

## التقرير النهائي

# تقييم الكفاءة التشغيلية لنظام الحافلات السريعة (BRT) بالمدينة المنورة خلال موسم رمضان باستخدام المحاكاة

الباحث الرئيس

د. أحمد بن محمد كابلي

الباحثين المشاركين

د. محمد صديق ياسين

د. أحمد أمين السقاف

د. عبدالله نورالهوساوي

د. عبدالله بن علي النباتي

أ.د. طارق بن محمد العقلا

1447هـ (2026م)

قسم البحوث العمرانية والهندسية



## قائمة المحتويات

|         |                              |
|---------|------------------------------|
| 1.....  | الملخص العربي.....           |
| 2.....  | الملخص الإنجليزي.....        |
| 3.....  | 1. مقدمة.....                |
| 4.....  | 2. مشكلة الدراسة.....        |
| 5.....  | 3. أهداف الدراسة.....        |
| 6.....  | 4. الدراسات السابقة.....     |
| 10..... | 5. البيانات.....             |
| 15..... | 6. منهجية الدراسة.....       |
| 18..... | 7. تصميم نموذج المحاكاة..... |
| 21..... | 8. ملخص النتائج.....         |
| 30..... | 9. الخلاصة.....              |
| 31..... | 10. التوصيات.....            |
| 34..... | المراجع.....                 |
| 37..... | الملحق.....                  |

## قائمة الأشكال

- شكل 1 : مسارات النقل الترددي بالمدينة المنورة لموسم رمضان 1447هـ.....3
- شكل 2 : يبين أبرز الأرقام لمنظومة النقل الترددي خلال شهر رمضان بشكل عام.....11
- شكل 3 : يبين التفاوت بين عدد الركاب لكل مسارات النقل الترددي خلال شهر رمضان.....11
- شكل 4 : يبين الفروقات في حجم الطلب على الحافلة الواحدة خلال كامل شهر رمضان.....12
- شكل 5 : يبين الفروقات في سرعة التنقل بالحافلات ويقارن السرعات الأعلى والمتوسط والادنى لكل مسار خلال كامل شهر رمضان.....13
- شكل 6 : يبين الفروقات في زمن الرحلة ويقارن الأزمنة الأعلى والمتوسط والادنى لكل مسار خلال كامل شهر رمضان.....14
- شكل 7 : يبين البيانات التفصيلية لكل مسار خلال كامل شهر رمضان.....14
- شكل 8 : خريطة توضيحية لمسار النقل الترددي بطريق الملك فهد (سيد الشهداء - الحرم).....18
- شكل 9 : صورة توضيحية لمخططات العمليات بالنموذج.....19
- شكل 10 : صور لمسار طريق الملك فهد يوضح حركة الحافلات في برنامج المحاكاة.....20
- شكل 11 : صور ثلاثية الأبعاد توضح نقطتي بداية ونهاية المسار.....20
- شكل 12 : صور توضح المسار الخاص للنقل عبر الحافلات السريعة والفصل بين حركة الحافلات والسيارات.....20
- شكل 13 : التوزيع الإحصائي لأزمنة الرحلات في كلا الاتجاهين: (سيد الشهداء - الحرم)، و(الحرم - سيد الشهداء).....21
- شكل 14 : عدد الرحلات الواصلة الى كلا المنطقتين: سيد الشهداء والحرم.....22
- شكل 15 : خرائط حرارية توضح كثافات الحركة والازدحام المروري.....22
- شكل 16 : خريطة توضيحية لمسار النقل الترددي بطريق الملك فهد، تبين الأجزاء المشتركة مع المركبات في المسار.....27
- شكل 17 : طريقة الصعود للحافلات بعد انتهاء صلاة التراويح مباشرة.....29
- شكل 18 : طريقة اركاب الأشخاص ذوي الإعاقة.....30

## قائمة الجداول

- جدول 1: نتائج تحليل أثر تغيير عدد الحافلات على كفاءة منظومة النقل.....22
- جدول 2: نتائج قياس تأثير كثافة الحركة المرورية والتداخل مع المركبات الأخرى على انسيابية التشغيل والأداء التشغيلي لمنظومة النقل.....24
- جدول 3: نتائج تحليل أثر سرعة صعود ونزول الركاب على كفاءة التشغيل وعدد الرحلات وزمن التشغيل.....25
- على المسار.....25

## الملخص العربي

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم وتحسين كفاءة تشغيل نظام الحافلات الترددية في المدينة المنورة خلال موسم رمضان، من خلال تحليل التشغيل الفعلي لمسار Park and Ride الرابط بين محطة سيد الشهداء والساحات الشمالية للمسجد النبوي عبر طريق الملك فهد، ودراسة أثر الترتيبات التشغيلية والتصميمية على انسيابية الحركة ومستوى الخدمة. اعتمدت الدراسة منهجية تجمع بين الملاحظة الميدانية وتحليل البيانات وتطوير نموذج محاكاة أولي يمثل النظام كما هو قائم فعلياً، مما يتيح فهماً أدق للتحديات المؤثرة على الأداء.

شملت البيانات طول المسار ومعدل السرعة وأزمنة الرحلات والتوقفات وأعداد المركبات والركاب، مما أسهم في تحديد الملامح التشغيلية الأساسية للنظام ونقاط التأثير الرئيسة عند اختبار بدائل التحسين.

وكشفت الملاحظات الميدانية عن تحديات تشغيلية، أبرزها الإغلاق المبكر للخدمة وما يرافقه من اندفاع وتجمعات كثيفة، إضافة إلى الحاجة إلى تطوير آليات الإركاب والإرشاد في فترات الذروة. كما أظهرت القياسات تفاوتاً واضحاً في زمن الرحلة والتوقفات تبعاً لظروف التشغيل والكثافة المرورية، مما يؤكد أن الأداء يتأثر بعوامل متداخلة.

كما تم اختبار سيناريوهات تشغيلية مختلفة بالنمذجة والمحاكاة. وتظهر النتائج أن كفاءة التشغيل لا تعتمد فقط على زيادة عدد الحافلات، بل تتأثر بعوامل مترابطة، أبرزها الازدحام المروري، وكفاءة المحطات، وزمن صعود ونزول الركاب، وتحقيق توازن تشغيلي يمنع الوصول إلى مرحلة التشبع. كما أظهرت وجود حد تشغيلي أمثل يتراوح بين 20 و24 حافلة، بعده تصبح زيادة الأسطول محدودة الفاعلية وتزيد الازدحام وتخفف الكفاءة، وهو متوافق مع الخطة التشغيلية المعمول بها مما يعزز موثوقية النظام. كما بينت أن مسارات BRT المخصصة تحقق سرعة وكفاءة أداء أعلى مقارنة بالمسارات المختلطة بحركة المركبات، وأن الإدارة الذكية للتشغيل وتنظيم الحركة تحقق تحسناً أكبر مقارنة بالاكثفاء بزيادة حجم الأسطول التشغيلي.

## الملخص الإنجليزي

### ABSTRACT

This study aims to evaluate and improve the operational efficiency of the shuttle bus system in Madinah during the Ramadan season, by analyzing the actual operation of the Park and Ride route connecting Sayyid Al-Shuhada Station with the northern plazas of the Prophet's Mosque via King Fahd Road, and examining the impact of operational arrangements and design layout on traffic flow and the level of service provided. The study adopted a methodology combining field observation and data analysis, along with developing a preliminary simulation model representing the system as it currently operates, allowing for a more accurate understanding of the challenges affecting performance. The data collected included route length, average speed, trip times, dwell times, and the number of vehicles and passengers, which helped identify the system's key operational characteristics and the main factors to consider when testing improvement alternatives.

Field observations revealed several operational challenges, most notably the early closure of service and the resulting crowd surges and dense gatherings. Measurements also showed clear variation in travel time and dwell times depending on operating conditions and traffic density, confirming that current performance is affected by multiple interrelated factors.

Several operational scenarios were tested using modeling and simulation. The results show that the efficiency of the bus system does not depend solely on increasing the number of buses, but is influenced by interrelated operational factors, most notably traffic congestion, station efficiency, passenger boarding and alighting time, and achieving an operational balance that prevents the system from reaching saturation. The results also showed an optimal fleet size ranging between 20 and 24 buses, beyond which increasing the fleet becomes less effective and may increase congestion and reduce efficiency, which aligns with the current operational plan and enhances the system's reliability. The findings also indicate that dedicated BRT lanes achieve higher operating speed and performance efficiency compared to mixed-traffic shuttle routes. and that smart operations management and traffic regulation can achieve greater improvement than simply increasing fleet size.

## 1. مقدمة

تُعدّ المدينة المنورة واحدة من أهم المراكز الدينية والحضرية في المملكة العربية السعودية، وتتميز بنمط طلب تشغيلي فريد يختلف جوهرياً عن المدن الأخرى، يتمثل في ارتفاع موسمي حاد في حركة التنقل خلال شهر رمضان المبارك. وتُجسّد البيانات الرسمية هذه الخصوصية بوضوح؛ فقد أفادت وكالة الأنباء السعودية بأن المسجد النبوي الشريف استقبل ما يزيد على 20 مليون مصليٍّ خلال العشرين يوماً الأولى من رمضان 1445هـ، في حين نفّذت حافلات المدينة أكثر من 15 ألف رحلة نقلت ما يزيد على نصف مليون مصليٍّ خلال الفترة نفسها، مما يعكس ضغطاً تشغيلياً مكثفاً على منظومة النقل العام والشبكة المرورية خلال نافذة زمنية محدودة (2,1). وفي السياق ذاته، أعلنت هيئة تطوير المدينة المنورة عن نقل 3.6 مليون مستفيد من خدمات النقل الترددي عبر منظومة الحافلات خلال رمضان 1447هـ، عبر أكثر من 70 ألف رحلة وأسطول يضم أكثر من 250 حافلة، بزيادة بلغت 125% عن العام السابق.



شكل 1: مسارات النقل الترددي بالمدينة المنورة لموسم رمضان 1447هـ

وفي ظل هذا الإقبال الكبير على خدمة النقل الترددي، التي يُطبَّق في بعض مساراتها نظام الفصل الكامل بين حركة الحافلات والمركبات الخاصة، المعروف بنظام الحافلات السريعة (Bus Rapid Transit – BRT)، تأتي هذه الدراسة لتقييم الكفاءة التشغيلية لهذا النظام في المدينة المنورة خلال موسم رمضان. وتُعتمد في إطار هذه المنظومة مواقف من نوع "اركب وانطلق" (Park and Ride) تربط بين المواقف الطرفية والمسجد النبوي الشريف، حيث يتوجه الراغبون في الوصول إلى المسجد إلى أقرب موقف، ثم يستقلون الحافلة الترددية ذهاباً وعودة لأداء الصلاة، وتعمل هذه الخدمة من الساعة الثالثة عصراً وحتى ساعة واحدة بعد انتهاء صلاة التراويح، أو نصف ساعة بعد صلاة التهجد في العشر الأواخر من رمضان.

وتنبع الحاجة إلى هذه الدراسة من عدم اكتمال الفصل المساري بين الحافلات والمركبات في بعض القطاعات، إضافة إلى التأخير عند التقاطعات، وتذبذب التردد الزمني للرحلات، وتفاوت زمن التوقف عند المحطات. وقد جرى رصد عدد من التحديات الميدانية المرتبطة بتداخل الحركة المرورية مع مسار الحافلات، وارتفاع زمن الرحلة في بعض الأجزاء، وهو ما يستدعي بناء نموذج محاكاة قادر على اختبار البدائل التشغيلية المختلفة قبل تطبيقها ميدانياً. وعليه، تسعى هذه الدراسة إلى إنتاج معرفة تطبيقية تدعم متخذي القرار في تطوير تشغيل النظام، ورفع كفاءته التشغيلية، وتحسين تجربة الزوار والمصلين.

## 2. مشكلة الدراسة

تتمثل مشكلة الدراسة في تدني مستوى الخدمة التشغيلية لبعض مسارات نظام الحافلات السريعة (BRT) في المدينة المنورة خلال فترات الذروة في شهر رمضان، وذلك نتيجة لعدم اكتمال الفصل التشغيلي للمسارات في عدد من القطاعات، مما يؤدي إلى تداخل حركة الحافلات مع الحركة المرورية العام.

وينعكس هذا التداخل سلباً على كفاءة التشغيل، حيث يتسبب في عدم انتظام التردد الزمني للحافلات (Headway Irregularity)، وزيادة زمن الرحلة، نتيجة التأخيرات المتكررة عند التقاطعات المزدحمة، إضافة إلى طول زمن التوقف في المحطات بسبب ارتفاع الطلب وكثافة الركاب.

