

مقارنة فعالية بعض المطهرات الأمانة في خفض مؤشرات التلوث السطحي على لحوم الأضاحي

الباحث الرئيس

أ.د. بسام حسين مشاط

الباحث المشارك

أ. ماهر حسين مشاط

١٤٤٧هـ (٢٠٢٦)

قسم البيئية والصحية

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مقارنة فعالية بعض المطهرات الأمانة في خفض مؤشرات التلوث السطحي على لحوم الأضاحي

الملخص

تمثل السيطرة على التلوث السطحي للذبائح أحد التحديات التشغيلية الرئيسة في مشروع المملكة العربية السعودية للإفادة من الهدي والأضاحي، وذلك في ظل الكثافة العالية لعمليات الذبح والتجهيز خلال فترة زمنية محدودة لا تتجاوز ٨٤ ساعة، لذلك فقد هدفت الدراسة إلى مقارنة التغير في مؤشرات التلوث السطحي المقاسة بتقنية الأدينوسين ثلاثي الفوسفات (ATP) بعد استخدام ثلاثة مطهرات هي بولي هيكساميثيلين جوانيديين (PHMG)، وحمض الهيپوكلوروس (HOCl)، وبيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2)، مع مقارنة مساري الرش اليدوي والغسيل والرش الآلي وتقييم بعض الخصائص التشغيلية لوحدة المعالجة. أظهرت نتائج الدراسة انخفاضاً معنوياً في قراءات ATP مقارنة بخطط الأساس (العينات الضابطة)، مع تزايد نسب الانخفاض مع زيادة زمن الملامسة من ٥ دقائق إلى ١٥ دقيقة. كما سجل المطهر PHMG أعلى متوسطات الانخفاض، يليه المطهر HOCl ثم المطهر H_2O_2 ، في حين أظهر مسار الرش اليدوي نسب خفض أعلى مقارنة بمسار الرش الآلي. كذلك أظهرت الدراسة وجود تباين في الخصائص التشغيلية للمجازر، بما في ذلك زمن مرور الذبيحة في وحدة الغسيل الآلي وكمية مياه الغسيل العالقة على سطح الذبيحة، وهي عوامل قد تؤثر في ظروف تطبيق المطهرات. كما تقتصر النتائج على التغير في مؤشرات ATP، ولا تمثل قياساً مباشراً للخفض الميكروبي، لذلك فقد تمت التوصية بإجراء دراسة مستقبلية لتحقيق من تأثير المطهرات باستخدام مؤشرات ميكروبية مباشرة.

الكلمات المفتاحية: تلوث الذبائح، تطهير الذبائح، PHMG، HOCl، H_2O_2 ، ATP

Comparative Efficacy of Selected Safe Disinfectants in Reducing Surface Contamination Indicators on Sacrificial Animal Meat

Abstract

Controlling surface contamination of carcasses represents a major operational challenge in the Saudi Project for the Utilization of Hady and Adahi, particularly given the high intensity of slaughter and processing activities within a limited operational period. This study aimed to compare changes in surface contamination indicators measured using adenosine triphosphate (ATP) bioluminescence following the application of three disinfectants: polyhexamethylene guanidine (PHMG), hypochlorous acid (HOCl), and hydrogen peroxide (H₂O₂). Manual spraying and automated washing–spraying routes were also compared, together with selected operational characteristics of the treatment units. The results showed significant reductions in ATP readings relative to baseline values, with progressively greater reductions observed at measurements taken 5, 10, and 15 minutes after treatment. PHMG-treated groups showed the highest mean reductions, followed by HOCl- and H₂O₂-treated groups. Manual spraying also produced greater reductions than the automated route. Operational differences among slaughterhouses, including carcass passage time and the amount of residual water retained on carcass surfaces, may have influenced disinfectant application conditions. These findings are limited to changes in ATP-based indicators and should not be interpreted as direct measures of microbial reduction; therefore, further validation using direct microbiological methods is warranted.

Keywords: Carcass contamination; carcass decontamination; PHMG; HOCl; H₂O₂; ATP.

الملخص التنفيذي

تأتي هذه الدراسة في إطار دعم جهود تعزيز سلامة لحوم الهدي والأضاحي ورفع كفاءة عمليات الغسيل والتطهير في مجازر مشروع المملكة العربية السعودية للإفادة من الهدي والأضاحي (مشروع أضاحي)، الذي يعمل خلال فترة موسمية قصيرة وبكثافة تشغيلية مرتفعة قد تزيد عن مليون ذبيحة خلال نحو ٨٤ ساعة، حيث تفرض هذه البيئة التشغيلية تحديات تتعلق بالمحافظة على مستوى ثابت من النظافة والسيطرة على التلوث السطحي للذبائح، بما يستلزم تقييم فعالية برامج التطهير في ظروف التشغيل الفعلية وتحديد العوامل التي قد تؤثر في أدائها.

تهدف الدراسة إلى تقييم التغير في مؤشرات التلوث السطحي للذبائح بعد تطبيق ثلاث مطهرات هي بولي هيكساميثيلين جوانيدين (PHMG)، وحمض الهيپوكلوروس (HOCl)، وبيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2)، باستخدام تقنية الأدينوسين ثلاثي الفوسفات (ATP) بوصفها أداة سريعة للتحقق الميداني من مستوى النظافة السطحية، كما قارنت الدراسة بين مسارين للتطبيق هما الرش اليدوي المباشر والغسيل والرش الآلي بالمطهر، إلى جانب تقييم عدد من الخصائص التشغيلية لوحدات المعالجة، وبخاصة زمن مرور الذبيحة وكمية السائل العالق على سطحها بعد الغسيل.

اعتمدت الدراسة على تسجيل قراءة مرجعية قبل المعالجة (العينات الضابطة)، ثم قياسات لاحقة بعد ٥ دقائق، وبعد ١٠ دقائق ثم بعد ١٥ دقيقة من تطبيق المطهر، حيث تعد تقنية ATP مناسبة للتحقق التشغيلي السريع، إلا أن الأدلة العلمية تبين أنها تقيس إجمالي المحتوى الحيوي والعضوي على السطح، ولا تمثل قياساً مباشراً لأعداد الكائنات الدقيقة الحية، كما أن العلاقة بين نتائج ATP والقياسات الميكروبية ليست ثابتة بما يسمح بالاعتماد عليها منفردة لتقدير الحمل الميكروبي.

أظهرت نتائج الدراسة انخفاضاً متدرجاً في قراءات ATP بعد تطبيق المطهرات، مع زيادة زمن التلامس بعد ٥ دقائق، وبعد ١٠ دقائق ثم بعد ١٥ دقيقة. وفي مسار الرش اليدوي، سجلت مجموعات PHMG أعلى متوسطات للانخفاض، حيث بلغت نحو نسبة ٥٥٪، ونسبة ٦٥٪، ونسبة ٧٤,٨٪ على التوالي، مقارنة بنسبة ٣٥٪، ونسبة ٤٣,٤٪، ونسبة ٥٧,٩٪ لمجموعات HOCl، إضافة إلى نسبة ٣٠٪، ونسبة ٤٢,٩٪، ونسبة ٥٣٪ لمجموعة H_2O_2 . أما في مسار الغسيل والرش الآلي، فكانت نسب الانخفاض أقل إذ بلغت بعد ١٥ دقيقة نسبة ٤٠,٥٪ لمجموعات PHMG، ونسبة ٢٧,٩٪ لمجموعات HOCl، ونسبة ٢٢,٤٪ لمجموعة H_2O_2 .

وعليه، سجلت مجموعات PHMG أعلى أداء نسبي في مؤشرات ATP ضمن ظروف الدراسة، كما سجل مسار الرش اليدوي انخفاضاً أكبر من مسار الغسيل والرش الآلي.

ولا ينبغي تفسير هذه الفروق على أنها ناتجة عن نوع المطهر وحده، إذ أظهرت نتائج الدراسة تبايناً في الظروف التشغيلية بين المجازر، من أهمها تصميم وحدات الغسيل والتطهير، وزمن مرور الذبائح، وكمية المياه العالقة على أسطحها. كما أن ارتباط كل مطهر بموقع مجزرة أو مواقع محددة يحد من القدرة على فصل أثر المادة المطهرة بصورة كاملة عن أثر خصائص المجزرة وطريقة التطبيق. ومن ثم تمثل النتائج الحالية مقارنة ميدانية بين أنظمة تشغيلية متكاملة أكثر من كونها اختباراً تجريبياً لفعالية المواد الفعالة.

وتدعم الدراسات السابقة احتمال أن تسهم الخصائص الكيميائية وآليات عمل المطهرات في جانب من الاختلافات المرصودة، فقد تبين أن PHMG يؤثر بصورة رئيسة من خلال إحداث اضطراب في بنية الأغشية الميكروبية وزيادة نفاذيتها، وهو ما يؤدي إلى تسرب المكونات الخلوية وتعطيل الخلية. وفي المقابل، يعتمد كل من المطهر HOCl والمطهر H_2O_2 بدرجة رئيسة على الآليات التأكسدية، وتتأثر فعالية المركبات المعتمدة على الكلور بعوامل من بينها الرقم الهيدروجيني pH، وتركيز الكلور الحر، ووجود المواد العضوية، إذ يمكن لبقايا البروتينات والأنسجة والمواد العضوية أن تقلل من فعالية التطهير.

كذلك تشير الأدبيات إلى أن فعالية المطهر HOCl ترتبط بظروف تحضيره واستخدامه، ولا سيما الرقم الهيدروجيني pH وتركيز الكلور الحر المتاح كما تم إيضاحه سابقاً، مما يؤكد أهمية التحقق من الخصائص الفعلية للمحلول عند نقطة الاستخدام، وليس الاكتفاء بالتركيز الاسمي أثناء التحضير. كما أظهرت الدراسات أيضاً أن الجمع بين حمض البيروكسيتيك (PAA) والمطهر H_2O_2 ، قد يحقق تأثيراً أقوى مضاداً للميكروبات في بعض الظروف، وأن متبقيات حمض PAA والمطهر H_2O_2 على اللحوم والدواجن يمكن أن تتناقص سريعاً بعد المعالجة إلى مستويات دون حدود الكشف في ظروف تجريبية محددة، وهو ما يدعم استخدام بعض هذه التركيبات كمساعدات تصنيع عند الالتزام بشروط الاستخدام التنظيمية المعتمدة.

وتؤكد هذه الشواهد أن كفاءة التطهير في المجازر هي نتاج تفاعل بين نوع المطهر وظروف تطبيقه، بما يشمل تركيز المادة الفعالة، وكمية محلول التطهير المطبقة لكل ذبيحة، وانتظام التغطية، وكمية مياه الغسيل المتبقية على السطح، والحمل العضوي، وزمن المعالجة، وتصميم وحدة الغسيل والتطهير. إلا أن الدراسة الحالية لم تقس الحمل العضوي أو التركيز الفعلي المتبقي للمطهر على سطح الذبيحة بصورة مباشرة،

ولذلك ينبغي النظر إلى هذه الآليات بوصفها تفسيرات علمية محتملة مستندة إلى الدراسات السابقة، وليست أسباباً مثبتة بصورة مباشرة في الدراسة الحالية.

