methods applied to rock mass characterization. Rock Mechanics and Rock Engineering 42 (4), 631–665.

- Matas, G., Lantada, N., Corominas, J., Gili, J.A., Ruiz-Carulla, R., Prades, A., 2017. RockGIS: a GIS-based model for the analysis of fragmentation in rockfalls. Landslides 14 (5), 1565–1578.

- Matsuoka, N., Sakai, H., 1999. Rockfall activity from an alpine cliff during thawing periods. Geomorphology 28 (3), 309–328.

- Perret, S., Dolf, F., Kienholz, H., 2004. Rockfalls into forests: analysis and simulation of rockfall trajectories-considerations with respect to mountainous forests in Switzerland. Landslides 1, 123–130.

- Pradhan, B., Abokharima, M.H., Jebur, M.N., Tehrany, M.S., 2014. Land subsidence susceptibility mapping at Kinta Valley (Malaysia) using the evidential belief function model in GIS. Nat. Hazards 73 (2), 1019–1042. RocFall Risk Analysis of Falling Rocks On Steep Slopes, https://www.rocscience.com/downloads/rocfall/RocFall%20Tutorial.pdf.

حول إدارة مستدامة للنفايات في المشاعر المقدسة: تحويل النفايات إلى طاقة في خدمة ضيوف الرحمن

مصطفى حسين المادح*، عبدالرحمن عمران الرحيلي، احمد عوض الحربي، عماد فرحان العنزي و خالد احمد التبيري - مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية

Towards Sustainable Waste Management in the Holy Sites: Waste-to-Energy Serving the Guests of Allah

Mustafa H. Almadih*, Abdurhaman O. Alrhaili, Ahmed A. Alharbi, Emad F. Alenezi and Kalid A. Tubairi - King Abdulaziz City for Science and Technology (KACST)
*Corresponding author: E-mail (malmadih@kacst.gov.sa)

الملخص

يواجه الحرمان الشريفان في مكة المكرمة والمدينة المنورة تحديات متزايدة في إدارة النفايات الصلبة البلدية (MSW) والحمأة الناتجة عن مياه الصرف الصحي، خصوصًا خلال مواسم الذروة للحج والعمرة. تهدف هذه الدراسة إلى استكشاف إمكانات تطبيق أنظمة تحويل النفايات إلى طاقة (WTE) المعتمدة على الحرق المتقدم والمقترنة باسترجاع الحمأة، كخيار مستدام يساهم في تقليل حجم النفايات وإنتاج الطاقة والمياه القابلة لإعادة الاستخدام.

اعتمدت المنهجية على تحليل مكونات النفايات وتقدير إمكانات الطاقة باستخدام القيمة الحرارية الدنيا (LHV)، إضافة إلى تقييم كفاءة استرجاع المياه عبر تجفيف الحمأة وتكثيف غازات المداخن. أظهرت النتائج أن النفايات الموسمية قد تصل إلى 20,000 طن/يوم من النفايات الصلبة و550 طن/يوم من الحمأة، بما يتيح توليد نحو 12,546 ميغاواط-ساعة/يوم من الكهرباء واسترجاع ما يقارب 22 مليون لتر/يوم من المياه. كما يساهم الحرق في تقليل حجم النفايات بنسبة تصل إلى 90%، مع ضمان الامتثال لمعايير الانبعاثات من خلال أنظمة معالجة متقدمة.

وتؤكد هذه النتائج أن دمج تقنيات WTE مع استرجاع الحمأة يعزز مبادئ الاقتصاد الدائري، ويحد من الاعتماد على المدافن، ويوفر جدوى اقتصادية بتكاليف تشغيلية تنافسية. وتوصي الدراسة بتنفيذ مشروعات تجريبية، وتبني أنظمة مراقبة ذكية، وبناء قدرات مؤسسية، بما يجعل الحرمين الشريفين نموذجًا عالميًا للإدارة المستدامة لمواسم الحج والعمرة وفق رؤية المملكة 2030.

Abstract

The management of municipal solid waste (MSW) and sewage sludge in Makkah and Madinah represents a critical challenge, particularly during Hajj and Umrah seasons when waste volumes can exceed 20,000 tons/day. This study explores the integration of incineration-based waste-to-energy (WTE) systems with sludge recovery to reduce waste volume, generate electricity, and recover reusable water.

Using benchmark data and local references, the analysis indicates that MSW and sludge together can produce about 12,546 MWh/day of electricity and recover 22 million liters/day of water, while reducing waste volumes by up to 90%. Beyond theoretical modeling, the discussion emphasizes operational needs specific to pilgrimage seasons, including sanitation requirements, cooling demand, and peak loads on utilities. The study concludes that WTE with sludge recovery provides a viable, competitive, and sustainable solution, positioning the Two Holy Mosques as a global model for circular economy practices aligned with Saudi Arabia's Vision 2030.