وعلى الرغم من وجود ملاحظات ميدانية تشير إلى هذه التحديات التشغيلية، إلا أن الفجوة البحثية تكمن في غياب تقييم تشغيلي متكامل قائم على نماذج محاكاة ديناميكية، يمكن من خلالها تحليل الأداء الحالي للنظام بشكل كمي، واختبار السيناريوهات التشغيلية المختلفة قبل تطبيقها ميدانياً. إذ لا تزال معظم القرارات

التشغيلية تعتمد على التقييمات المباشرة والخبرة الميدانية، دون الاستفادة الكافية من أدوات النمذجة التنبؤية التي تمكن من تقدير القدرة الاستيعابية القصوى للنظام وتحديد نقاط الاختناق بدقة.

وبناء على ذلك، تبرز الحاجة إلى تطوير نموذج محاكاة يعكس الواقع التشغيلي لنظام الحافلات السريعة خلال موسم رمضان، بما يساهم في دعم اتخاذ القرار وتحسين كفاءة التشغيل، خاصة في ظل الطلب المرتفع على النقل بين المواقع الطرفية والمسجد النبوي الشريف.

### 3. أهداف الدراسة

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم وتحسين الكفاءة التشغيلية لنظام الحافلات السريعة (BRT) في المدينة المنورة خلال فترات الذروة في شهر رمضان، من خلال تحقيق الأهداف التالية:

- 1) تحليل الأداء التشغيلي الحالي لمسارات نظام الحافلات السريعة، من خلال قياس مؤشرات الأداء الرئيسية، مثل زمن الرحلة، وعدد المنقولين، وانتظام التردد (Headway Regularity)، وزمن التوقف في المحطات.
- 2) تحديد العوامل المؤثرة على كفاءة التشغيل، بما في ذلك تأثير عدم اكتمال الفصل المساري، والتأخيرات عند التقاطعات، ومستويات الازدحام المروري، وكثافة الطلب على الركاب.
- 3) تطوير نموذج محاكاة مبرمجة وتشغيلية يعكس الواقع الفعلي لعمل النظام خلال موسم رمضان، مع الأخذ في الاعتبار التغيرات الزمنية في الطلب وظروف التشغيل.
- 4) اختبار سيناريوهات تشغيلية بديلة باستخدام نموذج المحاكاة، مثل تصميم نظام أولوية الحافلات عبر الإشارات المرورية، أو زيادة درجة الفصل المساري بين الحافلات والسيارات، أو تعديل جداول التشغيل والتردد، وتقييم أثرها.
- 5) تقديم توصيات عملية قائمة على الأدلة تدعم متخذي القرار في تحسين تشغيل نظام الحافلات السريعة، ورفع جودة الخدمة المقدمة للزوار والمصلين.

#### 4. الدراسات السابقة

يكتسب نظام الحافلات السريعة (BRT) أهمية متنامية بوصفه أحد الحلول الفعالة في منظومة النقل الحضري المعاصر؛ إذ تُجمع الأدبيات العلمية على أنه نظام يهدف إلى تقديم خدمة نقل موثوقة وفعالة من حيث التكلفة لخدمة المجتمع، وأن استمراريته وجدواه مشروطتان بارتفاع نسبة الاستخدام الفعلي، لا بالدعم الحكومي الذي لا يُشكّل حلاً مستداماً على المدى البعيد (3). ولا يُنظر إلى هذا النظام على أنه مجرد حافلات ذات سرعة مرتفعة، بل هو في جوهره حزمة تشغيلية متكاملة تقوم على تحسين المسار، وإدارة التقاطعات، وتنظيم المحطات، وضبط مستوى الخدمة، ورفع الاعتمادية الزمنية. وقد خلصت مراجعة المجلس القومي للبحوث الأمريكي (TRB) حول الحالة الراهنة لممارسة BRT إلى أن الأنظمة التي تعتمد مكونات BRT تستهدف تحقيق جملة من الأهداف، أبرزها: تحسين موثوقية الخدمة، وتقليص زمن الرحلة، ورفع كفاءة التشغيل، وتعزيز رضا المستخدمين، واستقطاب أعداد أكبر من الركاب (8).

ومن المنظور الحضري الأشمل، تُعدّ منظومة "توقف واركب" (Park and Ride) مكماً استراتيجياً لنظام BRT؛ فهي تمثل نقطة اتصال متعددة الوسائط بين المركبات الخاصة والنقل العام، وتستهدف تقليل الازدحام والتلوث وتعزيز استخدام النقل العام. وتؤكد المراجعات العلمية أن إمكانية الوصول إلى النقل العام تمثل العامل الأهم والأكثر تأثيراً في تحديد موقع هذه المنظومة، في حين يُعدّ موقع المنظومة (المواقف) نفسه من أدنى معايير الأولوية (4). ويُضاف إلى ذلك أن تخطيط هذه المرافق ينبغي ألا يُعامل كعنصر معزول، بل كمكوّن متكامل ضمن البيئة الحضرية الشاملة للمدينة (5). وقد رصدت دراسة تقييمية في المملكة المتحدة التطور التاريخي لهذه الأنظمة، مشيرةً إلى أنها نمت وتوسعت بوصفها أداة لمواجهة ازدحام المرور والتلوث المرتبط بالحركة، وأنها استمرت كحل محلي مهم في المدن التاريخية ذات القيود المكانية العالية (16).

كما تكشف الدراسات الحديثة أن أداء الحافلات لا يتحدد بزمن الرحلة وحده، بل يرتبط ارتباطاً وثيقاً بمدى موثوقية هذا الزمن وتذبذبه بين الرحلات والأوقات المختلفة. ففي حين يُسهم تحسين موثوقية زمن الرحلة في تقليل الاعتماد على السيارة الخاصة وتخفيف الازدحام المروري (6)، تمتد هذه الموثوقية لتشمل ظروف الرحلة داخل الحافلة كالازدحام وتوافر المقاعد، فضلاً عن تذبذب فترات الانتظار بين الحافلات؛ وهو ما يجعلها عنصراً محورياً في تقييم أداء النقل العام وفي رضا الركاب (11). وقد أسهمت بعض الدراسات في تطوير مقاييس أكثر دقة لهذه الموثوقية، من خلال دمج زمن الانتظار في المحطة وزمن الحركة داخل الحافلة في مؤشر موحد بدلاً من

الاكتفاء بالزمن الإجمالي للرحلة. وتُبيّن هذه الأبحاث أن الرحلات القصيرة تتأثر نسبياً أكثر بزمان الانتظار، في حين تغدو الرحلات الأطول أكثر حساسيةً للتذبذب في زمن الحركة (6).

ولا تقتصر جودة الخدمة على البُعد الزمني وحده؛ إذ تُظهر الدراسة الميدانية لنظام BRT في عمّان والمراجعة الشاملة لأدبيات النقل العام في الدول النامية معاً أن السلامة، والأمن، والراحة، والموثوقية، والإتاحة هي المحددات الأهم لتصوّر المستخدمين لجودة الخدمة ورضاهم عنها، وذلك في مراحل الانتظار في المحطة، والركوب داخل الحافلة، والسير نحو الوجهة النهائية على حدٍ سواء (9، 10). وتتقاطع هذه النتيجة مع ما خلصت إليه دراسات BRT في الدول النامية من أن هذا النظام يُحقق نجاحاً ملموساً حين يُدار بوصفه خدمة حضرية متكاملة لا مجرد مسار حافلات، وقد عبّر عن ذلك أكثر من نصف مستخدمي BRT في عمّان برضاهم عن الخدمة (9).

وعلى صعيد النتائج التطبيقية، برهنت دراسات المحاكاة على أن تطبيق أولوية الإشارة المرورية وتقنيات BRT يمكن أن يُحقق نتائج تشغيلية ملموسة؛ إذ أسفر تطبيق نظام أولوية الإشارات في عمّان عن خفض التأخير بنسبة تزيد على 60%، وتقليل الانبعاثات بنسبة تفوق 50%، وتحسين مستوى الخدمة لمستخدمي النظام. غير أن الدراسة نفسها رصدت أثراً سلبياً مصاحباً يتمثل في زيادة أوقات انتظار المشاة عند التقاطعات، مما يستوجب الموازنة الدقيقة بين مختلف احتياجات مستخدمي الطريق (7).

وفيما يخص زمن التوقف في المحطات (Dwell Time) فإنه يعد من أكثر المؤشرات التشغيلية تأثيراً في أداء الحافلات، لا سيما في أنظمة BRT ذات الطلب المرتفع. فهو ليس مجرد زمن صعود ونزول، بل هو محصلة لعوامل تشغيلية تشمل: كثافة الركاب، وحجم حركة الصعود والنزول، ونوع المركبة، ووقت اليوم، ونوع المسار (12). وقد كشفت دراسة تطبيقية على شبكة الحافلات أن التباطؤ والتسارع المرتبطين بالتوقيفات المتكررة والمتقاربة يُشكّلان مصدراً رئيسياً للتأخير في زمن التشغيل، وأن تنظيم عمليات الإركاب وتقليص نقاطه المتفرقة يمكن أن يُحسن الأداء التشغيلي تحسّيناً ملحوظاً (13).

وتتضاعف أهمية هذا الجانب في أنظمة BRT، حيث إن أي زيادة صغيرة في زمن التوقف قد تتراكم عبر عدد كبير من المحطات أو في ظل موجات الطلب المرتفع. وفي هذا الإطار، أظهرت دراسة متخصصة في محطة BRT أن إدراج المتغير "زمن الفاقد التشغيلي" (Bus Lost Time) ضمن حساب زمن التوقف يمكن أن يخفض التقدير الفعلي للسعة الاستيعابية للمحطة بنحو 11%، مما يعني أن أي تحليل يُغفل هذا الفاقد يُبالغ في تقدير الطاقة الاستيعابية للنظام (14). ويترتب على ذلك أن كثافة الركاب ذاتها تنعكس سلباً على موثوقية الخدمة؛ إذ كشفت

دراسة تطبيقية على حافلات جامعة غرب ماساتشوستس بأمريكا أن زيادة عدد الركاب ترتبط بانخفاض في موثوقية الخدمة، وأن هذا الأثر يحدث غالباً عبر زيادة زمن التوقف في المحطات ثم ارتفاع تذبذب الموثوقية التشغيلية (15).

ومن ناحية تقييم كفاءة منظومة Park and Ride، تتجاوز الأدبيات الحديثة مفهوم نسبة إشغال المواقف كمؤشر وحيد، لتبني مفهوماً أعمق يُعبّر عنه بـ "كفاءة الأشخاص" (Person-Efficiency)، أي الاستفادة الفعلية من المساحة المتاحة في نقل الأشخاص. وقد بيّنت دراسة ميدانية أُجريت على سبعة عشر موقفاً بمدينة سياتل في أمريكا أن توسيع طاقة المواقف ليس دائماً خياراً عملياً بسبب القيود المالية والإدارية، وأن تحسين الكفاءة يمكن تحقيقه من خلال استراتيجيات إدارة المواقف وقياس الاستفادة الفعلية منها (18).

أما على صعيد التخطيط المكاني لهذه المنظومة، فتؤكد بعض الدراسات أن إمكانية الوصول إلى النقل العام تمثل عنصراً تأسيسياً في اختيار الموقع، وأن توظيف أساليب اتخاذ القرار متعددة المعايير يُسهم في ترتيب المعايير الأكثر أهمية في البيانات الحضرية المعقدة. وقد طبقت دراسة أُجريت في الإكوادور نموذجاً متطوراً يعتمد طريقة FUCOM لتحديد أوزان المعايير المختارة، وخلصت إلى أن تطبيق منظومة Park and Ride مرتبط ارتباطاً وثيقاً بالتحسين المستمر لشبكة النقل العام (19). كما اقترحت دراسة أخرى في مدينة إل باسو الأمريكية نهجاً شاملاً لتقييم جدوى مواقع Park and Ride يشمل: تحليل الموقع، وموثوقية خدمة الحافلات، وعرض المواقف واستخدامها، ونموذج اختيار الوسيلة، وتقدير الطلب، والتكاليف والجدوى الاقتصادية (17).