في ضوء ما أظهرته الدراسة من تباين في كفاءة المعالجة واختلاف في الظروف التشغيلية بين المجازر، برزت الحاجة إلى توحيد إجراءات الغسيل والتطهير، وضبط تركيز وجرة المطهرات، وتعزيز آليات التحقق من الأداء، ومن ثم توصي الدراسة بما يلي:

(١) توحيد إجراءات الغسيل والتطهير من خلال إعداد دليل تشغيلي موحد يحدد متطلبات تحضير المطهرات وتخفيفها، وآليات الرش والتغطية، وزمن المعالجة، والمتغيرات التشغيلية الواجب ضبطها، للحد من التباين بين المجازر.

(٢) ضبط التركيز والجرعة التطبيقية للمطهرات من خلال التحقق من التركيز الفعلي وكمية محلول التطهير المطبقة لكل ذبيحة عند نقطة الاستخدام، مع مراعاة أثر مياه الغسيل المتبقية على السطح، بما يضمن تحقيق التركيز التشغيلي للمطهر المستهدف وتجانس المعالجة.

(٣) تعزيز التحقق من كفاءة التطهير من خلال برنامج متابعة يجمع بين القياسات السريعة بتقنية ATP والاختبارات الميكروبية، والاستفادة من نتائجها في تطوير المواصفات والبروتوكولات التشغيلية للمجازر عالية الكثافة.

كشفت الدراسة عن عدد من الفجوات التي لم تحسم بصورة كاملة، وبخاصة التحقق الميكروبي المباشر، وفصل أثر المطهر عن أثر الغسيل وموقع المجزرة، وقياس التركيز الفعلي على سطح الذبيحة، ومن ثم تقترح الدراسة المحاور البحثية الآتية:

(١) التحقق الميكروبي من نتائج ATP من خلال ربطها بالعد الهوائي للمستعمرات الميكروبية (APC) قبل المعالجة وبعدها، لتحديد مقدار الخفض الفعلي في الحمل الميكروبي القابل للحياة ومدى صلاحية ATP للتحقق التشغيلي.

(٢) فصل أثر الغسيل عن أثر المطهر باستخدام تصميم تجريبي يتضمن مجموعة للغسيل بالماء فقط، بما يسمح بتحديد مقدار الخفض الناتج عن الإزالة الفيزيائية والأثر الإضافي للمطهر.

(٣) فصل أثر المطهر عن أثر الموقع والظروف التشغيلية من خلال دراسات متعددة المجازر يطبق فيها كل مطهر تحت ظروف موحدة قدر الإمكان، مع دراسة العلاقة بين كمية الماء العالقة، والتركيز

والجرعة الفعلية للمطهر، والحمل العضوي، وكفاءة خفض الميكروبي، وصولاً إلى تحديد الظروف التشغيلية المثلى لكل مطهر.

وعليه، تقدم الدراسة قاعدة ميدانية تطبيقية لتطوير منظومة الغسيل والتطهير في مجازر مشروع أضاحي، وتؤكد أن رفع كفاءة التطهير يتطلب ضبط المنظومة التشغيلية بأكملها، وليس اختيار المادة المطهرة بمعزل عن ظروف استخدامها. وفي الوقت نفسه، ينبغي تفسير النتائج الحالية في حدود مؤشرات ATP وتصميم الدراسة، وعدم اعتبارها دليلاً نهائياً على مقدار خفض الميكروبي أو أساساً منفرداً للمفاضلة النهائية بين المطهرات قبل استكمال التحقق من التأثير على الميكروبات.

المحتويات

المملخص.....	٣
Abstract.....	٤
المملخص التنفيذي.....	٥
١. مقدمة.....	١٣
٢. التعريف بالبحث.....	١٥
١.٢. مشكلة الدراسة.....	١٥
٢.٢. أهمية الدراسة.....	١٦
٣.٢. أهداف الدراسة.....	١٦
٤.٢. تساؤلات الدراسة.....	١٧
٥.٢. حدود الدراسة.....	١٧
٣. الدراسات السابقة.....	١٨
١.٣. تقنيات إزالة التلوث الميكروبي عن الذبائح في المسالخ.....	١٨
١.٣.٣. الإطار التنظيمي الأوروبي لإدارة وضمان سلامة اللحوم في المسالخ.....	١٩
٢.٣.٣. الإطار التنظيمي الأمريكي لإدارة سلامة اللحوم في المسالخ.....	٢٠
٣.٣.٣. المعالجات الفيزيائية للتطهير.....	٢١
٣.٣.٣. (أ) الغسيل بالماء البارد أو الفاتر.....	٢١
٣.٣.٣. (ب) الغسيل بالماء الساخن.....	٢٢
٣.٣.٣. (ج) البسترة البخار.....	٢٢
٣.٣.٣. (د) التنظيف بالشفط المقترن البخار.....	٢٣
٣.٣.٣. (هـ) التشعيع الغذائي Food Irradiation.....	٢٤
٤.٣.٣. تطبيقات المياه المنشطة كهربائياً Electrolyzed Water في تعزيز سلامة اللحوم.....	٢٤
٥.٣.٣. المعالجات الكيميائية لإزالة التلوث.....	٢٧
٥.٣.٣. (أ) تطبيق الأحماض العضوية.....	٢٧
٥.٣.٣. (ب) معالجات كيميائية أخرى.....	٢٨

- ٢٩ (١) بيروكسيد الهيدروجين (H₂O₂) Hydrogen Peroxide
- ٣٠ (٢) حمض الهيپوكلوروس (HOCl) Hypochlorous Acid
- ٣٢ (٣) بولي هيكساميثيلين جوانيدين (PHMG) Polyhexamethylene Guanidine
- ٣٥ ٦.٣.٣. المعالجات المركبة لإزالة التلوث.
- ٣٥ ٦.٣.٣. (أ) الجمع بين المعالجات الفيزيائية والكيميائية.
- ٣٦ ٦.٣.٣. (ب) المعالجات المتعددة المتتابعة أثناء الذبح.
- ٣٦ ٧.٣.٣. المعالجات البيولوجية لإزالة التلوث.
- ٣٧ ٨.٣.٣. تقنيات إزالة التلوث لذبائح الدواجن.
- ٣٨ ٩.٣.٣. التقييم العام لوسائل إزالة التلوث وتطبيقاتها.
- ٣٩ ٢.٣. تطبيقات تقنية ATP في مراقبة النظافة والتحقق من فعالية التطهير في المسالخ.
- ٤٠ ٣.٣. أهمية الدراسات السابقة في دعم الدراسة الحالية.
- ٤١ ٤.٣. خلاصة الدراسات السابقة.
- ٤٣ ٤. المنهجية وطرق البحث.
- ٤٣ ١.٤. تصميم الدراسة.
- ٤٣ ٢.٤. المرحلة الأولى: الدراسة الميدانية خلال موسم الحج.
- ٤٣ ١.٢.٤. موقع الدراسة.
- ٤٤ ٢.٢.٤. تقدير كمية الماء العالقة على سطح الذبيحة بعد الغسيل والرش.
- ٤٤ ٣.٢.٤. المطهرات المستخدمة.
- ٤٥ ٤.٢.٤. عينات الدراسة.
- ٤٥ ٥.٢.٤. إجراءات الدراسة الميدانية.
- ٤٥ ٣.٤. المرحلة الثانية: مسار التطبيق المباشر بالرش اليدوي.
- ٤٦ ١.٣.٤. تصميم التجربة.
- ٤٦ ٢.٣.٤. تحضير العينات.
- ٤٦ ٣.٣.٤. تطبيق المطهرات.
- ٤٧ ٤.٣.٤. تقييم كفاءة التطهير.
- ٤٧ ٤.٤. الكشف عن مستوى التلوث الميكروبي.

٤٨	٥.٤. القياس المرجعي وضبط جودة القياسات.....
٤٨	٥.٤.٦. التحليل الإحصائي.....
٤٩	٥.٥. نتائج الدراسة.....
٤٩	٥.٥.١. وصف عينة الدراسة.....
٤٩	٥.٥.١.١. عدد العينات.....
٤٩	٥.٥.١.٢. عينات خط الأساس لمقارنة النتائج.....
٥٠	٥.٥.٢. الخصائص التشغيلية لوحدات الغسيل والتطهير وكمية الماء على سطح الذبيحة.....
٥١	٥.٥.٣. التغير في قراءات ATP بعد التطبيق المباشر للمطهرات بالرش اليدوي.....
٥٣	٥.٥.٤. التغير في قراءات ATP بعد المعالجة عبر وحدة الغسيل والرش الآلي بالمطهر.....
٥٦	٥.٥.٥. مقارنة نسب الانخفاض في قراءات ATP بين مساري الرش اليدوي والغسيل والرش الآلي.....
٥٧	٥.٦. مناقشة النتائج.....
٥٨	٥.٦.١. مقارنة أنماط الانخفاض في مؤشرات ATP بين مجموعات المطهرات.....
٦٠	٥.٦.٢. التغير في قراءات ATP باختلاف الزمن بعد تطبيق المطهر.....
٦١	٥.٦.٣. تأثير طريقة التطبيق (الرش اليدوي والرش الآلي) في فعالية المطهرات.....
٦٣	٥.٦.٤. التحديات التشغيلية المؤثرة في كفاءة المطهرات داخل المجازر.....
٦٥	٥.٦.٥. دلالات استخدام تقنية ATP وحدودها في تقييم التغير في التلوث السطحي.....
٦٦	٥.٦.٦. دلالة الخصائص التشغيلية لوحدات الغسيل والتطهير في كفاءة تطبيق المطهرات.....
٦٧	٥.٦.٧. محددات الدراسة.....
٦٨	٥.٧. الخلاصة.....
٦٨	٥.٨. التوصيات.....
٦٩	٥.٩. الدراسات المستقبلية.....
٧٠	٥.١٠. المراجع.....
٧٠	٥.١٠.١. المراجع العربية.....
٨٣	٥.١١. الملحق.....

مقارنة فعالية بعض المطهرات الأمانة في خفض مؤشرات التلوث السطحي على لحوم الأضاحي

١. مقدمة

يعد تلوث ذبائح اللحوم أثناء عمليات الذبح والتجهيز ظاهرةً يصعب تجنبها، إذ يمكن أن تتعرض ذبائح الأبقار بسهولة للتلوث بأنواع مختلفة من البكتيريا الممرضة القادمة من البيئة المحيطة. وفي هذا السياق، وخلال عدد من إجراءات الذبح المختلفة، بما في ذلك تجهيز الذبيحة، واستخراج الأحشاء، والتصنيع، والتخزين، يمكن اعتبار مصادر التلوث الميكروبي متعددة، وتشمل الجلد، والأقدام، والمعدة، ومحتويات الأمعاء، وأيدي العاملين، وملابسهم، والمعدات، والمياه المستخدمة في غسل الذبائح، بالإضافة إلى الغبار والهواء (Phillips *et al.*, 2006؛ Sofos, 2008؛ Dickson and Acuff, 2017؛ Tesson *et al.*, 2020).