Keywords: Waste-to-Energy (WTE), Incineration, Municipal Solid Waste (MSW), Sludge Recovery, Renewable Energy, Water Reuse, Sustainable Waste Management

1. Introduction

The Two Holy Mosques in Makkah and Madinah represent the spiritual center of the Muslim world, welcoming millions of pilgrims annually for Hajj and Umrah. During peak pilgrimage seasons, the massive influx of visitors generates extraordinary amounts of municipal solid waste (MSW) and sewage sludge, with daily volumes exceeding 20,000 tons of MSW and 550 tons of sludge. These waste streams include organic matter, plastics, textiles, paper, and food residues, creating serious challenges for local waste management authorities. Traditional disposal methods, such as landfilling, are no longer sustainable due to limited land availability, high

transportation and operational costs, and environmental risks including groundwater contamination and greenhouse gas emissions. In particular, methane emissions from unmanaged landfills exacerbate climate challenges in the Kingdom's arid environment. These circumstances highlight the urgent need for integrated and sustainable solutions tailored to the Holy Sites' unique demands. Waste-to-Energy (WTE) technologies, especially advanced incineration, offer an effective pathway by significantly reducing waste volumes, recovering renewable electricity, and enabling water reuse from sludge treatment. This paper addresses the research gap by assessing the feasibility of WTE systems integrated with sludge recovery, positioning the Two Holy Mosques as a model for sustainable pilgrimage management aligned with Saudi Arabia's Vision 2030.

2. Research Objectives

This study aims to:

1. Assess the feasibility of advanced incineration-based WTE systems integrated with sludge recovery for the Holy Sites.

2. Estimate the energy and water recovery potential from MSW and sludge generated during pilgrimage seasons.

3. Evaluate environmental and economic benefits in comparison with conventional disposal.

4. Highlight how such systems can enhance sustainability, service reliability, and resource efficiency for pilgrims.

3. Methodology (Materials and methods)

This study employed a mixed-method approach combining quantitative analysis, literature review, and conceptual system modeling. Estimates of municipal solid waste (MSW) and sewage sludge generation were derived from municipal reports in Makkah and Madinah, complemented by global benchmarks on pilgrimage-related waste provided by the World Bank and academic studies. Waste streams were characterized in terms of moisture content, organic fraction, and lower heating value (LHV), with typical values of 30–40% moisture and 10 MJ/kg for MSW, and ~80% moisture and 12 MJ/kg for sludge on a dry basis.

Technology assessment focused on advanced incineration options suitable for heterogeneous waste, including moving grate and fluidized bed systems, evaluated for thermal efficiency and emission control. Sludge recovery processes were also reviewed, with emphasis on thermal drying and flue gas condensation for water recovery. Energy recovery potential was calculated using mass balance methods and conversion efficiencies of 25–30% for electricity generation. Water recovery was estimated at ~1,200 liters per ton of MSW and 700 liters per ton of dry sludge.

Environmental performance was benchmarked against EU waste incineration standards, while economic feasibility was assessed by comparing projected generation costs with local electricity tariffs and water scarcity constraints.

4. Results and Discussion

During peak pilgrimage seasons, waste generation in the Holy Sites is estimated at approximately 20,000 tons/day of municipal solid waste (MSW) and 550 tons/day of sewage sludge. Table 1 summarizes the main characteristics of these waste streams, showing the relatively high moisture content of sludge (~80%) compared to MSW (30–40%), while both exhibit significant organic fractions that support their energy recovery potential.

Table 1. Characteristics of Municipal Solid Waste (MSW) and Sewage Sludge

Parameter	Municipal solid Wase (MSW)	Sewage Sludge (Dry Basis)
Moisture Content (%)	30–40	~80
Lower Heating Value (MJ/kg)	~10	~12
Organic Fraction (%)	~50	~70
Daily Quantity (tons/day)	~20,000	~550 (≈55 tons dry solids)

values (LHV) and an assumed conversion efficiency of 25%. As shown in Table 2, MSW contributes the largest share of energy, with approximately 12,500 MWh/day of electricity, while sludge provides an additional ~46 MWh/day. Together, this represents a total potential of about 12,546 MWh/day, demonstrating that sludge recovery, although smaller in scale, adds measurable value to overall energy generation.

Table 2. Energy Recovery Potential from MSW and Sewage Sludge

Waste Stream	Quantity (tons/day)	Energy Content (MJ/kg)	Total Energy (MJ/day)	Electricity Output (MWh/day)*
MSW	~20,000	~10	2.0×10^8	~12,500
Sewage Sludge	~550 (≈55 dry)	~12	6.6×10^5	~46
Total	—	—	—	~12,546

* Assuming 25% conversion efficiency to electricity.