كما أن تبني استخدام النمذجة والمحاكاة تنصدر كأدوات في اختبار التحسينات التشغيلية قبل تنفيذها على أرض الواقع. وقد أثبتت هذه الأدوات فاعليتها في تقييم أثر التغييرات التشغيلية بدقة عالية؛ ففي سياق BRT، أظهرت دراسة محاكاة معتمدة على برنامج Vissim لمسارين متتاليين في عمان أن تطبيق أولوية الإشارات المنسقة وخصائص BRT خفّض زمن الرحلة بنسبة تصل إلى 26%، وقُلص التأخير عند التقاطعات بنسبة تزيد على 60%، ورفع السرعة المتوسطة بنحو 47% (7). وتُعزز هذه النتائج التوجه نحو اعتماد المحاكاة منهجاً أساسياً لاختبار السيناريوهات التشغيلية قبل تعميمها.

وفي سياق موازٍ، أثبتت بيانات GPS قدرتها الاستثنائية على توفير مدخلات واقعية لنماذج تقدير أداء النقل. فقد وظّفت دراسة بيانات GPS المسجلة من المركبات الخاصة والحافلات لتقدير زمن التشغيل والطلب المحتمل على مسار BRT مقترح في منطقة مينيابوليس-سانت بول، وأثبتت أن توافر بيانات GPS يُمكن من بناء نماذج قابلة

للمعايرة والتحقق (20). ويُعدّ هذا التوجه ركيزةً منهجية مهمة لأي دراسة تسعى إلى تقييم أداء مسار حافلات ذي طلب متغيّر، حيث تُوفّر هذه البيانات قياساً حقيقياً للأداء الفعلي بدلاً من الاستناد إلى الجداول النظرية.

وعلى الرغم من الثراء الواضح في أدبيات BRT و Park and Ride عالمياً، فإن الدراسات التطبيقية في سياق الحج وتحديدًا في المشاعر المقدسة تتمركز بصورة شبه كاملة حول منظومة نقل الحجاج بين عرفة ومزدلفة. وقد تعددت المناهج المستخدمة في هذا السياق؛ فقد اقترحت دراسة نموذج محاكاة حاسوبياً متعدد الوسائط لتتبع حركة الحجاج عبر الحافلات الترددية وتحديد الاختناقات التشغيلية في مسار عرفة-مزدلفة (21)، فيما طوّرت دراستان متكاملتان أداة تحليلية لتخطيط تشغيل الحافلات الترددية بأقل عدد ممكن من الحافلات والدورات، مستعينتين ببيانات GPS لرصد أوقات الصعود والنزول وأزمنة الرحلات على طول المسار (22،23).

وعلى المستوى الكمي، استخدمت دراسة نظام محاكاة Arena لتحليل موسم حج 1422هـ، حيث نُقل نحو 160,000 حاج عبر 542 حافلة في مسار عرفة-مزدلفة، وخلصت إلى ضرورة ألا يقل عدد الحافلات عن 500 للحفاظ على زمن إخلاء معقول للمشعر (24). وفي السياق ذاته، اعتمدت دراسة موازية نموذجاً احتمالياً مبنياً على برنامج ProModel لتصميم منظومة الحافلات الترددية على امتداد طريق عرفة-مزدلفة، واقترحت لإخلاء عرفة في ست ساعات خطة تشمل 3,160 حافلة و740 محطة (25). ومن منظور مقارنة، كشفت دراسة أخرى عن إمكانية توظيف نهج تخطيط النقل المعتمد في دورة الألعاب الأولمبية الصيفية واستخلاص دروسه للتطبيق في تخطيط نقل الحج والعمرة (26).

وعليه فعند جمع هذه الدراسات معاً واستقراءها في مجملها، يتبيّن أن الأدبيات يمكن تلخيصها على أربعة محاور رئيسية: أولها أن موثوقية زمن الرحلة تُمثّل عنصراً حاسماً في قرار استخدام النقل العام؛ وثانيها أن زمن التوقف والسعة التشغيلية يتأثران مباشرةً بكثافة الركاب وبمدى تنظيم عمليات الإركاب؛ وثالثها أن منظومة Park and Ride لا تُحقق أهدافها إلا حين ترتبط بخدمة حافلات موثوقة وموقع مناسب؛ ورابعها أن المحاكاة الدقيقة المدعومة ببيانات GPS والملاحظات الميدانية تُمثّل الأداة الأنسب لاختبار التحسينات التشغيلية في البيئات عالية التذبذب (6،11،14،17،20).

وفي ضوء ذلك، يظهر بوضوح أن الفجوة البحثية لا تتمثل في غياب الحديث عن BRT أو Park and Ride في الأدبيات، بل في نقص الدراسات التي تربط في آنٍ واحد بين: التشغيل الفعلي لمسار حافلات يخدم المسجد النبوي الشريف بالمدينة المنورة في موسم رمضان، والتداخل الجزئي بين الحافلات والمركبات الخاصة، وازدحام الذروة

الموسمية وأثره في زمن التوقف وانتظام التردد، ثم اختبار السيناريوهات التشغيلية البديلة عبر محاكاة دقيقة مبنية على بيانات ميدانية حقيقية. وهذه التركيبة من العوامل المتداخلة تمنح الدراسة الحالية قيمةً تطبيقيةً لا تتوافر في الدراسات المتعلقة بـBRT (6،7،11،12،13،14،20).

وحيث تُسهم الدراسات المرتبطة بمنظومة النقل في المشاعر المقدسة في إبراز هذه الفجوة البحثية بصورة أوضح؛ فعلى الرغم من القيمة المنهجية العالية لهذه الدراسات من حيث توظيف نماذج المحاكاة، وبيانات نظام تحديد المواقع العالمي (GPS)، وأدوات التحليل الكمي المتقدمة، إلا أن تركيزها المكاني والتشغيلي انحصر بدرجة كبيرة في المشاعر المقدسة خلال موسم الحج. وبحسب علم الباحثين، لا توجد دراسات محاكاة مستفيضة وحديثة تناولت تشغيل الحافلات الترددية من وإلى المسجد النبوي بالمدينة المنورة خلال شهر رمضان، كما لم تتناول بصورة منهجية التداخلات المرورية بين الحافلات الترددية والمركبات الخاصة في المناطق المحيطة بالمسجد النبوي. ويعزز هذا القصور البحثي من أهمية الدراسة الحالية، ويبرز مسوّغاتها العلمية والتطبيقية في فهم الأنماط التشغيلية وتطوير كفاءة منظومة النقل.

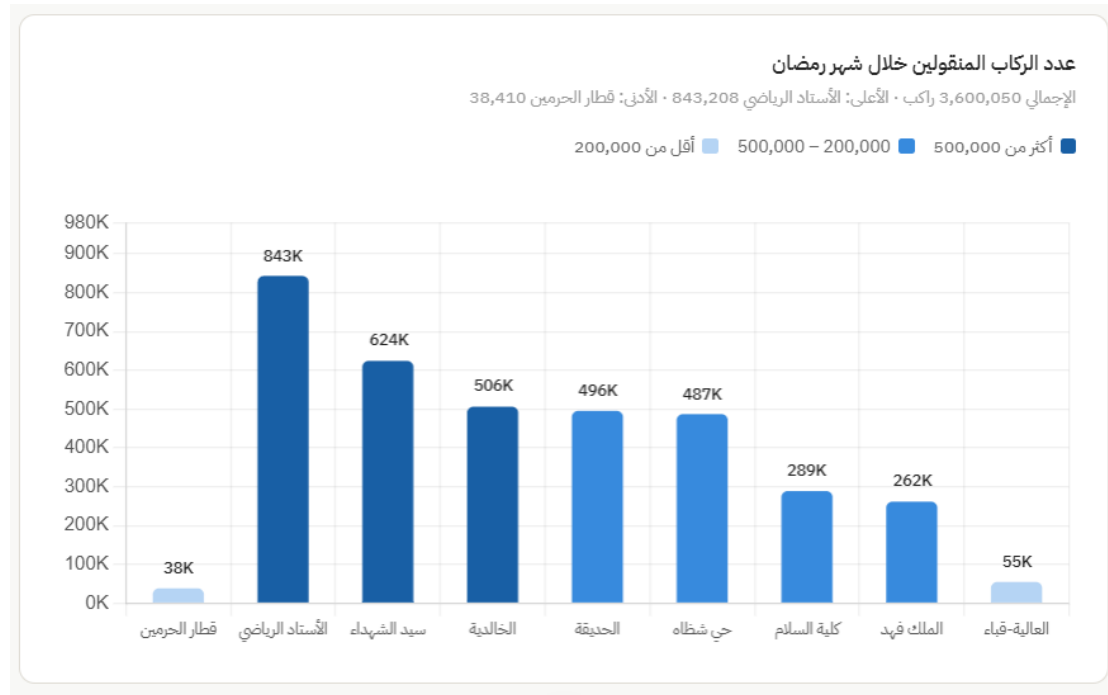
## 5. البيانات

تم الحصول على بيانات تشغيل حافلات النقل الترددي خلال شهر رمضان لعام 1447هـ من قبل هيئة تطوير منطقة المدينة المنورة، حيث شملت البيانات المؤشرات التشغيلية الرئيسة المرتبطة بأداء المنظومة. تشمل: اسم ورقم المسار، عدد أسطول الحافلة للمسار، عدد الركاب المنقولين لكامل الشهر، الطاقة الاستيعابية للحافلة، سرعة الحافلة (الأقل والمتوسط والأعلى لكل مسار)، زمن الرحلة (الأقل والمتوسط والأعلى لكل مسار)، طول المسار. وقد خضعت البيانات لعمليات تحليل وصفي كما يتضح في الأشكال التالية تهدف لفهم المحطات والفروقات بينها. وبناءً على ذلك، تم توظيف هذه البيانات في تطوير نموذج محاكاة أولي (Baseline Simulation Model) يمثل الحالة التشغيلية الفعلية للمنظومة ويعكس خصائصها الواقعية وأنماط الطلب والتشغيل. ويُستخدم هذا النموذج بوصفه مرجعاً أساسياً لاختبار وتقييم سيناريوهات تشغيلية بديلة، بما يسهم في فهم سلوك المنظومة بصورة أعمق، وتحليل تأثير المتغيرات التشغيلية المختلفة، واستكشاف فرص تحسين الكفاءة التشغيلية وجودة الخدمة وتعزيز الأداء العام لمنظومة النقل الترددي.

وتتضمن البيانات معلومات عامة موضحة في (شكل 2) إذ أن الحافلات الترددية تم تشغيلها على 9 مسارات ترددية للنقل من وإلى المسجد النبوي الشريف ونقلت خلال شهر رمضان عام 1447هـ 3.6 مليون مصّل وزائر بإجمالي 250 حافلة وبطول مسارات وصل إلى 135 كيلو متر.



شكل 2: يبين أبرز الأرقام لمنظومة النقل الترددي خلال شهر رمضان بشكل عام



شكل 3: يبين التفاوت بين عدد الركاب لكل مسارات النقل الترددي خلال شهر رمضان

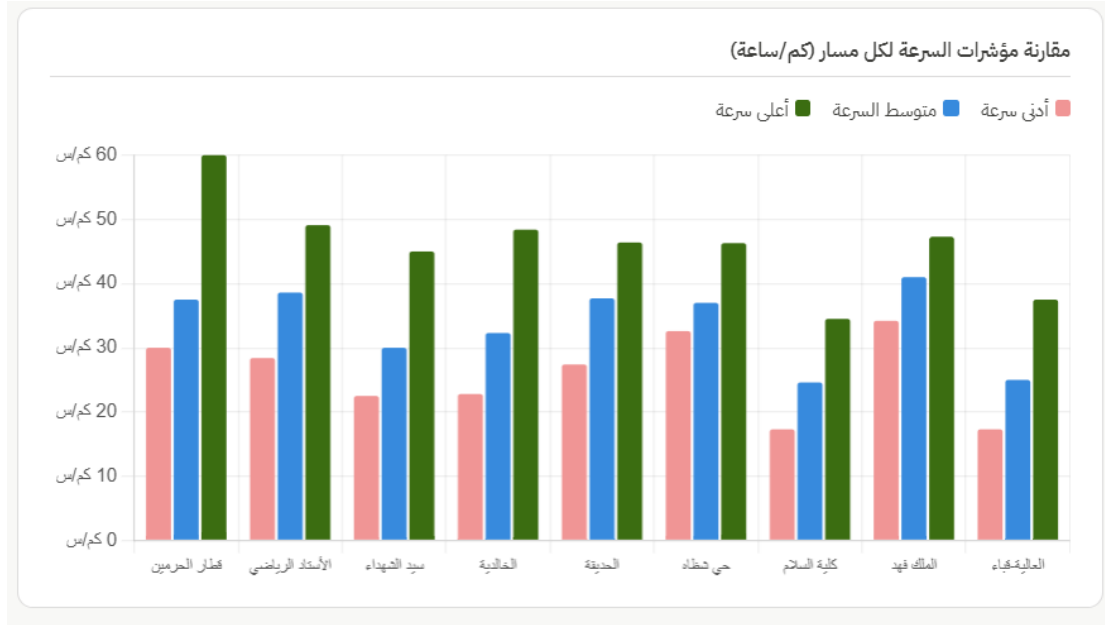
ويلاحظ في (شكل 3) أن أكثر محطتين تشهد إقبالا كبيرا هي محطة الاستاد الرياضي غرب المدينة المنورة ومحطة سيد الشهداء شمال المدينة المنورة وأن الأقل هي محطة العالية قباء والتي لاتصل إلى المسجد النبوي ومحطة قطار الحرمين التي تنقل المسافرين القادمين عبر القطار.