ويتأثر مدى تلوث ذبائح الأبقار بالبكتيريا بصورة رئيسة بالتباين بين منشآت التجهيز المختلفة، بما في ذلك تصميم المنشأة، وسرعة الذبح، ومهارات العاملين القائمين على التشغيل. ويعكس مستوى التلوث المتحقق مدى الالتزام بتطبيق معايير النظافة والإصحاح أثناء الذبح، في حين يعكس تركيب الفلورا الميكروبية مصادر التلوث المختلفة ومدى فعالية الإجراءات الصحية المطبقة (McEvoy *et al.*, 2000؛ Lenahan *et al.*, 2010).

وعلى الرغم من وجود العديد من المسالخ الحديثة المجهزة بالآلات والمعدات المتطورة العاملة ضمن مشروع المملكة العربية السعودية للإفادة من الهدي والأضاحي (مشروع أضاحي)، فإن ضيق الوقت الشرعي المخصص لذبح الهدي والأضاحي (٨٤ ساعة)، إلى جانب الارتفاع الكبير في أعداد المذبوحات الذي قد يتجاوز مليون ذبيحة، يزيد من احتمالية عدم التطبيق الكامل للاشتراطات الصحية ومعايير النظافة التشغيلية. وقد انعكس ذلك في رصد تلوث ظاهري على الذبائح حتى بعد استكمال عمليات الغسيل، إذ تراوحت نسب الذبائح التي أظهرت تلوثاً مرئياً بين نسبة ١,٦٪ ونسبة ١١,٧٪، وهو ما يشير إلى استمرار احتمالية التلوث أثناء مراحل التداول والتجهيز، وما قد يترتب عليه من ارتفاع مستويات التلوث الميكروبي للحوم (معهد خادم الحرمين الشريفين لأبحاث الحج والعمرة، ١٤٣٩هـ).

وفي حال وجود مستويات مرتفعة من التلوث أو ظروف تشغيلية غير ملائمة تسمح بتكاثر البكتيريا، فإن ذلك يؤدي عادةً إلى زيادة احتمالية وجود البكتيريا الممرضة وتكون السموم داخل المصفوفة الغذائية. واستجابةً لذلك، اتجهت الجهات التنظيمية والباحثون ومديرو سلامة الغذاء في صناعة اللحوم إلى تطوير مجموعة متنوعة من وسائل التدخل بهدف تحسين الجودة الميكروبية وتقليل المخاطر المرتبطة بسلامة الغذاء (Sofos, 2008؛ Tesson *et al.*, 2020؛ Dorsa *et al.*, 1997؛ Dubal *et al.*, 2004). وفي هذا الإطار،

طرح استخدام وسائل إزالة التلوث الكيميائية بوصفها أحد المعالجات الواعدة للحد من التلوث الميكروبي على أسطح الذبائح (Sofos *et al.*, 1999؛ Dubal *et al.*, 2004؛ Dorsa *et al.*, 1997).

ويجب ألا يترتب على محاليل إزالة التلوث المقبولة أي آثار ضارة على صحة العاملين أثناء التطبيق أو على صحة المستهلكين نتيجة استخدامها، كما ينبغي أن تكون مدعومة بأدلة علمية تثبت فعاليتها وسلامتها ضمن ظروف التشغيل الفعلية (Sofos *et al.*, 1999)، كما أن أنظمة إزالة التلوث المعتمدة على استخدام العوامل الكيميائية تحظى باعتماد خدمة سلامة وتفتيش الأغذية التابعة لوزارة الزراعة الأمريكية (USDA Food Safety and Inspection Service) باعتبارها جزءاً من خطة تحليل المخاطر ونقاط التحكم الحرجة (HACCP)، شريطة أن تكون المواد الكيميائية:

(١) مصنفة ضمن المواد المعترف بسلامتها عموماً (Generally Recognized as Safe – GRAS) من قبل هيئة الغذاء والدواء الأمريكية (FDA).

(٢) لا تؤدي إلى اعتبار المنتج الغذائي مغشوشاً (Adulterant).

(٣) لا تثير إشكالات تتعلق بوسم المنتج الغذائي أو إضافة مكونات جديدة.

(٤) مدعومة بدراسات علمية تثبت فعاليتها (USDA-FSIS, 2019).

وتعد أكثر وسائل إزالة التلوث الكيميائية استخداماً - مثل حمضي الأسيتيك (CH_3COOH) Acid واللاكتيك ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$) Lactic Acid - محاليل أحماض عضوية بتركيز يتراوح بين ١-٣٪، وقد أظهرت هذه المعالجات قدرة على خفض أعداد البكتيريا على أنسجة الذبائح وتحسين المؤشرات الميكروبية للحوم (Mani-López *et al.*, 2012؛ Manzoor *et al.*, 2020). وإلى جانب الأحماض العضوية، فقد اقترحت واختبرت عدة محاليل كيميائية أخرى - وحصل بعضها على الموافقة - لاستخدامها ضمن أنظمة إزالة التلوث، ومن بينها الكلور (Cl_2) Chlorine، وثاني أكسيد الكلور (ClO_2) Chlorine Dioxide، وفوسفات ثلاثي الصوديوم (Na_3PO_4) Trisodium Phosphate، وبيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2) Hydrogen Peroxide، والأكسجين (O_3) Ozone، وبيسلفات الصوديوم (NaHSO_4) Sodium Bisulfate، وكلوريد الصوديوم (NaCl) Sodium Chloride، والنيسين Nisin، وسوربات البوتاسيوم (Potassium Sorbate)، وبيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2) Hydrogen Peroxide، وبولي ($\text{C}_6\text{H}_7\text{KO}_2$) (Alonso-Hernando *et al.*, 2013؛ Latha *et al.*, 2009).

وقد أجريت الدراسة الحالية بهدف مقارنة فعالية ثلاثة من المطهرات الآمنة، هي حمض الهيبيكلوروس (HOCl) Hypochlorous Acid، وبيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2) Hydrogen Peroxide، وبولي

هيكساميثيلين جوانيدين (PHMG) Polyhexamethylene Guanidine، في إزالة التلوث الميكروبي عن ذبائح الهدي والأضاحي، وتقييم مدى كفاءتها وإمكانات تطبيقها في بيئة المسالخ عالية الكثافة التشغيلية.

٢. التعريف بالبحث

يتناول هذا القسم الإطار العام للدراسة من خلال عرض مشكلة الدراسة، وأهميتها، وأهدافها، وتسؤلاتها، وحدودها، بما يحدد نطاق الدراسة ويبين الأساس الذي استندت إليه في معالجة موضوع البحث.

١.٢. مشكلة الدراسة

على الرغم من تطبيق برامج النظافة والإصحاح في المسالخ الحديثة، فإن التلوث الميكروبي لأسطح الذبائح ما يزال يمثل تحدياً رئيساً، ولا سيما في مشروع أضاحي، الذي يتميز بكثافة تشغيلية مرتفعة وإنجاز أعداد كبيرة من الذبائح خلال فترة زمنية محدودة لا تتجاوز ٨٤ ساعة، مما يزيد من احتمالية انتقال التلوث ويستدعي تطبيق وسائل فعالة وأمنة للحد منه. وقد أشارت الدراسات السابقة إلى استمرار رصد تلوث ظاهري على بعض الذبائح بعد عمليات الغسل، بما يعكس الحاجة إلى تعزيز إجراءات إزالة التلوث الميكروبي.

ورغم تعدد المطهرات الآمنة المستخدمة في إزالة التلوث، فإن كفاءتها تختلف باختلاف خصائصها الكيميائية وظروف التطبيق ومتطلبات السلامة التنظيمية، كما أظهرت مراجعة الأدبيات محدودة الدراسات التي قارنت بصورة مباشرة بين مطهرات حمض الهيبيكلوروس (HOCl)، وبيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2)، وبولي هيكساميثيلين جوانيدين (PHMG) في تطهير لحوم الذبائح، خاصة في البيئات التشغيلية عالية الكثافة. ومن هنا، تتمثل مشكلة الدراسة في الحاجة إلى تقييم التغير في مؤشرات التلوث السطحي للذبائح بعد تطبيق المطهرات الثلاثة تحت ظروف التشغيل الفعلية في مسالخ مشروع أضاحي، ودراسة مدى اختلاف هذه المؤشرات باختلاف نوع المطهر ومسار التطبيق والخصائص التشغيلية المرتبطة بوحدات الغسيل والتطهير، مع مراعاة أن تقنية ATP المستخدمة في المرحلة الحالية تمثل مؤشراً سريعاً للمحتوى الحيوي السطحي ولا تعد قياساً مباشراً للحمل الميكروبي القابل للحياة

٢.٢. أهمية الدراسة

تستمد هذه الدراسة أهميتها من تناولها أحد التحديات المرتبطة بسلامة لحوم مشروع أضاحي، الذي يعد من أكبر مشاريع الذبح الموسمية في العالم، ويتميز بكثافة تشغيلية مرتفعة تتطلب تطبيق وسائل فعالة وأمنة للحد من التلوث الميكروبي، مع المحافظة على جودة اللحوم وسلامتها. وتتمثل الأهمية العلمية للدراسة في سد جانب من الفجوة البحثية المتعلقة بالمقارنة المباشرة بين فعالية مطهرات حمض الهيپوكلوروس (HOCl)، وبيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2)، وبولي هيكساميثيلين جوانيدين (PHMG) في خفض التلوث السطحي على لحوم الذبائح تحت ظروف تشغيلية تحاكي بيئة العمل الفعلية، بما يسهم في إثراء المعرفة العلمية في مجال تطهير اللحوم وسلامتها. كما تبرز أهميتها التطبيقية من خلال توفير بيانات ميدانية عن استجابة مؤشرات التلوث السطحي للمطهرات محل الدراسة في بيئة تشغيل فعلية، وربط هذه الاستجابة ببعض المتغيرات التشغيلية المصاحبة لعمليات الغسيل والتطهير، بما يدعم تطوير إجراءات التطبيق والتحقق التشغيلي، ويوفر أساساً لدراسات لاحقة تعتمد على القياسات الميكروبية المباشرة قبل اتخاذ قرارات نهائية بشأن اختيار المطهر أو تحديد ظروف استخدامه المثلى.

٣.٢. أهداف الدراسة

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم ومقارنة التغير في مؤشرات التلوث السطحي المقاسة بتقنية ATP على لحوم الهدي والأضاحي بعد تطبيق المطهرات محل الدراسة، ودراسة ارتباط هذا التغير بطريقة التطبيق وبعض الخصائص التشغيلية لوحدات الغسيل والتطهير في مسالخ مشروع أضاحي. ويتحقق ذلك من خلال الأهداف الفرعية الآتية:

- (١) قياس التغير في قراءات ATP على أسطح الذبائح قبل تطبيق المطهرات وبعدها عند أزمنة القياس المحددة.
- (٢) مقارنة نسب الانخفاض في قراءات ATP بين المجموعات المعالجة بالمطهرات الثلاثة ضمن ظروف المواقع محل الدراسة.
- (٣) مقارنة نتائج مسار الرش اليدوي المباشر بنتائج مسار الغسيل والرش الآلي، مع مراعاة الاختلافات التشغيلية المصاحبة لكل مسار.