In addition to energy, modern WTE facilities enable significant water recovery through flue gas condensation and sludge drying. Table 3 shows that for the given waste quantities, nearly 22 million liters of water can be recovered daily, of which the majority comes from MSW flue gas condensation (~21.6 million liters/day). This recovered water can be reused for cleaning, irrigation, and cooling, thereby reducing reliance on potable water sources during pilgrimage seasons.

Table 3. Water Recovery Potential from MSW and Sewage Sludge

Source	Recovery Rate	Estimated Water (liters/day)
MSW Flue Gas	~1,200 liters/ton MSW	~21.6 million
Sludge Drying	~700 liters/ton dry sludge	~0.39 million
Total Recovered Water	—	~22 million

Overall, the results demonstrate that integrating WTE with sludge recovery can reduce waste volumes by up to 90%, minimize landfill dependency, and provide both renewable energy and reusable water. These outcomes are particularly valuable for the Holy Sites, where waste management must address not only environmental concerns but also the unique seasonal demands of serving millions of pilgrims. By linking energy and water recovery directly to pilgrimage operations, the study highlights the strategic role of WTE in achieving sustainable and resilient waste management in line with Vision 2030.

5. Conclusions

This study evaluated the feasibility of implementing incineration-based Waste-to-Energy (WTE) systems integrated with sludge recovery as a sustainable solution for managing municipal solid waste (MSW) and sewage sludge in the Two Holy Mosques. The analysis demonstrated that seasonal waste generation may reach up to 20,000 tons/day of MSW and 550 tons/day of sludge, providing an energy recovery potential of nearly 12,546 MWh/day and enabling the recovery of approximately 22 million liters/day of water through flue gas condensation and sludge drying. These results confirm that WTE systems can reduce waste volume by up to 90%, minimize landfill dependency, and ensure compliance with international emission standards through advanced flue gas treatment technologies. Beyond the technical outcomes, the findings highlight the economic competitiveness of such systems, with projected payback periods of 7–10 years, while also supporting national sustainability priorities.

6. Recommendations

It is recommended that pilot-scale projects be implemented in Makkah and Madinah to validate technical and environmental performance under real operating conditions. These projects should be supported by advanced monitoring systems to track emissions, energy recovery, and water reuse efficiency. Capacity building programs are also essential to train operators in waste segregation and resource recovery practices. Partnerships with local authorities, research institutions, and international technology providers will accelerate innovation while ensuring adaptation to local climatic and operational conditions. Finally, integrating WTE into broader sustainability initiatives under Vision 2030 will position the Holy Sites as a global benchmark for environmentally sustainable pilgrimage management.

References

1. Nizami, A. S., Rehan, M., Ouda, O. K. M., Ismail, I. M. I., & Almeelbi, T. (2017). Developing waste biorefinery in Makkah: A way forward to convert urban waste into renewable energy. Applied Energy, 186(P2), 189-196. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.116

2. Ouda, O. K. M., Raza, S. A., Al-Waked, R., Al-Asad, J. F., & Nizami, A.-S. (2017). Waste-to-energy potential in the Western Province of Saudi Arabia. Journal of King Saud University - Engineering Sciences, 29(3), 212-220. https://doi.org/10.1016/j.jksues.2015.02.002

3. Arena, U. (2012). Process and technological aspects of municipal solid waste gasification: A review. Waste Management, 32(4), 625–639. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.025

4. European Commission. (2019). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration. Publications Office of the European Union. https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference

5. International Energy Agency (IEA). (2021). Renewable Energy Market Update 2021. International Energy Agency. https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-2021

6. Saudi Green Initiative (SGI). (2023). Initiatives for a Sustainable Future. Retrieved from https://www.sgi.gov.sa

7. World Bank. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. World Bank Publications. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317

8. Yang, Y., Brammer, J. G., Wright, D. G., Scott, J. A., & Pollard, S. J. (2016). Potential for energy generation from anaerobic digestion, thermal treatment, and incineration of sewage sludge in the UK. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(8), 4547–4557. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.018

9. Sadhukhan, J., Ng, K. S., & Martinez Hernandez, E. (2014). Biorefineries and Chemical Processes: Design, Integration and Sustainability Analysis. Wiley. ISBN 978-1-119-99086-4.



رؤيـــة VISION 2030
المملكة العربية السعودية
KINGDOM OF SAUDI ARABIA

جامعـــة أم القـــرى
UMM AL-QURA UNIVERSITY

معهد خادم الحرمين الشريفين لأبحاث الحج والعمرة

تواصل معنا
multaqa@uqu.edu.sa
+966125572855