شكل 4: يبين الفروقات في حجم الطلب على الحافلة الواحدة خلال كامل شهر رمضان

ويوضح (شكل 4) أن محطة سيد الشهداء هي المحطة الأكثر خدمة من ناحية عدد الركاب المنقولين لكل حافلة وهذا يعزوا إلى حجم الاقبال الكبير وأيضا محدودية أسطول الحافلات مقارنة بمحطة الأستاذ الرياضي والتي خدمت عددا أكبر، ولكن بعدد أسطول أكبر مما يزيد من أريحية التنقل بها داخل الحافلة مقارنة بكثافة الركاب داخل حافلات محطة سيد الشهداء.

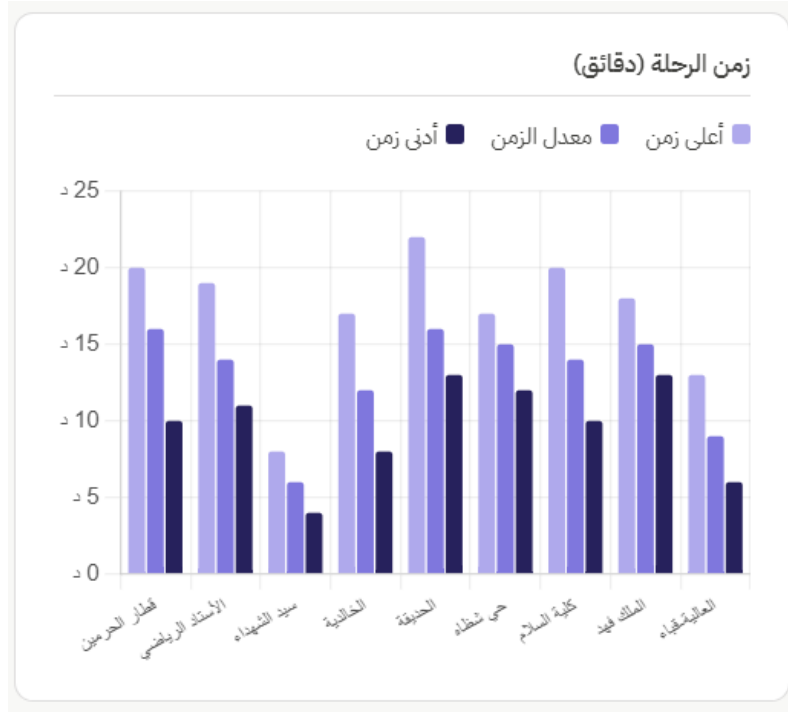
وبين (شكل 5) التالي التفاوت في السرعات بين المسارات ويبين ان المسارات المعزولة عن حركة السيارات مثل مسار الاستاد الرياضي وسيد الشهداء يشهد تفاوت أكبر بين حدود السرعة الأعلى الأدنى مقارنة بالمسارات الترددية المختلطة بحركة السيارات مثل مسار كلية السلام



شكل 5: يبين الفروقات في سرعة التنقل بالحافلات ويقارن السرعات الأعلى والمتوسط والأدنى لكل مسار خلال كامل شهر رمضان

ويبين (شكل 6) أن مسار سيد الشهداء وبالرغم أنه من المسارات الأكثر خدمة إلا أن زمن الرحلة فيه هو الأقصر من بين المسارات وذلك بسبب قصر المسار وفصل حركة الحافلات عن المركبات الأخرى.

أما (شكل 7) فهو يوضح بيانات كل مسار من (اسم المسار، وطوله، وعدد الركاب المنقولين خلال كامل الشهر، وعدد الحافلات لكل مسار، وعدد الركاب المنقولين لكل حافلة، ومتوسط السرعة، ومعدل زمن الرحلة، كالتالي:



شكل 6: يبين الفروقات في زمن الرحلة ويقارن الأزمنة الأعلى والمتوسط والأدنى لكل مسار خلال كامل شهر رمضان

| المسار          | الطول (كم) | الركاب  | الحافلات | ركاب/حافلة | متوسط السرعة | معدل الزمن |
|-----------------|------------|---------|----------|------------|--------------|------------|
| سيد الشهداء     | 6          | 624,236 | 24       | 26,010     | 30.0         | 6 د        |
| الأستاذ الرياضي | 18         | 843,208 | 57       | 14,793     | 38.6         | 14 د       |
| الخالدية        | 12.9       | 506,230 | 38       | 13,322     | 32.3         | 12 د       |
| حي شظاه         | 18.5       | 487,116 | 37       | 13,165     | 37.0         | 15 د       |
| الحديقة         | 20.1       | 495,506 | 43       | 11,523     | 37.7         | 16 د       |
| الملك فهد       | 20.5       | 261,653 | 24       | 10,902     | 41.0         | 15 د       |
| كلية السلام     | 11.5       | 288,864 | 19       | 15,203     | 24.6         | 14 د       |
| العالية-قباة    | 7.5        | 54,827  | 3        | 18,276     | 25.0         | 9 د        |
| قطار الحرمين    | 20         | 38,410  | 5        | 7,682      | 37.5         | 16 د       |

شكل 7: يبين البيانات التفصيلية لكل مسار خلال كامل شهر رمضان

ونستنتج من (شكل 7) أن أفضل مسار أداء هو سيد الشهداء - المركزية الشمالية إذ حقق أعلى عدد لركاب منقولين لكل حافلة خلال 30 يوما والسبب يعود لقصر المسار (6 كم) مما يسمح بعدد دورات أعلى لكل حافلة فاستطاعت نقل 624,236 راكباً بـ 24 حافلة فقط، أي ما يعادل 26,010 راكب لكل حافلة وهو الأعلى بفارق كبير عن بقية المسارات. أما أضعف مسار أداء هو قطار الحرمين - المركزية الجنوبية رغم طوله (20 كم) ، لم ينقل سوى 38,410 راكباً طوال الشهر بـ 5 حافلات فقط، أي أقل من 2% من إجمالي الركاب، وهو ما يشير إلى ضعف الطلب أو قصور في الجدولة. ونستنتج مما سبق أن كثافة الطلب على المسار القصير تتفوق دائماً على المسار الطويل في كفاءة الحافلة الواحدة.

## 6. منهجية الدراسة

تعتمد هذه الدراسة على منهجية تحليلية تكاملية تجمع بين التحليل الميداني لعناصر نظام النقل والنمذجة والمحاكاة التشغيلية، بهدف تقييم وتحسين أداء نظام الحافلات السريعة (BRT) في المدينة المنورة خلال فترات الذروة في شهر رمضان باستخدام تقنيات المحاكاة المرورية. وتحديدًا، تركز الدراسة على استراتيجيات تخطيط وتشغيل الحافلات الترددية فيها خلال الموسم، من خلال تحليل واقع التشغيل الفعلي لمسار المواقف والركوب (Park and Ride) وبعد تم تنفيذ جولة ميدانية من قبل الفريق البحثي خلال شهر رمضان المبارك لعام 1447هـ، جرى اختيار اثنين من أهم المحاور الشريانية في المدينة المنورة التي يتم تشغيل نظام الحافلات السريعة عليها، وهما: طريق الملك فهد وطريق السلام. ويربط طريق الملك فهد المنطقة الشمالية المحيطة بالمسجد النبوي الشريف بمواقف سيد الشهداء عند جبل أحد، في حين يربط طريق السلام الساحات الغربية للمسجد النبوي الشريف بمحطة الاستاد الرياضي غرب المدينة. وبعد الزيارة فقد وقع الاختيار لعمل المحاكاة على مسار طريق الملك فهد ليكون نطاق الدراسة الحالية، وذلك نظراً لتوفر البيانات المتعلقة به، إضافة إلى اكتمال عناصر المسار كنظام BRT ووضوح آلية تشغيله مقارنة بمسار طريق السلام. ويعد هذا الاختيار نواة أولية لبناء نموذج محاكاة لنظام النقل الترددي، يمكن التوسع فيه مستقبلاً ضمن دراسات أكثر شمولاً وتفصيلاً، لتشمل مسارات ومحاور إضافية ضمن شبكة النقل الحضري، بمشيئة الله.

مسار سيد الشهداء هو المسار الرابط بين محطة جبل أحد شمال المدينة والساحات الشمالية للمسجد النبوي الشريف عبر طريق الملك فهد. وتم تطوير نموذج للمسار وبناء نماذج محاكاة رقمية، مع التحقق من صحة النموذج ودقته.

تصميم نموذج المحاكاة يتضمن عدة خطوات أساسية تهدف إلى إنشاء محاكاة دقيقة وفعالة لنظام الحافلات الترددية، ويتم تنفيذ هذه الدراسة باستخدام برنامج Anylogic لتطوير نموذج المحاكاة، وتشمل منهجية العمل بناء النموذج، تشغيل السيناريوهات، واستخراج النتائج.

#### • بناء نموذج المحاكاة

- اختيار المكتبة المناسبة: استخدام مكتبة Road Traffic Library لمحاكاة حركة المركبات والازدحام المروري.
- بناء البيئة المرورية: تصميم الطريق الرابط بين محطة سيد الشهداء والمنطقة الشمالية من المسجد النبوي، مع إضافة المسارات المرورية (Roads)، والتقاطعات (Intersections)، ومحطات التوقف (Bus Stops).
- إنشاء وكيل المحاكاة (Agent) الخاص بالحافلة: يتم استخدام كائن Car أو Bus Agent من مكتبة Road Traffic Library، مع تعريف خصائص الحافلة مثل السعة، والسرعة، وجدول التشغيل، وتحديد مسار الحركة (Route).
- تنظيم تشغيل محطات الحافلات: تحديد آلية توقف الحافلات بالمحطات، بما يشمل نزول الركاب الواصلين وصعود الركاب المنتظرين وفق منطق التشغيل المعتمد في النموذج (Bus Stop Logic).

#### • تمثيل الحركة المرورية المختلطة

- تمت إضافة المركبات وإنشاء تدفقات مرورية للمركبات باستخدام أداة CarSource، بحيث تستخدم المركبات نفس شبكة الطرق المشتركة ضمن بيئة المحاكاة.
- يتم ضبط مستويات الازدحام المروري من خلال التحكم في كثافة التدفق المروري (Arrival Rate) وسرعات المركبات، نظرا لأهمية ذلك في التأثير المباشر على أداء الحافلات وكفاءة تشغيلها، خاصة فيما يتعلق بزمان الرحلة والانسيابية والالتزام بالجدول التشغيلية.

#### • تصميم السيناريوهات

في بيئة AnyLogic، تم استخدام تجربة تغيير المعاملات (Parameter Variation Experiment) لاختبار تأثير المتغيرات التشغيلية المختلفة على أداء النظام. تستخدم هذه التجربة لدراسة أثر تغيير مجموعة من المعاملات التشغيلية على مؤشرات الأداء الرئيسية، ومن أبرزها:

- تغيير عدد الحافلات.
  - اختبارات التداخل المروري (حركة مختلطة مقابل مسارات مخصصة - مستويات مختلفة من الازدحام).
  - كفاءة الصعود والنزول (سرعات مختلفة لصعود وتنزيل الركاب).
- وتهدف هذه التجارب إلى تقييم السيناريوهات التشغيلية المختلفة واختيار البدائل الأكثر كفاءة وملاءمة للطلب المتوقع.

● آلية عرض وتحليل النتائج:

- الرسوم البيانية (Charts): استخدام الرسوم البيانية لعرض مؤشرات الأداء الرئيسية، وتشمل:

- مؤشرات كفاءة النظام: إنتاجية الأسطول (حافلة/ركاب/ساعة).
- مؤشرات التشغيل: متوسط زمن الرحلة للحافلة، عدد الرحلات المنجزة لكل حافلة.
- مؤشرات التفاعل مع المرور: تأثير الحافلات على ازدحام وتدفق حركة المرور.