- (٤) وصف بعض الخصائص التشغيلية لوحادات الغسيل والتطهير، بما في ذلك زمن مرور الذبيحة وكمية السائل العالق على سطحها، ودراسة دلالتها المحتملة عند تفسير نتائج المعالجة.
- (٥) توفير قاعدة بيانات ميدانية أولية يمكن الاستناد إليها في تصميم مرحلة تحقق لاحقة باستخدام مؤشرات ميكروبية مباشرة، وتطوير بروتوكولات تشغيلية أكثر ضبطاً لتطبيق المطهرات.

٤.٢. تساؤلات الدراسة

سعت الدراسة للإجابة عن التساؤل الرئيس المتمثل في تحديد نمط التغير في مؤشرات التلوث السطحي المقاسة بتقنية ATP بعد تطبيق المطهرات محل الدراسة تحت الظروف التشغيلية الفعلية في مسالخ مشروع أضاحي، وينبثق عن هذا التساؤل الرئيس التساؤلات الفرعية الآتية:

ما نمط التغير في مؤشرات التلوث السطحي المقاسة بتقنية ATP بعد تطبيق المطهرات محل الدراسة تحت الظروف التشغيلية الفعلية في مسالخ مشروع أضاحي؟

- (١) ما مقدار التغير في قراءات ATP بعد ٥ و ١٠ و ١٥ دقيقة من تطبيق المطهرات محل الدراسة؟
- (٢) هل تختلف نسب الانخفاض في قراءات ATP بين مجموعات المطهرات الثلاثة ضمن المواقع المشمولة بالدراسة؟
- (٣) كيف تختلف نتائج قراءات ATP بين مسار الرش اليدوي المباشر ومسار الغسيل والرش الآلي؟
- (٤) ما أبرز الاختلافات في الخصائص التشغيلية لوحادات الغسيل والتطهير التي ينبغي مراعاتها عند تفسير نتائج المطهرات؟

٥.٢. حدود الدراسة

اقتصرت هذه الدراسة على تقييم ومقارنة فعالية ثلاث مطهرات آمنة، هي المطهر HOCl ، والمطهر H_2O_2 ، والمطهر PHMG، في خفض التلوث السطحي على لحوم الهدي والأضاحي، وذلك في إطار الحدود الآتية:

- (١) الحدود الموضوعية: اقتصرت الدراسة على تقييم فعالية المطهرات الثلاثة في خفض الحمل الميكروبي على أسطح لحوم الهدي والأضاحي، ومقارنة كفاءتها ومدى ملاءمتها للتطبيق في المسالخ عالية الكثافة التشغيلية، دون التطرق إلى تقييم الجوانب الاقتصادية أو الأثر على الخواص الحسية أو مدة الصلاحية.

- (٢) الحدود المنهجية: اعتمدت المرحلة الحالية بصورة رئيسة على قياسات ATP بوصفها مؤشراً سريعاً للتلوث السطحي والمحتوى الحيوي الكلي، ولا تمثل هذه القياسات عدداً مباشراً للكائنات الدقيقة القابلة للحياة. كما ارتبط كل نوع من المطهرات بمجزرة أو مجازر محددة وفق الخطة التشغيلية، ولذلك لا يمكن فصل أثر نوع المطهر بصورة كاملة عن أثر الموقع وخصائص وحدة الغسيل والتطهير. كذلك كان عدد الذبائح في كل مجموعة تطبيقية محدوداً، ولم تتضمن الدراسة مجموعة مستقلة للغسيل بالماء فقط دون مطهر، ولم يتم قياس التركيز الفعلي للمادة الفعالة على سطح الذبيحة بعد الرش. وبناءً على ذلك، تقتصر قابلية تعميم النتائج على الظروف والمواقع محل الدراسة، وتعد النتائج ذات طبيعة تطبيقية استكشافية تتطلب التحقق الميكروبي المباشر قبل تعميمه.
- (٣) الحدود المكانية: أجريت الدراسة في مسالخ مشروع أضاحي بمكة المكرمة.
- (٤) الحدود الزمانية: نفذت الدراسة خلال موسم حج ١٤٤٧هـ.
- (٥) الحدود التطبيقية: اقتصرَت الدراسة على تقييم المطهرات في ظروف التشغيل الفعلية بالمسالخ، وفق آلية التطبيق المعتمدة في الدراسة، دون التوسع في تقييم تطبيقات أخرى خارج نطاق الدراسة.

٣. الدراسات السابقة

٣.١. تقنيات إزالة التلوث الميكروبي عن الذبائح في المسالخ

تمثل سلامة اللحوم أحد المحاور الرئيسية في منظومات سلامة الغذاء الحديثة، نظراً لارتباط منتجات اللحوم بمخاطر انتقال مسببات الأمراض المنقولة بالغذاء وتأثيرها المباشر على الصحة العامة. وفي هذا السياق، يتركز جانب مهم من الجهود العلمية والتنظيمية على الحد من انتقال التلوث الميكروبي خلال مراحل الذبح والتجهيز والتداول، بما يساهم في تعزيز جودة المنتجات وتحسين مستويات الحماية الصحية عبر السلسلة الغذائية (Sheridan, 1998; Codex Alimentarius Commission, 2022; EFSA and ECDC, 2024).

وقد اتجهت صناعة اللحوم والجهات التنظيمية إلى تبني نظام تحليل المخاطر ونقاط التحكم الحرجة (HACCP) بوصفه الإطار المنهجي الرئيس لإدارة المخاطر الميكروبية داخل المسالخ ومنشآت تجهيز اللحوم، حيث يعتمد هذا النظام على تحديد نقاط التحكم الحرجة وتطبيق إجراءات وقائية ورقابية تستهدف خفض احتمالية انتقال الملوثات والمحافظة على مستويات السلامة ضمن الحدود المقبولة. ومع ذلك، فإن فعالية هذا النظام ترتبط بقدرة المنشأة على التحكم في الظروف التشغيلية، ولا يعد تطبيقه ضماناً للإزالة

الكاملة لمسببات الأمراض من المنتج النهائي (USDA-FSIS, 1996؛ Codex Alimentarius Commission, 2022؛ Milios *et al.*, 2014).

وتكتسب إجراءات الحد من التلوث الميكروبي على أسطح الذبائح أهمية خاصة داخل المسالخ، إذ تؤثر بصورة مباشرة في الحد من فساد اللحوم وتقليل فرص انتقال الكائنات الممرضة خلال مراحل المعالجة. وعلى الرغم من أن الأنسجة العضلية للحيوانات السليمة تكون معقمة بطبيعتها قبل الذبح، فإن انتقال التلوث إلى الأسطح المكشوفة يظل احتمالاً قائماً نتيجة تعدد نقاط التلامس والتداخل بين العمليات التشغيلية والعامل البشري ومعدات المعالجة (Antic *et al.*, 2021؛ Gill, 2009؛ Kang *et al.*, 2001). وعلى المستوى التنظيمي، برز عالمياً نموذجان رئيسان لإدارة سلامة اللحوم داخل المسالخ، حيث يعتمد النموذج الأول وهو النموذج الأوروبي على تعزيز الوقاية والتحكم بالمخاطر عند المصدر من خلال تطبيق اشتراطات صارمة للنظافة التشغيلية، مع الحد من الاعتماد على تدخلات إزالة التلوث في المراحل النهائية من الذبح إلا ضمن ضوابط محددة. وفي المقابل، يسمح النموذج الثاني وهو النموذج الأمريكي باستخدام وسائل إزالة التلوث ضمن إطار تنظيمي منظم، باعتبارها أدوات داعمة لمنظومة التحكم بالمخاطر وليست بديلاً عن ممارسات النظافة ومتطلبات HACCP (European Commission, 2013؛ USDA-FSIS, 2024؛ Antic *et al.*, 2021).

وتنبع أهمية تناول تقنيات إزالة التلوث عن الذبائح من الحاجة إلى فهم دور هذه المعالجات وحدودها التشغيلية والتنظيمية، وتقييم مدى إسهامها في تحسين السلامة الميكروبية للحوم ضمن بيئات الذبح المختلفة، بما يدعم الجهات البيطرية وصناعة إنتاج اللحوم في اختيار الممارسات الأكثر ملاءمة لتحقيق أهداف سلامة الغذاء واستدامة الأداء التشغيلي (Bolton *et al.*, 2001؛ Milios *et al.*, 2014).

١.٣.٣ الإطار التنظيمي الأوروبي لإدارة وضمان سلامة اللحوم في المسالخ

يرتكز الإطار التنظيمي الأوروبي لإدارة سلامة اللحوم على مبدأ الوقاية والسيطرة على مصادر التلوث قبل الحاجة إلى تطبيق وسائل إزالة التلوث في المراحل النهائية من الذبح، حيث يستند هذا التوجه إلى فرض اشتراطات مرتفعة للنظافة التشغيلية وتطبيق برامج الممارسات الصحية الجيدة (GHP Good Hygiene Practices) ونظام HACCP ضمن منظومة متكاملة لإدارة المخاطر الميكروبية (Bolton *et al.*, 2001؛ Codex Alimentarius Commission, 2022).

وفي هذا السياق، ينظر إلى إزالة التلوث عن الذبائح على أنها إجراء تكميلي محدود الاستخدام، وليس بديلاً عن التحكم التشغيلي أو وسيلة لتعويض أوجه القصور في إجراءات النظافة، حيث ارتبط هذا التوجه

تاريخياً بمخاوف تتعلق بإمكانية استخدام المعالجات الكيميائية لإخفاء ضعف الممارسات التشغيلية أو احتمال ارتباط بعضها ببقايا قد تؤثر في سلامة الغذاء (Bolton *et al.*, 2001). ومع تطور الأدلة العلمية والتقييمات التنظيمية، شهد الإطار الأوروبي قدراً من المرونة المنظمة تجاه بعض وسائل إزالة التلوث، حيث سمح باستخدام تدخلات محددة بعد تقييم سلامتها وفعاليتها. ومن أبرز الأمثلة اعتماد استخدام حمض اللاكتيك (Lactic Acid) ($C_3H_6O_3$) لتقليل التلوث السطحي على ذبائح الأبقار ضمن شروط تشغيلية وضوابط رقابية محددة، بما يضمن عدم تعارض هذه الممارسة مع أهداف سلامة الغذاء وعدم استخدامها كبديل عن النظافة الوقائية (European EFSA BIOHAZ Panel, 2011؛ Commission, 2013).

ويعكس هذا النهج توجهاً تنظيمياً يقوم على أن سلامة اللحوم تتحقق أساساً من خلال السيطرة على مصادر التلوث أثناء الذبح والتجهيز، بينما تستخدم تدخلات إزالة التلوث - عند الحاجة - بوصفها طبقة إضافية ضمن نظام متكامل للتحكم بالمخاطر، وليس كحل مستقل لمعالجة الإخفاقات التشغيلية (Antic *et al.*, 2021؛ EFSA and ECDC, 2024).