- التمثيل البصري المتحرك (Animation): توفير محاكاة مرئية لحركة النظام، وتشمل:

- حركة الحافلات على المسارات.
- مستويات الازدحام والكثافات المرورية.

وتهدف أدوات العرض البصري إلى دعم متخذي القرار من خلال تقديم صورة تفاعلية وواضحة لأداء النظام تحت مختلف السيناريوهات التشغيلية.

- الخرائط الحرارية لحركة المرور (Traffic Heat Maps): تمثيل بصري لكثافات الحركة والازدحام المروري لتحديد النقاط الحرجة ومناطق الاختناق.

## 7. تصميم نموذج المحاكاة

بناء على البيانات المتوفرة والملاحظات المرصودة، فقد تم اختيار مسار سيد الشهداء- الحرم شمال المسجد النبوي الشريف وذلك لأنه من ضمن المسارات الأعلى اقبالا وطلبا بالمدينة المنورة والأكثر جاهزية كنظام حافلات سريع مقارنة بالمسارات الأخرى حيث تم فصل حركة الحافلات على هذا المسار عن حركة السيارات وتشغيله كنظام BRT.

يتميز مسار (سيد الشهداء – الحرم) ضمن منظومة النقل الترددي بعدد من الخصائص التشغيلية والفنية التي تجعله من المسارات الحيوية في خدمة الزوار والمصلين بالمدينة المنورة. ويهدف المسار إلى توفير وسيلة نقل جماعي عالية الكفاءة تسهم في تخفيف الضغط المروري حول المنطقة المركزية، وتحسين تجربة التنقل للزوار، ورفع مستوى السلامة والانسيابية التشغيلية خلال المواسم ذات الكثافات العالية. ويبلغ طول المسار الكامل في الاتجاهين نحو 6 كم، ويتسم المسار بتنوع بيئته التشغيلية، إذ يشمل أجزاء ذات تدفق مروري حر نسبيا مخصصة بالكامل لحركة الحافلات، وأجزاء أخرى تتأثر بالتداخل المروري والتقاطعات والحركة العامة للمركبات. يبين (شكل 8) خريطة توضيحية لمسار النقل الترددي بطريق الملك فهد (سيد الشهداء – الحرم).



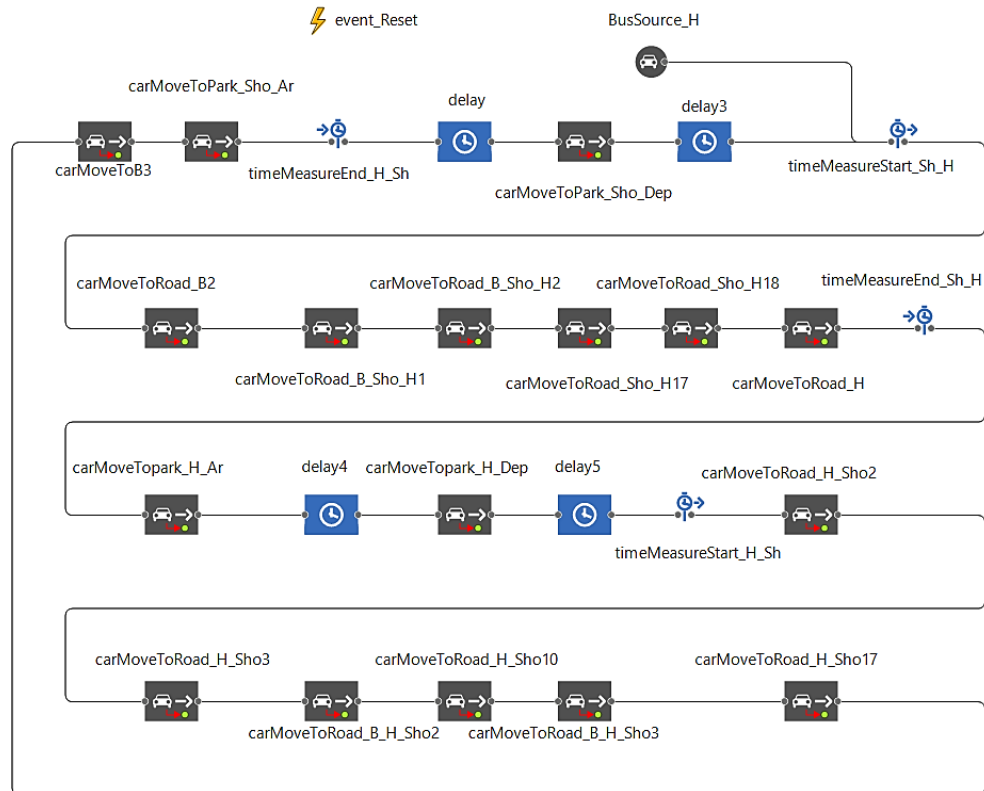
شكل 8: خريطة توضيحية لمسار النقل الترددي بطريق الملك فهد (سيد الشهداء – الحرم).

تم تصميم وإنشاء النموذج من خلال تطوير المخططات الخاصة بنظام العمل في نظام النقل الترددي، ويشمل ذلك تحديد السمات الأساسية للنظام وبرمجة عملياته لتوصيف وظائفه. في النموذج المطور، أمثلة للمعاملات المؤثرة في سلوك النظام تشمل العناصر التالية:

- (1) مسارات الحركة - عدد الحافلات - سرعة الحافلات - أبعاد الحافلات - أزمان التحميل والتنزيل.  
يتم قياس تأثيرات تغيير معاملات النظام باستخدام العديد من مؤشرات الأداء الرئيسية، أمثلة لها تشمل ما يلي:
- (2) زمن التنقل من محطة التحميل الى محطة النزول - زمن العودة - المدة الزمنية بين انطلاق الحافلات - عدد الحافلات المنطلقة في كل اتجاه حركة لكل وحدة زمنية (ساعة).

تم استخدام برنامج Anylogic لتطوير نموذج المحاكاة، وهو أداة متكاملة لمحاكاة الأنظمة باستخدام تقنيات متعددة، بما في ذلك نمذجة عمليات وديناميكيات النظام، إضافة إلى نمذجة الوكلاء. يتيح البرنامج دمج هذه الأساليب في نموذج واحد بواجهة رسومية. يحتوي البرنامج على مكتبة أدوات تتضمن محاكاة لحركة المرور، مما يجعله مناسباً تماماً لتطبيقه في هذه الدراسة. يوضح (شكل 9) الهيكل العام للعمليات في النموذج، بينما يقدم الأشكال 10-13 صور توضيحية ثلاثية الأبعاد للنموذج.

كما يمكن الاطلاع على التمثيل البصري المتحرك (Animation) الخاص بالمحاكاة، والذي يعرض حركة النظام، عبر مسح رمز الاستجابة السريعة (QR Code).



شكل 9: صورة توضيحية لمخططات العمليات بالنموذج.



شكل 10: صور لمسار طريق الملك فهد يوضح حركة الحافلات في برنامج المحاكاة



محطة الساحات الشمالية للمسجد النبوي



محطة سيد الشهداء

شكل 11: صور ثلاثية الأبعاد توضح نقطتي بداية ونهاية المسار.



شكل 12: صور توضح المسار الخاص للنقل عبر الحافلات السريعة والفصل بين حركة الحافلات والسيارات.

## 8. ملخص النتائج

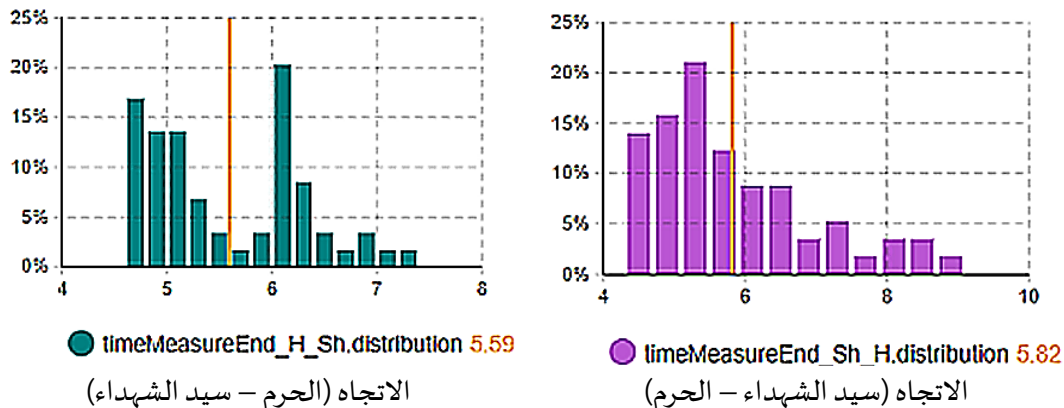
فيما يلي نتائج سيناريوهات المحاكاة ونتائج القياسات والملاحظات الميدانية:

### • نتائج سيناريوهات المحاكاة

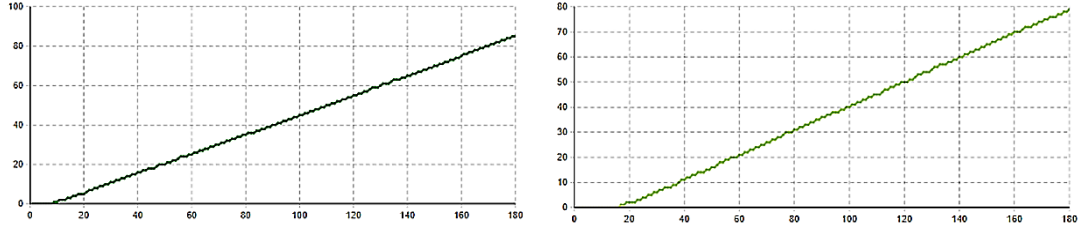
تم إجراء أحد سيناريوهات المحاكاة باستخدام 24 حافلة، مع افتراض زمن صعود ونزول للركاب يتراوح بين 2-3 دقيقة. وتشير نتائج المحاكاة خلال فترة تشغيل مدتها ساعتان إلى أن عدد رحلات الحافلات في الاتجاه الواحد بلغ 60 رحلة. ومع افتراض سعة تشغيلية قدرها 60 راكبا لكل حافلة، فإن الطاقة الاستيعابية خلال هذه الفترة تقدر بحوالي 7,200 راكب في الاتجاهين. وبافتراض تركّز التشغيل المكثف ضمن 6 ساعات يوميا، فإن إجمالي عدد الركاب المنقولين خلال اليوم يقدر بحوالي 21600 راكبا. كما بلغ متوسط زمن الرحلات في اتجاه سيد الشهداء - الحرم نحو 5.82 دقيقة، في حين بلغ متوسط زمن الرحلات في اتجاه الحرم - سيد الشهداء نحو 5.59 دقيقة.

يوضح (شكل 13) التوزيع الإحصائي لأزمنة الرحلات في كلا الاتجاهين: (سيد الشهداء - الحرم)، و(الحرم - سيد الشهداء)، بينما يوضح (شكل 14) عدد الرحلات الواصلة الى كلا المنطقتين (سيد الشهداء والحرم)

كما يوضح (شكل 15) خرائط حرارية توضح كثافات الحركة والازدحام المروري، والتي أظهرت تركّز الكثافات المرورية في مناطق تحميل الحافلات وعند نقاط التقاطع، ولا سيما في مناطق الالتفاف (U-turn)، مما يشير إلى كونها من النقاط الحرجة المؤثرة على انسيابية الحركة وكفاءة التشغيل.



شكل 13: التوزيع الإحصائي لأزمنة الرحلات في كلا الاتجاهين: (سيد الشهداء - الحرم)، و(الحرم - سيد الشهداء).



عدد الرحلات الواصلة الى منطقة الحرم  
عدد الرحلات الواصلة الى منطقة سيد الشهداء.  
شكل 14 : عدد الرحلات الواصلة الى كلا المنطقتين: سيد الشهداء والحرم.



المنطقة الشمالية للحرم  
المنطقة الوسطى بالمسار  
منطقة سيد الشهداء

شكل 15 : خرائط حرارية توضح كثافات الحركة والازدحام المروري.

#### ○ سيناريو تغيير عدد الحافلات وتحليل أثره على كفاءة التشغيل:

يهدف هذا السيناريو إلى دراسة أثر تغيير عدد الحافلات على كفاءة منظومة النقل. تعتمد الفكرة على اختبار عدة حالات تشغيلية بأعداد مختلفة من الحافلات، ثم تحليل تأثير ذلك على مؤشرات الأداء الرئيسية، مثل عدد الرحلات المنفذة، زمن الرحلات، ومستويات الازدحام في الطريق والمحطات. ويوضح جدول ١ ملخص النتائج.