٢.٣.٣. الإطار التنظيمي الأمريكي لإدارة سلامة اللحوم في المسالخ

يتبنى الإطار التنظيمي الأمريكي نهجاً قائماً على دمج وسائل إزالة التلوث التدخلية ضمن منظومة إدارة المخاطر الميكروبية داخل المسالخ، مع إخضاع هذه المعالجات لضوابط تنظيمية وفنية تضمن توافقها مع متطلبات سلامة الغذاء. وفي هذا السياق، يعد نظام تحليل المخاطر ونقاط التحكم الحرجة (HACCP) الأداة الرئيسة لضبط المخاطر وتقليل مستويات مسببات الأمراض في منتجات اللحوم والدواجن، من خلال تحديد مصادر الخطر والتحكم بها أثناء العمليات التشغيلية (USDA-FSIS, 1996؛ USDA-FSIS, 2024). وقد أدى التطور التنظيمي في الولايات المتحدة إلى توسيع استخدام وسائل إزالة التلوث على أسطح الذبائح بوصفها أدوات داعمة للحد من التلوث الميكروبي، خاصة بعد إدراج بعض مسببات الأمراض مثل *Escherichia coli* O157:H7 ضمن المخاطر التي يجب تقييمها والتحكم بها داخل خطط HACCP، وقد أسهم ذلك عملياً في تبني منشآت الذبح مجموعة من المعالجات التشغيلية الهادفة إلى خفض الحمل الميكروبي والوصول إلى مستويات سلامة مقبولة (Algino *et al.*, 2007؛ USDA-FSIS, 2024). ويتيح هذا النهج استخدام عدد من وسائل إزالة التلوث المعتمدة دون الحاجة إلى موافقات منفصلة لكل تطبيق، متى التزمت المنشآت بالشروط التشغيلية المحددة. وتشمل المعالجات المسموح بها أنظمة التنظيف بالبخار أو

بالبخار والماء، والغسيل قبل استخراج الأحشاء، وتطبيق الأحماض العضوية، والمياه المعالجة، والرش بالماء الساخن، إضافة إلى أنظمة البسترة البخار (USDA-FSIS, 2021؛ Dorsa, 1997)، كما يعكس النموذج الأمريكي فلسفة تنظيمية تقوم على أن إزالة التلوث لا تستخدم بديلاً عن ممارسات النظافة التشغيلية، وإنما توظف بوصفها طبقة إضافية ضمن نموذج الحواجز المتعددة Multiple Hurdles، بما يدعم خفض المخاطر الميكروبية ويعزز استقرار الأداء الصحي داخل بيئات الذبح مرتفعة الكثافة (Antic et al.; Gill, 2009). (al., 2021).

٣.٣.٣. المعالجات الفيزيائية للتطهير

٣.٣.٣. (أ) الغسيل بالماء البارد أو الفاتر

يعد الغسيل بالماء من أكثر وسائل إزالة التلوث استخداماً داخل المسالخ، ويطبق خلال مراحل مختلفة من الذبح والتجهيز بهدف إزالة الملوثات السطحية وتقليل انتقالها إلى المراحل اللاحقة. وتشمل التطبيقات الشائعة شطف الذبائح قبل استخراج الأحشاء أو بعد إزالة الجلد، إضافة إلى الغسيل النهائي قبل التبريد (Dickson, 1994؛ Gill, 2009)، كما تشير التطبيقات التشغيلية إلى أن استخدام الرش بالماء البارد أو الفاتر قد يحقق انخفاضاً محدوداً في أعداد البكتيريا الهوائية والقولونية Coliforms وبكتيريا *E. coli*، حيث تراوحت الانخفاضات المسجلة بين ٠,٥-١ مرتبة لوغاريتمية ($\log_{10}$ CFU) في بعض البيئات التجارية (Reagan et al., 1996؛ Gill and Landers, 2003).

ويستخدم الغسيل عادة بمياه صالحة للشرب بدرجات حرارة تتراوح بين ١٠-١٥°م للماء البارد و١٥-٤٠°م للماء الفاتر، ويستهدف بصورة رئيسة إزالة الملوثات الظاهرية مثل بقايا الدم وغبار العظام وتحسين الحالة السطحية للذبائح (Bolton et al., 2001)، إلا أن الأدلة العلمية لا تدعم اعتبار الغسيل بالماء البارد أو الفاتر وسيلة مستقلة لإزالة التلوث الميكروبي، إذ أظهرت نتائج متعددة أن الأثر الميكروبي يكون محدوداً أو غير ثابت، كما قد يؤدي الغسيل في بعض الحالات إلى إعادة توزيع الكائنات الدقيقة على سطح الذبيحة بدلاً من التخلص منها. وقد تبين أن اتجاه الرش وضغط التشغيل ودرجة حرارة الماء تمثل عوامل مؤثرة بصورة مباشرة في نتائج التطبيق (Gill, 2009؛ Milios et al., 2014). وبناءً على ذلك، ينظر إلى الغسيل بالماء البارد أو الفاتر بوصفه إجراءً لتحسين النظافة الظاهرية وإزالة الملوثات المرئية أكثر من كونه وسيلة فعالة لتحقيق إزالة ميكروبية مستقلة، الأمر الذي يستدعي دمج مع وسائل إضافية عند استهداف خفض فعلي للحمل الميكروبي (Antic et al., 2021؛ Bolton et al., 2001).

٣.٣.٣. (ب) الغسيل بالماء الساخن

يمثل الغسيل بالماء الساخن أحد أكثر المعالجات الفيزيائية استخداماً لخفض الحمل الميكروبي على أسطح الذبائح، ويطبق عادة باستخدام مياه بدرجات حرارة تتراوح بين ٧٥-٨٥°م ولمدد قصيرة تسمح بإحداث تأثير حراري مباشر على الكائنات الدقيقة (Dorsa, 1997؛ Kalchayanand *et al.*, 2009)، حيث أظهرت التطبيقات العملية أن هذه المعالجة تحقق خفضاً ملحوظاً في التلوث السطحي مقارنة بالغسيل التقليدي، مع تسجيل انخفاضات ميكروبية تراوحت في بعض التطبيقات حول ٠,٥ مرتبة لوغاريتمية أو أكثر ($\log_{10}$ CFU)، إضافة إلى تحسن الأداء عند دمج الحرارة مع ظروف رش مناسبة (Bolton *et al.*, 2001؛ Gill, 2009). كما أظهرت الأدلة أن الدمج بين المعالجة الحرارية وبعض المتغيرات التشغيلية مثل الضغط ونمط تدفق المياه قد يحسن كفاءة إزالة التلوث، بما يدعم مفهوم تعدد الحواجز داخل نظم التحكم الميكروبي (Dorsa, 1997؛ Antic *et al.*, 2021).

ومن الناحية التشغيلية، يمتاز الماء الساخن بانخفاض متطلبات البنية التحتية مقارنة بالبخار، إلا أن استخدامه يرتبط بقيود تشمل ارتفاع استهلاك المياه واحتمالية حدوث تغيرات لونية على الأسطح المقطوعة للذبائح نتيجة التعرض الحراري (Bolton *et al.*, 2001). كما برزت خلال السنوات الأخيرة تطبيقات تعتمد على المياه الساخنة المعاد تدويرها لتقليل الاستهلاك المائي، وقد أشارت التقييمات العلمية إلى إمكانية تحقيق فعالية مشابهة للمياه الصالحة للشرب عند تطبيق ضوابط تحقق صرامة تتعلق بإعادة التسخين والتجديد والتحكم في المخاطر الميكروبية المرتبطة بالأحياء المكونة للأبواغ (EFSA, 2010).

٣.٣.٣. (ج) البسترة بالبخار

تعد البسترة بالبخار من أبرز وسائل إزالة التلوث الفيزيائية المعتمدة على المعالجة الحرارية السريعة، وتقوم على إزالة الرطوبة السطحية أولاً ثم تعريض الذبيحة للبخار ضمن حجرة معالجة حرارية قبل إجراء مرحلة تبريد لاحقة بالماء البارد. ويهدف هذا التسلسل إلى خفض الأحمال الميكروبية السطحية من خلال إحداث تأثير حراري مباشر على مسببات الأمراض مع الحد من التأثيرات الحرارية غير المرغوبة على جودة المنتج (Bolton *et al.*, 2001؛ Dorsa, 1997).

وتطبق المعالجة عادة عند درجات حرارة داخل حجرة البخار تتراوح بين ٨٢-٩٤°م ولمدد قصيرة، يعقمها تبريد بالماء منخفض الحرارة، وقد أظهرت النتائج أن هذه التقنية قادرة على تحقيق خفض ميكروبي مماثل أو أعلى من بعض تقنيات الغسيل الحراري التقليدية، مع تسجيل انخفاضات ملحوظة في مؤشرات التلوث الميكروبي دون تأثيرات جوهرية على الخصائص الحسية للحوم عند ضبط ظروف التشغيل (Bolton *et al.*, 2001؛ Milios *et al.*, 2014). كما أظهرت التطبيقات على ذبائح الأغنام انخفاضاً في أعداد بكتيريا المعوية *Enterobacteriaceae* والعدد الكلي للأحياء الدقيقة Total Viable Count حيث بلغت الانخفاضات المسجلة نحو ١,٠ و ٠,٧٢ مرتبة لوغاريتمية ($\log_{10}$ CFU/cm²)، على التوالي، دون ظهور تغيرات حسية ذات دلالة كبيرة، وهو ما يعزز قابلية توظيف هذه التقنية ضمن استراتيجيات التحكم الميكروبي داخل المسالخ (Milios *et al.*, 2014). ورغم ذلك، فقد ترتبط البسترة بالبخار ببعض القيود التشغيلية، من أبرزها احتمالية حدوث تغيرات لونية على الأسطح المقطوعة وارتفاع متطلبات البنية التحتية والطاقة مقارنة ببعض المعالجات الأخرى، الأمر الذي يجعل كفاءتها مرتبطة بمدى توافرها مع طبيعة التشغيل داخل المنشأة (Bolton *et al.*, 2001؛ Gill, 2009).

٣.٣.٣ (د) التنظيف بالشفط المقترن بالبخار

يمثل التنظيف بالشفط المقترن بالبخار إحدى التقنيات الموضعية لإزالة التلوث، ويستخدم بصورة خاصة لإزالة الملوثات المرئية من المساحات المحدودة على سطح الذبيحة، حيث تعتمد هذه التقنية على الدمج بين الماء الساخن أو البخار وآلية الشفط لإزالة الملوثات وتقليل الحمل الميكروبي بصورة موضعية (Bolton *et al.*, 2001؛ Gill, 2009)، حيث تسهم الحرارة الناتجة عن البخار في إضعاف الكائنات الدقيقة أو القضاء عليها، بينما يعمل الشفط على إزالة المياه والملوثات الناتجة عن العملية، بما يقلل من احتمالية إعادة انتشارها على سطح الذبيحة. وقد أظهرت التطبيقات تحسناً في إزالة التلوث من المناطق المحدودة، خاصة عند معالجة الملوثات المرئية موضعياً (Gill, 2009). إلا أن فعالية هذه التقنية تظل مقيدة بعدة عوامل تشغيلية، منها محدودية قدرتها على القضاء الكامل على مسببات الأمراض المرتبطة بالتلوث البرازي، وصعوبة تحقيق تلامس متجانس على الأسطح غير المنتظمة، إضافة إلى الحاجة إلى زمن تعرض كافٍ لتحقيق الأثر المطلوب. كما قد تؤدي بعض ظروف التطبيق إلى إعادة توزيع الملوثات بدلاً من إزالتها بصورة كاملة (Bolton *et al.*, 2001).