جدول 1: نتائج تحليل أثر تغيير عدد الحافلات على كفاءة منظومة النقل.

| عدد الحافلات | عدد الرحلات على المسار للاتجاه الواحد | معدل زمن الرحلات على الاتجاه سيد الشهداء - الحرم (دقيقة) | معدل زمن الرحلات على الاتجاه الحرم - سيد الشهداء (دقيقة) | حالة الازدحام بالمحطات والطريق |
|--------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------|
| 15           | 51                                    | 5.11                                                     | 4.89                                                     | معتدل                          |
| 20           | 55                                    | 5.26                                                     | 5.29                                                     | معتدل                          |
| 24           | 60                                    | 5.82                                                     | 5.59                                                     | معتدل نسبياً                   |
| 30           | 59                                    | 5.35                                                     | 5.57                                                     | معتدل إلى مرتفع                |
| 35           | 60                                    | 5.05                                                     | 6.48                                                     | معتدل إلى مرتفع                |

يمكن استخلاص عدد من الملاحظات من نتائج المحاكاة، كما يلي:

- (1) زيادة عدد الحافلات لا تؤدي دائما إلى زيادة عدد الرحلات: توضح النتائج أن رفع عدد الحافلات من 15 إلى 24 حافلة ساهم في زيادة عدد الرحلات من 51 إلى 60 رحلة في الاتجاه الواحد، إلا أن الاستمرار في زيادة عدد الحافلات إلى 30 و35 حافلة لم يؤدّ إلى تحسن ملموس في عدد الرحلات، حيث استقر الأداء عند حدود 59-60 رحلة تقريبا. وهذا يشير إلى وجود حد تشغيلي أقصى للمسار، تصبح بعده الزيادة في عدد الحافلات غير فعالة.
  - (2) ارتفاع عدد الحافلات قد يرفع مستوى الازدحام ويؤثر على زمن الرحلة: مع زيادة عدد الحافلات، ارتفع مستوى الازدحام تدريجيا، كما ظهرت زيادة في متوسط أ زمن الرحلة، خصوصا عند 30 و35 حافلة. ويشير ذلك إلى أن كثافة الحافلات على الطريق والمحطات قد تؤدي إلى:
    - تباطؤ الحركة،
    - زيادة أوقات التوقف،
    - ارتفاع زمن الدوران التشغيلي للحافلات (إجمالي الزمن اللازم لإكمال الحافلة دورة تشغيل كاملة ذهابا وعودة إلى نقطة البداية).
  - (3) أفضل توازن تشغيلي يظهر عند 20-24 حافلة، حيث يحقق ذلك توازنا جيدا نسبيا بين عدد الرحلات، زمن الرحلة، ومستوى الازدحام. حيث تحقق 24 حافلة أعلى عدد رحلات (60 رحلة) مع مستوى ازدحام لا يزال ضمن الحدود المقبولة تشغيليا.
  - (4) زيادة الحافلات بعد حد معين قد تخفض الكفاءة التشغيلية: عند رفع عدد الحافلات إلى 30 و35 حافلة، لم تتحسن الطاقة التشغيلية، بل ظهرت مؤشرات على تراجع الكفاءة، مثل:
    - ثبات أو انخفاض عدد الرحلات،
    - ارتفاع زمن الرحلات في بعض الاتجاهات،
    - زيادة الازدحام بالمحطات والطريق.
- وهذا يدل على أن زيادة الأسطول دون تحسين البنية التشغيلية أو تنظيم الحركة قد تؤدي إلى تشبع المسار.

بصفة عامة، تشير النتائج إلى أن كفاءة تشغيل المسار لا تعتمد فقط على زيادة عدد الحافلات، بل على تحقيق توازن بين حجم الأسطول، والطاقة الاستيعابية للطريق والمحطات، ومستوى الازدحام التشغيلي. كما توضح النتائج وجود نطاق تشغيلي أمثل يحقق أعلى كفاءة ممكنة قبل الوصول إلى مرحلة التشبع المروري والتشغيلي.

## ○ سيناريو اختبار التداخل المروري ومستويات الازدحام

يركز هذا السيناريو على قياس تأثير كثافة الحركة المرورية والتداخل مع المركبات الأخرى على انسيابية التشغيل والأداء التشغيلي لمنظومة النقل. ويوضح جدول ٢ ملخص النتائج.

جدول 2: نتائج قياس تأثير كثافة الحركة المرورية والتداخل مع المركبات الأخرى على انسيابية التشغيل والأداء التشغيلي لمنظومة النقل.

| معدل زمن الرحلات على الاتجاه<br>الحرم - سيد الشهداء (دقيقة) | معدل زمن الرحلات على الاتجاه<br>سيد الشهداء - الحرم (دقيقة) | عدد الرحلات على<br>المسار للاتجاه الواحد | مستوى الازدحام           |
|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------|
| 5.33                                                        | 4.45                                                        | 70                                       | خال تماما من<br>الازدحام |
| 5.59                                                        | 5.82                                                        | 60                                       | عادي (متوسط)             |
| 9                                                           | 11                                                          | 56                                       | مرتفع                    |

يمكن استخلاص عدد من النتائج التشغيلية من بيانات المحاكاة، والتي توضح الأثر المباشر لمستوى الازدحام المروري على كفاءة تشغيل الحافلات وأداء الخدمة، وذلك على النحو التالي:

(1) وجود علاقة عكسية بين الازدحام وعدد الرحلات: توضح النتائج أن ارتفاع مستوى الازدحام يؤدي إلى انخفاض عدد الرحلات المنفذة على المسار في الاتجاه الواحد، رغم ثبات عدد الحافلات عند 24 حافلة في جميع السيناريوهات:

- في حالة عدم وجود ازدحام: 70 رحلة
- في الازدحام المتوسط: 60 رحلة
- في الازدحام المرتفع: 56 رحلة

وهذا يشير إلى أن الازدحام يقلل من الكفاءة التشغيلية ويحد من قدرة الأسطول على تنفيذ عدد أكبر من الرحلات.

(2) ارتفاع الازدحام يؤدي إلى زيادة زمن الرحلات بشكل كبير: أظهرت النتائج ارتفاعا ملحوظا في متوسط زمن الرحلة مع زيادة الازدحام، خاصة في مسار سيد الشهداء - الحرم، حيث ارتفع الزمن من 4.45

دقيقة في حالة التدفق الحر إلى 11 دقيقة في حالة الازدحام المرتفع، مما يدل على حساسية هذا المسار للازدحام المروري.

(3) تأثير الازدحام غير متماثل بين الاتجاهين: يتضح أن تأثير الازدحام على مسار سيد الشهداء - الحرم كان أكبر من تأثيره على المسار العكسي (الحرم - سيد الشهداء)، وقد يشير ذلك إلى اختلاف كثافة الحركة بين الاتجاهين، أو وجود نقاط اختناق أكثر تأثيراً في اتجاه الحرم.

بصفة عامة، تشير النتائج إلى أن مستوى الازدحام المروري يمثل عاملاً هاماً في كفاءة تشغيل خدمة الحافلات، حيث يؤدي ارتفاع الازدحام إلى تقليل عدد الرحلات وزيادة أزمات التنقل، مما ينعكس مباشرة على الطاقة الاستيعابية وجودة الخدمة المقدمة. وتؤكد النتائج أهمية تطبيق حلول لإدارة الحركة المرورية وتحسين انسيابية المسارات لضمان رفع كفاءة التشغيل خلال فترات الذروة.

#### ○ سيناريو اختبار كفاءة (سرعة) صعود ونزول الركاب

يهدف هذا الاختبار إلى تحليل أثر سرعة صعود ونزول الركاب على كفاءة التشغيل وعدد الرحلات وزمن التشغيل على المسار. كما يساهم في تقييم تأثير زمن التوقف بالمحطات على انسيابية الحركة والطاقة الاستيعابية لمنظومة النقل. ويوضح جدول 3 ملخص النتائج.

جدول 3: نتائج تحليل أثر سرعة صعود ونزول الركاب على كفاءة التشغيل وعدد الرحلات وزمن التشغيل على المسار.

| سرعة صعود ونزول الركاب | عدد الحافلات | عدد الرحلات على المسار للاتجاه الواحد | معدل زمن الرحلات على الاتجاه سيد الشهداء - الحرم (دقيقة) | معدل زمن الرحلات على الاتجاه الحرم - سيد الشهداء (دقيقة) |
|------------------------|--------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 2-1 دقيقة              | 24           | 130                                   | 6.22                                                     | 6.07                                                     |
| 3-2 دقيقة              | 24           | 60                                    | 5.82                                                     | 5.59                                                     |
| 4-3 دقيقة              | 24           | 46                                    | 5.77                                                     | 5.22                                                     |

يمكن استخلاص عدة ملاحظات تشغيلية مهمة من النتائج، أبرزها أن سرعة صعود ونزول الركاب قد تؤثر بصورة مباشرة على الطاقة التشغيلية وعدد الرحلات المنفذة، وفيما يلي أبرز الملاحظات.

- (1) انخفاض سرعة الصعود والنزول يقلل عدد الرحلات بشكل كبير: يتضح أن زيادة زمن صعود ونزول الركاب إلى 3-4 دقائق أدى إلى انخفاض عدد الرحلات في الاتجاه الواحد، وهذا يشير إلى أن زمن التوقف في المحطات يعد من العوامل الهامة والمؤثرة على كفاءة التشغيل واستغلال الحافلات.
  - (2) زيادة زمن التوقف تقلل الإنتاجية التشغيلية للحافلات: كلما استغرقت الحافلة وقتاً أطول في تحميل وتنزيل الركاب، قلّ عدد الدورات التشغيلية الممكن تنفيذها، وانخفض معدل الاستفادة من الأسطول.
  - (3) كفاءة المحطات وآلية صعود ونزول الركاب مهمة ومؤثرة، لذلك فإن تنظيم وإدارة الطوابير، تعدد أبواب الصعود والنزول، وتحسين إجراءات التحميل قد يرفع الطاقة التشغيلية بصورة كبيرة.
- وبصفة عامة، تشير النتائج إلى أن تحسين زمن صعود ونزول الركاب يمكن أن يحقق زيادة في عدد الرحلات والطاقة الاستيعابية دون الحاجة إلى زيادة عدد الحافلات أو تعديل البنية التحتية للمسار.

#### • تأثير التداخل المروري في الأجزاء المشتركة من المسار مع المركبات الأخرى

تشير خصائص المسار إلى أن إجمالي طوله في الاتجاهين يبلغ نحو 6 كم، منها حوالي 1,810 م تمثل أجزاء مشتركة مع المركبات الأخرى بنسبة 30.17% من إجمالي المسار، في حين يبلغ طول المسارات المخصصة للحافلات فقط نحو 4,190 م، بنسبة 69.83%. يوضح (شكل 16) الأجزاء المشتركة مع المركبات في المسار.

ويشير ذلك إلى أن غالبية المسار تعمل ضمن بيئة تشغيل شبه مخصصة للحافلات، الأمر الذي يسهم في تحسين الانسيابية التشغيلية وتقليل تأثير التداخل المروري على أداء الخدمة. ومع ذلك، فإن الأجزاء المشتركة ومناطق التعارض، رغم محدودية طولها النسبي، قد تمثل نقاطاً حرجية تؤثر بصورة مباشرة على زمن الرحلات وعدد الرحلات المنفذة، خاصة خلال فترات الذروة والازدحام المرتفع.

كما تشير النتائج إلى أن الازدحام في هذه الأجزاء المشتركة يمثل عاملاً مؤثراً في كفاءة التشغيل، إذ إن أي تباطؤ أو اختناق مروري فيها يؤدي إلى انخفاض الكفاءة التشغيلية وارتفاع زمن الرحلات. ويبرز ذلك أهمية:

- تقليل التداخل المروري في المقاطع المشتركة.
- التوسع في تخصيص المسارات للحافلات، قدر الإمكان.
- تحسين إدارة الحركة المرورية عند نقاط الدمج والتقاطعات.

#### ○ إعطاء أولوية مروية للحافلات في المناطق المشتركة.

بصفة عامة، تخصيص نحو 70% من المسار للحافلات يسهم بصورة مباشرة في تعزيز استقرار الأداء التشغيلي والحد من تأثير الازدحام المروري الخارجي، إلا أن كفاءة النظام تبقى مرتبطة بدرجة الانسيابية في الاجزاء المشتركة مع حركة المركبات الأخرى.