وبناءً على ذلك، ينظر إلى التنظيف بالشفط المقترن بالبخار بوصفه أداة موضعية داعمة للنظافة التشغيلية أكثر من كونه وسيلة مستقلة لإزالة التلوث على مستوى الذبيحة كاملة (Gill, 2009؛ Antic *et al.*, 2021).

٣.٣.٣ (هـ) التشعيع الغذائي Food Irradiation

يمثل التشعيع الغذائي أحد المعالجات الفيزيائية المتقدمة المستخدمة لإزالة التلوث الميكروبي من الأغذية، حيث يعتمد بصورة رئيسة على أشعة غاما أو حزم الإلكترونات لإحداث ضرر مباشر في المادة الوراثية للكائنات الدقيقة، إضافة إلى التأثير غير المباشر الناتج عن الجذور الحرة المتولدة أثناء التعرض للإشعاع (Milios *et al.*, 2014). وقد أظهرت التطبيقات أن استخدام جرعات مناسبة من التشعيع يمكن أن يحقق انخفاضات كبيرة في أعداد مسببات الأمراض دون إحداث تأثيرات حسية ملحوظة على خصائص اللحوم، حيث سجلت في بعض التطبيقات انخفاضات تجاوزت أربع مراتب لوغاريتمية *E. coli* O157 عند استخدام حزم الإلكترونات على أسطح اللحوم (Milios *et al.*, 2014). ورغم الفعالية المرتفعة لهذه التقنية، فإن تطبيقها الصناعي ما يزال يواجه تحديات تتعلق بارتفاع متطلبات البنية التحتية، والجوانب الاقتصادية، ومستوى تقبل المستهلكين، إضافة إلى المتطلبات التنظيمية الخاصة باستخدام الإشعاع في المنتجات الغذائية (Gill, 2009؛ Codex Alimentarius Commission, 2022). وبصورة عامة، تعد تقنيات التشعيع من الوسائل ذات الإمكانيات المرتفعة لإزالة التلوث، إلا أن استخدامها يظل أكثر ملاءمة في التطبيقات المتخصصة أو ضمن نظم التحكم المتقدمة التي تسمح بتحقيق الجدوى الفنية والتنظيمية والاقتصادية.

٣.٣.٤ تطبيقات المياه المنشطة كهربائياً Electrolyzed Water في تعزيز سلامة اللحوم

تعد سلامة الغذاء، إلى جانب التزايد المستمر في الطلب على المنتجات الغذائية ذات الملصقات النظيفة Clean Label، من القضايا المحورية التي تحظى باهتمام متنام لدى المستهلكين والجهات التنظيمية وصناعة الأغذية على حد سواء. وفي هذا السياق، تمثل اللحوم النيئة واللحوم ذات الحد الأدنى من المعالجة بيئة ملائمة لوجود عدد من مسببات الأمراض الشائعة المنقولة بالغذاء، من أبرزها بكتيريا *Listeria monocytogenes* (Zhang *et al.*, 2020)، وبكتيريا *Salmonella Enteritidis* (Garrido-Maestu *et al.*, 2019)، وبكتيريا *E. coli* O157 (de Assis *et al.*, 2021)، وبكتيريا *Campylobacter* (Thomas *et al.*, 2019).

(2020)، وبكتيريا *Staphylococcus aureus* (Ribeiro *et al.*, 2018)، وهي جميعها تعد من العوامل الرئيسية المرتبطة بحدوث الأمراض المنقولة بالغذاء. كما يرتبط خطر الفساد الميكروبي في اللحوم الطازجة، والمنتجات منخفضة المعالجة، والمنتجات الجاهزة للاستهلاك، بعوامل تشغيلية متعددة تشمل تقلبات درجات الحرارة وامتداد سلاسل النقل والتوزيع. وللمحد من هذه المخاطر، طورت مجموعة من استراتيجيات المعالجة القائمة على المعالجات الفيزيائية والكيميائية وإضافة المركبات المضادة للميكروبات أو المواد الحافظة الاصطناعية، مثل بوتيليتد هيدروكسي أنيزول Butylated Hydroxyanisole (BHA)، وبوتيليتد هيدروكسي تولوين Butylated Hydroxytoluene (BHT)، وتيرت-بوتيل هيدروكينون Tert-Butylhydroquinone (TBHQ)، وبروبيل جالات Propyl Gallate (PG)، والفوسفات Phosphates (PO_4^{3-})، والنترات (NO_3)، والنترت (NO_2)، إلا أن استخدام هذه المركبات يواجه تحديات متزايدة تتعلق بقبول المستهلكين المهتمين بالجوانب الصحية وجودة المكونات الغذائية (Roobab *et al.*, 2021). وعلى الرغم من التقدم التقني، لا يزال إنتاج لحوم طازجة خالية تماماً من البكتيريا أمراً غير قابل للتحقق عملياً، لذلك تواصل صناعة اللحوم جهودها البحثية لتطوير استراتيجيات تقلل الحمل الميكروبي إلى أدنى مستوى ممكن. وفي هذا الإطار، تتضمن خطوط تجهيز اللحوم التقليدية عادةً مراحل التنظيف والتطهير بهدف تقليل أعداد مسببات الأمراض وتحسين السلامة الميكروبية للمنتجات (Smith *et al.*, 2015). ومن أكثر تقنيات إزالة التلوث التقليدية المعتدلة شيوعاً في التطبيقات التجارية المعالجة الفيزيائية، مثل الغسيل (Sá Júnior *et al.*, 2021) والتبخير (Dixon *et al.*, 2019)، إضافة إلى المعالجات الكيميائية التي تشمل الأحماض العضوية (Heir *et al.*, 2022)، والمركبات المعتمدة على الكلور (Kocharunchitt *et al.*, 2020)، وفوق أكسيد الهيدروجين Hydrogen Peroxide (H_2O_2) (Walsh *et al.*, 2018)، والمركبات المعتمدة على الفوسفات (Sallam *et al.*, 2020)، كما يعد هيبوكلوريت الصوديوم Sodium Hypochlorite ($NaClO$) من أكثر المطهرات استخداماً بفضل فعاليته وانخفاض تكلفته وسهولة توفره، كما يتمتع كل من ثاني أكسيد الكلور وحمض اللاكتيك بقدرات واسعة مضادة للبكتيريا (Burfoot *et al.*, 2015). وفي قطاع اللحوم، تستخدم المياه المكلورة Chlorinated Water عادةً بتركيز يتراوح بين (٠,٥-١ جزء بالمليون) لخفض الحمل الميكروبي والحد من التلوث المتبادل وتحسين سلامة الذبائح. إلا أن العديد من الدراسات أوضحت أن فعالية الكلور ترتبط بدرجة كبيرة بتركيزه وظروف التطبيق، في حين قد يؤدي استخدامه إلى تكون نواتج ثانوية مثل ثلاثي الهالوميثانات Trihalomethanes، والأحماض الهالوأسيتيكية Haloacetic Acids، والكلورامينات Chloramines، وهي مركبات ارتبط بعضها بمخاوف صحية وبيئية

محتملة، بما في ذلك القابلية المسرطنة (Gil *et al.*, 2016). كما تنطبق اعتبارات مماثلة على بعض المطهرات الكيميائية الأخرى التي قد تنتج عنها مركبات ثانوية غير مرغوبة. ومن التحديات الإضافية المرتبطة باستخدام المطهرات التقليدية الحاجة أحياناً إلى تنفيذ مرحلة شطف لاحقة باستخدام مياه صالحة للشرب لإزالة بقايا الأحماض أو المركبات الكيميائية، خاصة عند استخدام تراكيز مرتفعة، وهو ما يمثل عبئاً إضافياً في البيئات التي تعاني من محدودية الموارد المائية، إضافة إلى ذلك، بدأت بعض مسببات الأمراض - ومن بينها السالمونيلا - بإظهار مؤشرات متزايدة على انخفاض الحساسية تجاه بعض المطهرات التقليدية (Youn *et al.*, 2017; Cadena *et al.*, 2019). كما تعتمد كفاءة المطهرات الكيميائية على مجموعة من العوامل التشغيلية تشمل توافر الكلور الحر، والحمل العضوي، وكثافة الحمل الميكروبي، وجودة مياه الغسيل، إلى جانب خصائص السطح ومدة التلامس وظروف التشغيل الأخرى (Murray *et al.*, 2017). وفي ضوء هذه التحديات، أصبح استخدام بعض البدائل مثل حمض الأسيتيك (CH₃COOH) Acetic Acid، وحمض البيروأسيستيك (CH₃COOOH) Peracetic Acid، وحمض اللاكتيك (C₃H₆O₃) Lactic Acid أكثر شيوعاً في تطبيقات معالجة اللحوم وتحسين سلامتها الميكروبية (Nkosi *et al.*, 2021).

وفي السنوات الأخيرة، توسعت الأبحاث في مجال تقنيات إزالة التلوث غير الحرارية Non-Thermal Interventions بوصفها حلاً بديلاً أكثر توافقاً مع متطلبات الاستدامة ومفهوم الملصق النظيف. ومن بين هذه التقنيات برزت المياه الوظيفية Functionalized Water بوصفها خياراً منخفض التكلفة وأكثر توافقاً بيئياً مقارنة بالمطهرات التقليدية، كما أصبحت المياه الوظيفية المنشطة محوراً متنامياً للبحث العلمي، سواء تم إنتاجها باستخدام التنشيط الكهربائي (Du *et al.*, 2016; Iram *et al.*, 2021; Moghassem, 2021; Fathul Karamah and Wajdi, 2018; Kanaan, 2018; Hamidi *et al.*, 2021)، أو الأوزون (Hamidi *et al.*, 2021)، أو تقنية البلازما الباردة (Kalchayanand *et al.*, 2019; Liao *et al.*, 2018; Yong *et al.*, 2018; Inguglia, 2020; Zhao *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2022).

ولا تعتمد الفعالية المضادة للميكروبات للمياه المنشطة كهربائياً على تركيبها الكيميائي فقط، بل ترتبط أيضاً بخصائصها التأكسدية العالية الناتجة عن قدرتها على استقبال الإلكترونات. وقد أوضحت إحدى الدراسات أن الواجهة بين الأنود والمحللول تؤدي إلى تكوين أنوليتات Anolytes ذات خصائص مؤكسدة تحتوي على خليط من الجذور الحرة، مثل (Cl - O - OH - HO₂) والتي تظهر نشاطاً مرتفعاً مضاداً للميكروبات. كما يؤدي التنشيط الكهروكيميائي إلى خفض التوتر السطحي، ورفع التوصيلية الكهربائية،

وإحداث تغيرات في الخصائص الفيزيائية للماء (Aider *et al*/ 2012). وبناءً على ذلك، أصبح الماء - الذي يستخدم تقليدياً في عمليات الغسل واسعة النطاق - قابلاً للتعديل عبر التحليل الكهربائي أو التفعيل الكيميائي ليؤدي دوراً أكثر تقدماً في تعزيز سلامة اللحوم وخفض الأحمال الميكروبية ضمن سلاسل التصنيع الغذائي الحديثة.

٥.٣.٣. المعالجات الكيميائية لإزالة التلوث

٥.٣.٣. (أ) تطبيق الأحماض العضوية

تعد الأحماض العضوية من أكثر وسائل إزالة التلوث الكيميائي استخداماً على أسطح الذبائح، وتطبق غالباً من خلال أنظمة الرش داخل خطوط الذبح والتجهيز، حيث يعد حمض اللاكتيك وحمض الأسيتيك من أكثر المركبات استخداماً في هذا المجال نظراً لقدرتهما على خفض الحمل الميكروبي السطحي ودعم برامج التحكم الميكروبي داخل المسالخ (Bolton *et al.*, 2001؛ European Commission, 2013).

وتشير الأدلة إلى أن تطبيق حمض اللاكتيك عند تراكيز منخفضة وتحت ظروف تشغيل مضبوطة يمكن أن يحقق خفضاً ميكروبياً مقارباً لبعض وسائل إزالة التلوث الأخرى، كما أظهرت تطبيقات حمض الأسيتيك قدرة مماثلة في تقليل أعداد الكائنات الدقيقة على أسطح الذبائح، بما يدعم استخدام الأحماض العضوية بوصفها وسائل تدخل داعمة وليست بديلة عن إجراءات النظافة التشغيلية (Siragusa, 1995؛ Carpenter *et al.*, 2011؛ EFSA BIOHAZ Panel, 2011)، إلا أن فعالية الأحماض العضوية لا تعتمد فقط على التأثير القاتل المباشر، إذ تشير النتائج إلى أن جزءاً من أثرها يرتبط بإحداث ضرر مميت للخلايا الميكروبية وتقليل قدرتها على النمو لاحقاً. كما قد ترتبط بعض التطبيقات بقيود تشغيلية تشمل تغيرات محدودة في لون الذبائح أو الحاجة إلى التحكم في التعرض المهني للعاملين عند الاستخدام غير المنضبط، خاصة مع الأحماض الأعلى تطايراً (Bolton *et al.*, 2001).

كما أظهرت المقارنات بين الأحماض المختلفة أن فعالية إزالة التلوث والحماية المتبقية تختلف باختلاف نوع الحمض وظروف التطبيق، ففي بعض التطبيقات حقق حمض اللاكتيك خفضاً إضافياً مقارنة بالغسيل بالماء، بينما أظهر حمض الأسيتيك Acetic Acid (CH_3COOH) قدرة أفضل نسبياً على الحد من النمو الميكروبي اللاحق لبعض مسببات الأمراض، في حين لم تحقق بعض البدائل الحمضية نتائج مماثلة في إزالة التلوث أو الاستمرارية الوقائية (Carpenter *et al.*, 2011). وفي الإطار التنظيمي الحديث، أصبح استخدام بعض الأحماض العضوية - وعلى وجه الخصوص حمض اللاكتيك ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$) Lactic Acid - مقبولاً ضمن

تطبيقات محددة وعلى أنواع معينة من الذبائح وفق اشتراطات فنية ورقابية واضحة، مع التأكيد على أن هذه المعالجات يجب أن تعمل ضمن منظومة متكاملة لسلامة الغذاء وألا تستخدم لتعويض القصور في إجراءات النظافة أو التحكم التشغيلي (EFSA BIOHAZ Panel, 2011؛ European Commission, 2013).

٣.٣.٥ (ب) معالجات كيميائية أخرى

شهدت تقنيات إزالة التلوث الكيميائي تطوراً ملحوظاً خلال العقود الأخيرة بوصفها إحدى الوسائل الداعمة لتعزيز السلامة الميكروبية للحوم والحد من انتقال مسببات الأمراض في المسالخ ومنشآت تصنيع الأغذية، وقد أسهم هذا التطور في تقييم طيف واسع من المطهرات الكيميائية التي تختلف في تركيبها وآلية تأثيرها، مثل حمض كلوريت الصوديوم Acidified Sodium Chlorite (NaClO_2)، والمياه المحللة كهربائياً Electrolyzed Water (EW)، وبيروكسيد الهيدروجين Hydrogen Peroxide (H_2O_2)، والأوزون Ozone (O_3)، وحمض البيروكسي أسيتيك Peracetic Acid, PAA (CH_3COOOH)، وفوسفات ثلاثي الصوديوم Trisodium Phosphate (Na_3PO_4)، إضافة إلى عدد من المطهرات التجارية المستخدمة في برامج إزالة التلوث الميكروبي للحوم (Milios *et al.*, 2014).

وتشير الأدلة العلمية إلى أن كفاءة هذه المطهرات لا تعتمد على طبيعتها الكيميائية فحسب، بل تتأثر بمجموعة من العوامل التشغيلية، من أهمها تركيز المادة الفعالة، وزمن التلامس، ومستوى الحمل العضوي، وطبيعة سطح الذبيحة، وآلية التطبيق. كما تختلف هذه المطهرات في مدى تأثيرها في جودة اللحوم، وإمكانية تكوين متبقيات كيميائية، ومستوى قبولها من قبل الجهات التنظيمية، وهو ما يجعل اختيار المطهر المناسب قائماً على الموازنة بين الفعالية الميكروبية، وسلامة المنتج، وقابلية التطبيق في الظروف التشغيلية الفعلية، وليس على القدرة على خفض الحمل الميكروبي فقط (Milios *et al.*, 2014؛ Antic *et al.*, 2021؛ Codex Alimentarius Commission, 2022).

وقد أدى هذا التوجه إلى بروز عدد من المطهرات الحديثة التي تمتلك خصائص تشغيلية متقدمة مقارنة ببعض المعالجات التقليدية، ومن أبرزها بيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2) باعتباره أحد أهم العوامل المؤكسدة المستخدمة في إزالة التلوث الميكروبي، وحمض الهيبوكلوروس Hypochlorous Acid (HOCl) الناتج عن تقنيات التحليل الكهربائي للمياه، والذي يتميز بفعالية مرتفعة مع انخفاض المتبقيات الكيميائية، إضافة إلى بولي هيكساميثيلين جوانيديين Polyhexamethylene Guanidine (PHMG) ويعد من المطهرات الواعدة بفضل نشاطه واسع الطيف ضد البكتيريا والفطريات والأغشية الحيوية، وقد

حظيت هذه المطهرات باهتمام متزايد في الدراسات الحديثة نتيجة إمكاناتها التطبيقية في تحسين سلامة الأغذية وتقليل التلوث الميكروبي في بيئات تصنيع اللحوم، مع اختلاف واضح في آليات تأثيرها ومدى ملاءمتها للتطبيقات الصناعية (Oulé *et al.*, 2008؛ Roobab *et al.*, 2023؛ Veasey and Muriana, 2016). وانطلاقاً من ذلك، يركز هذا المحور على استعراض وتحليل الأدلة العلمية المتعلقة بهذه المطهرات الثلاثة، مع مناقشة خصائصها الكيميائية، وآلياتها المضادة للميكروبات، وأبرز تطبيقاتها في إزالة التلوث من اللحوم والأسطح الملامسة للأغذية، إضافة إلى تقييم مزاياها وحدودها العملية، بما يسهم في إبراز المبررات العلمية لاختيارها ضمن الدراسة الحالية.

(1) بيروكسيد الهيدروجين (H₂O₂) Hydrogen Peroxide

يعد بيروكسيد الهيدروجين H₂O₂ من أكثر المطهرات المؤكسدة استخداماً في تطبيقات سلامة الأغذية، ويتميز بتحلله إلى الماء والأكسجين دون تكوين متبقيات كيميائية ضارة، مما أكسبه قبولاً واسعاً في الصناعات الغذائية، حيث يعتمد نشاطه المضاد للميكروبات على إنتاج أنواع الأكسجين التفاعلية التي تؤدي إلى أكسدة الدهون والبروتينات والأحماض النووية داخل الخلايا الميكروبية، فتحدث تلفاً في الأغشية الخلوية وتعطل العمليات الحيوية، لينتهي الأمر بموت الخلية. إلا أن فعاليته تتراجع في البيئات الغنية بالمواد العضوية أو بوجود إنزيم الكاتالاز Catalase القادر على تسريع تحليل المركب، وهو ما يفسر اختلاف كفاءته بين التطبيقات المخبرية والظروف التشغيلية الفعلية (Stearns *et al.*, 2022).

وتشير الدراسات التطبيقية إلى أن كفاءة H₂O₂ في إزالة التلوث الميكروبي من اللحوم تعتمد بصورة رئيسة على طريقة التطبيق، وتركيز المطهر، وزمن التلامس، فقد أظهرت بعض الدراسات أن الرش المباشر على ذبائح الدواجن لم يحقق انخفاضاً معنوياً في الحمل الميكروبي عند مدد التعرض القصيرة، كما ارتبط بحدوث تغيرات مؤقتة في مظهر الجلد، في حين حقق الغمر في محاليل بتركيزات مناسبة ولفترات أطول انخفاضاً واضحاً في العدد البكتيري الكلي Total Viable Count والبكتيريا المعوية Enterobacteriaceae وبكتيريا *Staphylococcus aureus*، مما يشير إلى أن فعالية المركب ترتبط بتهيئة ظروف تشغيلية مناسبة أكثر من ارتباطها بزيادة التركيز وحده (Dickens and Whittemore, 1997؛ Helal *et al.*, 2014).

وامتدت تطبيقات H₂O₂ إلى تطهير الأسطح وبيئات تصنيع الأغذية، حيث بينت الأدلة بتميز ثبات أعلى وفعالية أطول مقارنة بالمركب التقليدي، مع كفاءة تفوقت في بعض التطبيقات على هيبوكلوريت الصوديوم Sodium Hypochlorite (NaClO)، وهو ما يعكس أهمية المحافظة على استقرار المادة الفعالة داخل

البيئات الغنية بالبروتينات والرطوبة (Hassan *et al.*, 2013). كما اتجهت التطبيقات الحديثة إلى دمج مع حمض البيروكسي أسيتيك Peracetic Acid (PAA) للاستفادة من التأثير التآزري بين المركبين، حيث أدى هذا النظام إلى تحسين كفاءة إزالة مسببات الأمراض وزيادة ثبات المطهر في البيئات ذات الحمل العضوي المرتفع مقارنة باستخدام H_2O_2 منفرداً (Stearns *et al.*, 2022). وتشير الدراسات أيضاً إلى أن متبقيات بيروكسيد الهيدروجين H_2O_2 تتحلل بسرعة بعد المعالجة لتصل إلى مستويات غير قابلة للكشف، مما يدعم اعتباره من مساعدات التصنيع Processing Aids التي لا تؤثر في سلامة المنتج النهائي عند استخدامه وفق الضوابط التنظيمية (Walsh *et al.*, 2018).