شكل 16 : خريطة توضيحية لمسار النقل الترددي بطريق الملك فهد، تبين الأجزاء المشتركة مع المركبات في المسار.

#### ● الملاحظات والقياسات الميدانية

##### القياسات الميدانية

- زمن الرحلة خروج ٦ دقائق من المسجد النبوي الى مواقف سيد الشهداء (وهو ما يتوافق بشكل تماما مع البيانات الواردة من الجهة المشغلة).
- زمن الرحلة الى المسجد النبوي ٨.٥ دقائق
- زمن التقاطر ٣ دقائق عند ذروة صلاة العشاء (ولوحظ أن هذا الزمن ليس بنيا وفق جداول زمنية محددة وإنما على مدى امتلاء الحافلة بالركاب وبناءا على قرار المشغل الميداني مما يجعل زمن التقاطر يختلف في رحلة الذهاب والعودة)

ولوحظ في مسار سيد الشهداء التالي:

#### 1) تشغيل النظام الترددي وإدارة الحشود

لوحظ أن إغلاق النظام الترددي يتم بعد مرور ساعة واحدة فقط من انتهاء صلاة التراويح وبعد نصف ساعة فقط بعد انتهاء صلاة التهجد بالعشر الأواخر من رمضان، الأمر الذي يدفع المصلين إلى مغادرة المسجد النبوي بشكل متسارع للحاق بالحافلات قبل توقف الخدمة. وقد نتج عن ذلك ظهور سلوكيات اندفاعية، تمثلت في الجري للوصول للحافلات والتدافع عند بوابات الحافلات، مما أدى إلى زيادة

الضغط التنظيمي على العاملين في الميدان، وصعوبة إدارة الحشود وتدفعاتهم بشكل آمن ومنظم، كما يوضح (شكل 17).

## (2) توزيع الحافلات والفصل بين الفئات

تم رصد تخصيص حافلات منفصلة للنساء، إلى جانب توفير حافلات مخصصة للعائلات، وهو ما أسهم بشكل إيجابي في تحقيق قدر من العدالة في توزيع الخدمة بين الجنسين مقارنة بالأعوام السابقة. ومع ذلك، لوحظ أن هذا التنظيم صاحبه زيادة نسبية في مسافة المشي بالنسبة لمواقف الرجال والعائلات، مما قد يؤثر على مستوى رضا المستفيدين.

## (3) البنية التحتية ومسارات المشاة

تبين وجود معابر مخصصة للمشاة تتقاطع مع مسار الحافلات الترددية بالقرب من المسجد النبوي، بهدف تسهيل انتقال المشاة إلى حافلات المسارات الأخرى. إلا أن هذا التقاطع قد يؤدي إلى تداخل في الحركة بين المشاة والحافلات، مما يستدعي تعزيز إجراءات السلامة والتنظيم في تلك المواقع.

## (4) اكتمال المسار الترددي والتحديات التشغيلية

لوحظ عدم اكتمال بعض أجزاء الطريق الترددي، خاصة في مناطق الالتفاف (U-Turn) الواقعة في منتصف طريق الملك فهد، حيث يحدث تداخل بين حركة المركبات الخاصة والحافلات. كما تم رصد هذا التداخل أيضا نهاية المسار في اتجاه المسجد النبوي قبل النفق.

## (5) تنظيم عمليات الإركاب

تمت ملاحظة ضعف في تنظيم عمليات إركاب الركاب عند بوابات الحافلات أثناء العودة من الحرم إلى المحطات الطرفية، مما يسبب ازدحاما وتكدسا، ويؤثر سلبا على كفاءة التشغيل وسلامة الركاب.

## (6) الإرشاد والتوجيه

لوحظ وصول عدد من الركاب التائهين إلى محطات غير مقصودة، نتيجة لضعف منظومة الإرشاد والتوجيه، إلى جانب محدودية التوعية بعدة لغات، وهو ما يعكس الحاجة إلى تطوير وسائل إرشادية أكثر فعالية وشمولا.

## (7) أولويات الإركاب

يوضح (شكل 18) آلية إركاب الأشخاص ذوي الإعاقة. ونظرا لتحديات التكديس والازدحام، فإن عملية فتح الباب، وسحب المنحدر المخصص، ثم إدخال الكرسي المتحرك تستغرق وقتا نسبيا طويلا. وفي بعض الحالات، يتم رفع الشخص مباشرة إلى الحافلة دون استخدام المنحدر المخصص، نتيجة الحاجة إلى مساحة وفراغ كافيين لتشغيله.

كما يتبين عدم وجود آلية واضحة لتحديد أولويات الإركاب والجلوس للفئات الأكثر احتياجا، مثل الأشخاص ذوي الإعاقة، والحوامل، والأطفال، وكبار السن، مقارنة ببقية الركاب، مما يستدعي وضع سياسات تنظيمية تراعي احتياجات هذه الفئات وتساهم في تعزيز جودة الخدمة المقدمة.



شكل 17 : طريقة الصعود للحافلات بعد انتهاء صلاة التراويح مباشرة.



شكل 18 : طريقة اركاب الأشخاص ذوي الإعاقة.

## 9. الخلاصة

هدفت الدراسة إلى تقييم وتحسين كفاءة تشغيل نظام الحافلات الترددية في المدينة المنورة خلال موسم رمضان، من خلال تحليل التشغيل الفعلي للمسار الرابط بين محطة سيد الشهداء والساحات الشمالية للمسجد النبوي عبر طريق الملك فهد، ودراسة أثر الترتيبات التشغيلية والبنية المسارية على انسيابية الحركة ومستوى الخدمة المقدمة للزوار والمصلين.. وقد تم في هذه المرحلة اعتماد منهجية علمية متكاملة تجمع بين التحليل الميداني وتقنيات النمذجة والمحاكاة، بما يتيح فهما دقيقا للواقع التشغيلي وتحديد أبرز التحديات المؤثرة على الأداء.

تم الحصول على البيانات التشغيلية لنظام النقل، حيث شملت رصد خصائص نظام الحركة، وقياس زمن الرحلات، وتحديد مستويات التأخير في مختلف أجزاء المسار، بما يوفر قاعدة بيانات دقيقة تعكس واقع التشغيل الفعلي للنظام.

كما تم تطوير نموذج المحاكاة، والذي يجسد الحالة التشغيلية الحالية لنظام النقل اعتماداً على البيانات الواردة من الجهة المشغلة. وقد أسهم هذا النموذج في تقديم توصيف أولي شامل للنظام، وتحديد أبرز خصائصه التشغيلية وأنماط أدائه، إضافة إلى إجراء عمليات المعايرة والتحقق للتأكد من مدى تطابق مخرجاته مع الواقع الفعلي.

تم تحليل النظام بشكل مفصل لتشخيص التحديات التشغيلية وتطوير حلول مناسبة، من خلال اختبار سيناريوهات مختلفة، وتشير نتائج المحاكاة إلى أن كفاءة تشغيل منظومة الحافلات لا تعتمد فقط على زيادة عدد الحافلات، بل تتأثر بصورة مباشرة بعدة عوامل تشغيلية مترابطة، أبرزها: تقليل الازدحام المروري، رفع كفاءة المحطات، تقليص زمن صعود ونزول الركاب، تحقيق توازن تشغيلي يمنع الوصول إلى مرحلة التشبع.

كما توضح النتائج أن الإدارة الذكية للتشغيل وتنظيم الحركة يمكن أن تحقق أثراً أكبر من مجرد زيادة حجم الأسطول التشغيلي.

أخيراً تواجه الدراسة عدداً من أوجه القصور التي ينبغي مراعاتها عند تفسير النتائج؛ إذ يقتصر نطاقها المكاني على مسار محدد من نظام النقل الترددي (Park and Ride) في المدينة المنورة، مما قد يحد من تعميم النتائج على بقية الشبكة. كما تركز الدراسة على فترات الذروة خلال شهر رمضان فقط، وهو ما قد لا يعكس أنماط التشغيل والطلب في المواسم الأخرى. إضافة إلى ذلك، تعتمد النتائج على بيانات تشغيلية وملاحظات ميدانية لفترة زمنية محددة، وقد تتأثر بظروف جمع البيانات. كما يستند نموذج المحاكاة إلى افتراضات تبسيطية قد تُحدث فروقات جزئية بين النتائج المحاكاة والواقع الفعلي، فضلاً عن عدم تضمين بعض العوامل غير المتحكم بها مثل الحوادث المرورية والتغيرات المفاجئة في الطلب.

## 10. التوصيات

في ضوء نتائج المحاكاة والملاحظات الميدانية والتحليل التشغيلي لمسار النقل الترددي، يمكن تلخيص أبرز التوصيات في النقاط التالية:

- 1) عدم الاعتماد على زيادة عدد الحافلات فقط كحل لتحسين الأداء التشغيلي، إذ أظهرت النتائج وجود حد تشغيلي أمثل يتراوح بين 20-24 حافلة، تصبح بعده الزيادة في الأسطول محدودة الفاعلية وقد تؤدي إلى ارتفاع الازدحام وانخفاض الكفاءة التشغيلية.

- (2) التركيز على الإدارة الذكية للتشغيل وتنظيم الحركة المرورية، لما لها من أثر أكبر في تحسين كفاءة الخدمة مقارنة بمجرد زيادة عدد الحافلات، وذلك من خلال تحسين توزيع الرحلات، وتنظيم أوقات التشغيل، وتقليل التداخلات المرورية.
- (3) يُوصى بتمديد ساعات تشغيل وسائل النقل العام في المنطقة المركزية بالمدينة المنورة خارج نطاق الأوقات المرتبطة بالصلوات مباشرةً، وإزالة القيد الزمني المفروض حالياً على حركة الزوار، مما يُتيح لهم الاستفادة من المنشآت التجارية والمطاعم والأنشطة الترفيهية والثقافية في المنطقة، فتحرير قرار المغادرة من ضغط توقف الخدمة يُحوّل الزيارة من طابعها الديني البحت إلى تجربة متكاملة ذات قيمة اقتصادية مُضافة، مما يرفع من معدلات الإنفاق للفرد ويدعم الإيرادات للمنشآت المحيطة، ويُعزز من تنافسية المنطقة المركزية كوجهة سياحية دينية واقتصادية متكاملة.
- (4) تقليل الازدحام المروري في المقاطع المشتركة مع المركبات الأخرى، لما له من تأثير مباشر على زمن الرحلات وعدد الرحلات المنفذة والطاقة الاستيعابية للنظام، خاصة خلال فترات الذروة.
- (5) التوسع في تخصيص المسارات للحافلات، قدر الإمكان، مع تحسين إدارة الحركة المرورية عند نقاط الدمج والتقاطعات (المداخل والمخارج)، وتوفير أولوية مرورية للحافلات في الأجزاء المشتركة من المسار.
- (6) تحسين كفاءة المحطات وعمليات صعود ونزول الركاب، من خلال تنظيم الطوابير، تحسين آليات التحميل والتنزيل، دراسة استخدام تعدد الأبواب أو المسارات التنظيمية المناسبة.
- (7) العمل على تقليل زمن التوقف بالمحطات، إذ أوضحت النتائج أن زمن صعود ونزول الركاب يعد من العوامل المؤثرة على عدد الرحلات والطاقة التشغيلية للحافلات.
- (8) تحقيق التوازن بين حجم الأسطول والطاقة الاستيعابية للمسار والمحطات، بما يمنع الوصول إلى مرحلة التشبع المروري والتشغيلي ويحافظ على استقرار الأداء خلال فترات الذروة.
- (9) الاستفادة من تقنيات النمذجة والمحاكاة الحاسوبية بصورة مستمرة في تقييم السيناريوهات التشغيلية واختبار البدائل قبل التطبيق الفعلي، بما يسهم في دعم اتخاذ القرار وتحسين كفاءة منظومة النقل الترددي.
- (10) دراسة التوسع المستقبلي للنموذج ليشمل مسارات ومحاور إضافية ضمن شبكة النقل الحضري، بما يتيح بناء نموذج محاكاة متكامل لدعم تخطيط وتشغيل منظومة النقل الجماعي بصورة أكثر شمولية.
- (11) تشير الملاحظات الميدانية إلى أن تحديات تشغيل نظام النقل الترددي ترتبط ارتباطاً وثيقاً بديناميكيات الحشود، مما يتطلب التعامل معه كنظام متكامل يجمع بين إدارة النقل وإدارة التدفقات البشرية. ويعد الإيقاف المفاجئ للخدمة من أبرز العوامل التي تؤدي إلى اضطراب السلوك الجماعي، لذا يوصى بتبني آليات

- للإيقاف التدريجي المدعوم بالمعلومات اللحظية، بما يسهم في تقليل الازدحام وحالة عدم اليقين بين المستخدمين.
- 12) أظهرت النتائج أن ربط التردد التشغيلي بمستوى امتلاء الحافلات قد يؤدي إلى عدم استقرار الخدمة، مما يستدعي الاعتماد على جداول تشغيل ديناميكية قائمة على التنبؤ بالطلب ومستويات الكثافة المتوقعة.
- 13) تبرز الحاجة إلى تحسين البنية التحتية التشغيلية، من خلال فصل مسارات المشاة عن مسارات الحافلات، ومعالجة نقاط التعارض والحركة المتقاطعة، خاصة في مناطق الالتفاف ونقاط التجمع.
- 14) يوصى بتخصيص مسارات وتجهيزات مناسبة للفئات ذات الاحتياجات الخاصة داخل المحطات، بما يضمن سهولة الحركة ورفع مستوى السلامة وجودة الخدمة المقدمة.
- 15) كما يعد تطوير منظومة إرشادية متعددة اللغات والوسائط من العوامل المهمة في تحسين توزيع الحشود وتقليل الارتباك، خاصة خلال فترات الذروة والكثافات العالية.
- 16) يوصى بتعميم تجربة نظام ال BRT لجميع المسارات الترددية لما لوحظ لها من سرعة في التشغيل وكفاءة أعلى في الأداء مقارنة بالمسارات الترددية المختلطة بحركة السيارات.
- 17) بصفة عامة، يتطلب تحسين أداء النظام تبني نهج تكاملي يشمل تطوير البنية التحتية، وتحسين العمليات التشغيلية، ورفع كفاءة إدارة الحشود، وتعزيز تجربة المستخدم، بما يضمن كفاءة واستدامة النظام في البيئات عالية الكثافة.

## المراجع

- 1) <https://spa.gov.sa/en/N2079002>
- 2) <https://spa.gov.sa/en/N2080551>
- 3) Saleem, M. A., Afzal, H., Ahmad, F., Ismail, H., & Nguyen, N. (2023). An exploration and importance-performance analysis of bus rapid transit systems' service quality attributes: Evidence from an emerging economy. *Transport Policy*, 141, 1-13.
- 4) Palaguachi, J., Padilla, M., Ortega, M., Solorzano, M. R., Uvidia, R. V., Ortega, J., & Veloz-Cherrez, D. (2024). Evaluating the Location of the Park-and-Ride System Using Multi-Criteria Methods: A Systematic Review. *Sustainability*, 16(23), 10187.
- 5) Ortega, J., Tóth, J., & Péter, T. (2021). Planning a park and ride system: A literature review. *Future Transportation*, 1(1), 82-98.
- 6) Zhuang, Z., Cheng, Z., Yao, J., Wang, J., & An, S. (2022). Bus travel time reliability incorporating stop waiting time and in-vehicle travel time with AVL data. *International Journal of Coal Science & Technology*, 9(1), 71.
- 7) Al-Hyasat, E. A., & Alhadidi, T. I. (2024). Evaluating the performance of implementing regionally coordinating bus priority signals under different control schemes. *Computational Urban Science*, 4(1), 22.
- 8) Blume, K., Cardenas, J., Sener, I. N., & Anderson, P. (2022). *Bus Rapid Transit: Current State of Practice* (No. TCRP Project J-07, Topic SA-53).
- 9) Al-haj, E. A., Alamoush, S., & Darwish, M. M. (2024). Service Quality of Amman BRT Based on User's Perceptions: A Structural Equation Modeling Approach. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28(8), 3506-3519.
- 10) Sogbe, E., Susilawati, S., & Pin, T. C. (2025). Scaling up public transport usage: a systematic literature review of service quality, satisfaction and attitude towards bus transport systems in developing countries. *Public Transport*, 17(1), 1-44.

- 11) Jenelius, E. (2018). Public transport experienced service reliability: Integrating travel time and travel conditions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 117, 275-291.
- 12) Dueker, K. J., Kimpel, T. J., Strathman, J. G., & Callas, S. (2004). Determinants of bus dwell time. *Journal of public transportation*, 7(1), 21-40.
- 13) Rodriguez, D. A., & Ardila, A. (2002). An empirical exploration of bus travel times and dwell times in a highly competitive exclusive busway. *Journal of Public Transportation*, 5(1), 39-60.
- 14) Kathuria, A., Parida, M., Sekhar, C. R., & Pathak, M. (2016). Examining bus lost time dynamics for a bus rapid transit station. *Journal of Public Transportation*, 19(2), 168-182.
- 15) Paudel, J. (2021). Bus ridership and service reliability: the case of public transportation in Western Massachusetts. *Transport Policy*, 100, 98-107.
- 16) Meek, S., Ison, S., & Enoch, M. (2008). Role of bus-based park and ride in the UK: a temporal and evaluative review. *Transport reviews*, 28(6), 781-803.
- 17) Cornejo, L., Perez, S., Cheu, R. L., & Hernandez, S. (2014). An approach to comprehensively evaluate potential park and ride facilities. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 3(1), 1-18.
- 18) Stieffenhofer, K. E., Barton, M., & Gayah, V. V. (2016). Assessing park-and-ride efficiency and user reactions to parking management strategies. *Journal of Public Transportation*, 19(4), 75-92.
- 19) Moslem, S., Ortega, J., Ortega, J., Padilla, M., Ouelhadj, D., & Esztergar-Kiss, D. (2024). Optimizing park and ride location selection using the novel parsimonious full consistency method: insights from Cuenca, Ecuador. *Research in Transportation Business & Management*, 56, 101171.
- 20) Horning, J., El-Geneidy, A. M., & Hourdos, J. (2009). Estimating Running Time and Demand for a Bus Rapid Transit Corridor.

- 21) Mohamed S. Yasein and Esam Ali Khan, "Optimizing Shuttle-Bus Systems in Mega-Events using Computer Modeling: A Case Study of Pilgrims' Transportation System", International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), Vol. 14, No. 11, 2023.
- 22) O. Hussain, E. Felemban, and F. U. Rehman, "Optimization of the Mashaer Shuttle-Bus Service in Hajj: Arafat-Muzdalifah Case Study," Information, vol. 12, no. 12, p. 496, Nov. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/info12120496>.
- 23) E. Felemban, F. U. Rehman, A. A. Biabani, A. Naseer, O. Hussain, E. U. Warriach, "An Interactive System for Analyzing Movement of Buses in Hajj," J. Theor. Appl. Inf. Technol., 98, 3468–3481, 2020.
- 24) S. Al-Sabban and H. Ramadan, "A Simulation Study of the Shuttle-Bus Pilgrim Transportation System between the Holy Sites for the 1422H Hajj Season," J. King Abdulaziz University-Eng. Sci., vol. 16, no. 2, pp. 71–93, 2005. Accessed: May 22, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4197/eng.16-2.5>.
- 25) M. Seliaman, S. Duffuaa, A. Andijani, "Stochastic Simulation Model for the Design of a Shuttle Bus System to Transport Pilgrims in Hajj," Researchgate, 2013.
- 26) G. Currie and A. Shalaby, "Synthesis of Transport Planning Approaches for the World's Largest Events," Transport Rev., vol. 32, no. 1, pp. 113–136, Jan. 2012. Accessed: May 22, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/01441647.2011.601352>

## الملحق

## مصطلحات الدراسة

- (1) نظام الحافلات سريعة التردد (Bus Rapid Transit - BRT): هو نظام نقل عام يعتمد على تشغيل حافلات ضمن مسارات مخصصة أو شبه مخصصة، بهدف تحقيق مستوى خدمة قريب من أنظمة المترو من حيث السرعة والموثوقية، مع تكلفة إنشائية وتشغيلية أقل. يتميز هذا النظام بعناصر تشغيلية متقدمة مثل أولوية الإشارات، ومحطات منظمة، وأنظمة إركاب سريعة، وترددات زمنية منتظمة، مما يساهم في تحسين كفاءة النقل وتقليل زمن الرحلات.
- (2) نظام أوقف مركبتك واركب (Park and Ride): هو نظام نقل تكاملي يهدف إلى تقليل الازدحام داخل المناطق الحضرية أو ذات الكثافة العالية، من خلال توفير مواقف خارجية للمركبات الخاصة، بحيث يقوم المستخدم بترك مركبته والانتقال إلى وسيلة نقل عام (مثل الحافلات أو القطارات) لإكمال رحلته. يساهم هذا النظام في خفض أعداد المركبات الداخلة إلى المناطق المركزية وتحسين انسيابية الحركة المرورية.
- (3) التقاطر (Headway): هو الفاصل الزمني بين وصول مركبتين متتاليتين لنفس المسار في نقطة محددة، ويُعد من أهم مؤشرات جودة الخدمة في أنظمة النقل العام، حيث يؤثر بشكل مباشر على زمن انتظار الركاب ومستوى رضاهم.
- (4) زمن الرحلة (Travel Time): هو إجمالي الزمن الذي يستغرقه الراكب منذ بداية الرحلة حتى الوصول إلى الوجهة النهائية، ويشمل زمن الحركة، وزمن التوقف، وزمن الانتظار، ويُستخدم كمؤشر رئيسي لتقييم كفاءة النظام.
- (5) إدارة الحشود (Crowd Management): تشير إلى مجموعة الاستراتيجيات والإجراءات المستخدمة لتنظيم تدفق الأفراد في البيئات ذات الكثافة العالية، بهدف ضمان السلامة وتحقيق انسيابية الحركة وتقليل المخاطر المرتبطة بالتزاحم.
- (6) سعة النظام (Capacity): هي الحد الأقصى لعدد الركاب أو المركبات الذين يمكن للنظام نقلهم خلال فترة زمنية محددة، وتعتمد على عدة عوامل مثل عدد المركبات، وسعتها، والتردد التشغيلي، وكفاءة عمليات الإركاب.
- (7) مناطق التعارض (Conflict Points): هي المواقع التي تتقاطع فيها مسارات الحركة المختلفة، مثل تقاطع حركة المشاة مع الحافلات أو المركبات، مما يؤدي إلى احتمالية حدوث تأخير أو مخاطر سلامة، وتُعد من العناصر المهمة في تقييم تصميم البنية التحتية.

- (8) أولوية الحافلات (Bus Priority): هي مجموعة من الإجراءات التشغيلية والهندسية التي تهدف إلى إعطاء الأفضلية لحركة الحافلات مقارنة بباقي المركبات، مثل تخصيص مسارات خاصة أو تعديل توقيت الإشارات المرورية، مما يساهم في تحسين سرعة الخدمة وانتظامها.
- (9) إمكانية الوصول (Accessibility): تعبر عن مدى سهولة وصول المستخدمين إلى خدمات النقل العام واستخدامها، وتشمل عوامل مثل مسافة المشي، وتوفر المرافق، وملاءمة الخدمة لمختلف الفئات، بما في ذلك ذوي الاحتياجات الخاصة.
- (10) إدارة الطوابير (Queue Management): هي تنظيم تدفق الركاب أثناء الانتظار والصعود إلى وسائل النقل، من خلال تصميم مسارات محددة وآليات تحكم، بهدف تقليل الازدحام وتحسين كفاءة الإركاب.
- (11) زمن التوقف (Dwell Time): هو الزمن الذي تقضيه الحافلة في المحطة لأغراض صعود ونزول الركاب، ويُعد عاملاً حاسماً في تحديد زمن الرحلة الكلي وكفاءة التشغيل، خاصة في البيئات ذات الطلب المرتفع.
- (12) النمذجة (Modelling): عبارة عن تجريد للنظام الحقيقي بحيث يتم تجميع معلومات حول النظام لغرض دراسته. ولدراسة نظام ما، لابد من بناء نموذج لوصف هذا النظام لغرض إجراء تجارب للإجابة على أسئلة وافتراسات لا يمكن (أو يصعب) إجرائها على النظام مباشرة وذلك حتى لا يضطرب النظام الأصلي ويحدث ارتباك في عمله.
- (13) المحاكاة (Simulation): هي عملية تحليل نموذج أولي رقمي لنموذج مادي للتنبؤ بأدائه في العالم الحقيقي. تستخدم نمذجة المحاكاة لمساعدة مصممي النظم على فهم عمل النظام، وفي هذه الخطوة يتم تحديد البدائل المراد فحصها بالنموذج، وطرق إجراء التجارب لمحاكاة سناريوهات المختلفة.



@Hajj\_uqu



<https://uqu.edu.sa/hajj>



[hajj@uqu.edu.sa](mailto:hajj@uqu.edu.sa)