وتتوافق هذه النتائج مع التوجهات التنظيمية التي تسمح باستخدام H_2O_2 ضمن تراكيب الأحماض البيروكسية Peroxy Acids المخصصة لمعالجة اللحوم والدواجن مثل حمض البيروكسي أسيتيك Peracetic Acid- PAA (CH_3COOOH)، وحمض البيروكسي فورميك Performic Acid – PFA ($HCOOOH$)، حمض البيروكسي بروبيونيك Peroxypropionic Acid - PPA (CH_3CH_2COOOH)، مع تحديد حدود قصوى للتركيزات المسموح بها بما يضمن تحقيق الفعالية الميكروبية دون الإخلال بسلامة المستهلك أو جودة المنتج. كما تشير مجمل الأدلة إلى أن H_2O_2 يمثل مطهراً فعالاً يمكن أن يساهم في خفض التلوث السطحي في اللحوم وبيئات تصنيع الأغذية، إلا أن كفاءته ترتبط بدرجة كبيرة بظروف التطبيق، كما أن أفضل نتائجه تتحقق عند استخدامه ضمن أنظمة تطهير متكاملة، وليس بوصفه مطهراً منفرداً، وهو ما يبرز أهمية دمج مع الممارسات التشغيلية الجيدة وبرامج النظافة داخل المسالخ.

(٢) حمض الهيبوكلوروس Hypochlorous Acid (HOCl)

يعد حمض الهيبوكلوروس HOCl من أكثر المطهرات الكيميائية تطوراً في تطبيقات سلامة الأغذية، ويتميز بفعالية ميكروبية مرتفعة مع انخفاض السمية ومحدودية المتبقيات الكيميائية مقارنة بالمطهرات الكلورية التقليدية. وينتج غالباً من خلال التحليل الكهربائي لمحلول كلوريد الصوديوم Sodium Chloride ($NaCl$) لإنتاج الماء المحلل كهربائياً Electrolyzed Water (EW)، الذي تتوافر منه عدة صور تشغيلية تختلف في الرقم الهيدروجيني وتركيز الكلور الحر المتاح Free Available Chlorine، كما تعزى فعاليته المضادة للميكروبات إلى قدرة HOCl على اختراق الجدار الخلوي بسرعة وإحداث أكسدة للبروتينات والإنزيمات والأحماض النووية، مما يؤدي إلى تعطيل الوظائف الحيوية والقضاء على الخلايا الميكروبية (Roobab *et al.*, 2023).

وتتفق الدراسات على أن كفاءة HOCl تعتمد بدرجة كبيرة على التحكم في ظروف التطبيق، ولا سيما تركيز الكلور الحر، والرقم الهيدروجيني PH، وزمن التلامس، ومستوى الحمل العضوي، كما أظهرت الأدلة أن الماء المحلل كهربائياً EW المحتوي على HOCl يحقق خفضاً مرتفعاً في أعداد مسببات الأمراض الغذائية، بما في ذلك بكتيريا *Listeria monocytogenes* وبكتيريا *E. coli* O157:H7 وبكتيريا *Salmonella* spp لأن هذه الكفاءة تنخفض بصورة ملحوظة عند وجود كميات كبيرة من البروتينات والمواد العضوية، نتيجة استهلاك الكلور الحر في التفاعلات الكيميائية، مما يؤكد أهمية إزالة الملوثات العضوية قبل تطبيق المطهر لتحقيق أعلى مستويات الكفاءة (Roobab *et al.*, 2023؛ Veasey and Muriana, 2016).

ولا يقتصر تأثير HOCl على خفض أعداد الخلايا البكتيرية الحرة، بل يمتد إلى مكافحة الأغشية الحيوية Biofilms التي تمثل أحد أهم مصادر التلوث المستمر في المسالخ ومنشآت تصنيع الأغذية، فقد بينت إحدى الدراسات أن الماء الحمضي المحتوي على HOCl تمكن من إزالة الأغشية الحيوية المتكونة من بكتيريا *E. coli* O157:H7 وبكتيريا *Listeria monocytogenes* على أسطح الستانلس ستيل بكفاءة مرتفعة، مع تحسن واضح في فعالية التطهير بزيادة تركيز الكلور الحر وزمن التلامس، مما يعزز أهمية هذا المطهر في الحد من إعادة تلوث المعدات والأسطح الملامسة للحوم (Quan *et al.*, 2017). كما أوضحت دراسات أخرى أن استخدام الماء المحلل كهربائياً EW الحمضي الخفيف (SAEW) Slightly Acidic Electrolyzed Water أسهم في خفض الحمل الميكروبي وتحسين جودة اللحوم أثناء التخزين المبرد وإطالة مدة حفظها، مع المحافظة على الصفات الحسية وتقليل مؤشرات فساد اللحوم، وهو ما يعكس إمكاناته في دعم الجودة والسلامة الميكروبية للمنتجات الحيوانية (Sheng *et al.*, 2018؛ Kartikawati *et al.*, 2023).

كما تشير الأدلة الحديثة إلى أن فعالية HOCl يمكن تعزيزها عند استخدامه ضمن أنظمة تطهير متعددة، إذ أدى دمج مع حمض البيروكسي أسيتيك (PAA) Peracetic Acid إلى تحقيق خفض أكبر في أعداد مسببات الأمراض مقارنة باستخدام كل منهما منفرداً، وهو ما يعكس وجود تأثير تآزري بين المطهرات المؤكسدة يمكن الاستفادة منه في البيئات ذات الحمل الميكروبي المرتفع (Hamidi *et al.*, 2021)، كما تنسجم هذه النتائج مع التوجهات التنظيمية، حيث تسمح إدارة الغذاء والدواء الأمريكية (FDA) باستخدام HOCl المتولد كهربائياً في معالجة اللحوم والدواجن ومنتجاتها ضمن حدود محددة للكلور الحر، كما أدرجته وزارة الزراعة الأمريكية (USDA-FSIS) ضمن قائمة المواد الآمنة والملائمة للاستخدام في تصنيع الأغذية، في حين تؤكد تقارير FAO/WHO ضرورة الالتزام بظروف التشغيل المناسبة للحد من تكون نواتج التطهير

الثانوية والحفاظ على التوازن بين الكفاءة الميكروبية وسلامة المنتج الغذائي (FDA, 2021؛ USDA-FSIS, 2026؛ FAO/WHO, 2009).

وتشير مجمل الأدلة إلى أن HOCl يمثل أحد أكثر المطهرات ملائمةً لتطبيقات المسالخ وصناعات اللحوم، لما يجمعه من فعالية مرتفعة ضد مسببات الأمراض، وقدرة على الحد من تكون الأغشية الحيوية، وتحسين جودة المنتجات وإطالة مدة حفظها، مع قبول تنظيمي واسع، إلا أن الاستفادة المثلى منه تعتمد على الإدارة الدقيقة لظروف التطبيق، وبخاصة التحكم في الحمل العضوي وتركيز الكلور الحر وزمن التلامس، مما يدعم اختياره ضمن الدراسة الحالية لتقييم كفاءته في تقليل التلوث الميكروبي على لحوم الأضاحي ومقارنته بمطهرات آمنة أخرى.

(٣) بولي هيكساميثيلين جوانيدين (PHMG) Polyhexamethylene Guanidine

ازداد الاهتمام بمطهر بولي هيكساميثيلين جوانيدين (PHMG) خلال السنوات الأخيرة نتيجة امتلاكه نشاطاً واسع الطيف ضد البكتيريا والفطريات وبعض الفيروسات، إلى جانب خصائص تشغيلية تتمثل في الذوبانية العالية في الماء، وعدم التسبب في التآكل، وغياب اللون والرائحة، فضلاً عن انخفاض سميته النسبية عند استخدامه ضمن ظروف وتركيزات الاستخدام المناسبة، مما جعله من المركبات الواعدة في مجالات سلامة الأغذية والتطهير الصناعي (Oulé et al., 2008؛ Asiedu-Gyekye et al., 2014). كما يعتمد النشاط المضاد للميكروبات لهذا المركب على طبيعته الكاتيونية، إذ يرتبط بالمجموعات سالبة الشحنة الموجودة على أسطح الخلايا الميكروبية، مما يؤدي إلى اضطراب بنية الغشاء الخلوي وزيادة نفاذيته وتسرب المحتويات الخلوية، وقد يمتد التأثير إلى إحداث أضرار في مكونات الخلية والحمض النووي (DNA). أيضاً تدعم الأدلة المجهرية أن انهيار بنية الغشاء وتكوين المسام يمثلان من الآليات الرئيسة لتأثير PHMG المضاد للميكروبات، وهو ما يسهم في تفسير فعاليته ضد طيف واسع من الكائنات الدقيقة (Zhou et al., 2010). وقد ركزت مجموعة من الدراسات التطبيقية على استخدام PHMG في سلامة المنتجات الزراعية، ولا سيما الأغذية الجاهزة للأكل، فقد أظهرت إحدى الدراسات فعاليته في خفض *Escherichia coli* O157:H7 و *Listeria monocytogenes*، إلى جانب البكتيريا الهوائية والخمائر والفطريات الطبيعية الموجودة على الخس الجاهز للاستهلاك، حيث حددت الدراسة نطاق ١٥٠-٢٠٠ mg/L لمدة ٥ دقائق باعتباره من أكثر ظروف المعالجة فعالية ضمن التصميم التجريبي المستخدم، حيث بلغ الخفض في بعض الممرضات قرابة ٢ log CFU/g. كما أظهر PHMG خفضاً أعلى من حمض الأسيتيك وحمض الستريك وهيبوكلوريت الصوديوم

بالنسبة لعدد من المؤشرات الميكروبية، مع عدم وجود تفوق معنوي على الكلور في بعض مؤشرات الفلورا الطبيعية (Wang et al., 2020). كما تكتسب هذه النتائج أهمية خاصة من منظور الاستخدام الغذائي، إذ جرى تقييم PHMG مباشرة على منتج غذائي جاهز للأكل، مع الإشارة إلى اعتماده كمطهر ملامس للغذاء ضمن الإطار التنظيمي الصيني، ودون تسجيل تأثيرات سلبية ملحوظة في لون المنتج أو سلامة أنسجته تحت ظروف الاختبار. ويعزز ذلك الدليل على ملاءمته المحتملة للتطبيقات الغذائية المباشرة عند الالتزام بالتركيزات وشروط الاستخدام المعتمدة، مع ضرورة عدم تعميم هذا الاعتماد تلقائياً على جميع أنواع الأغذية أو الأطر التنظيمية الأخرى.

كما أظهر PHMG كفاءة في مكافحة الفطريات المسببة لفساد المنتجات الزراعية بعد الحصاد، إذ أظهرت دراسات سابقة نشاطاً ضد أجناس فطرية من بينها *Penicillium* وفطر *Botrytis* وفطر *Mucor* وفطر *Colletotrichum*، كذلك أظهر قدرة على الحد من إصابة ثمار الليمون بعفن *Penicillium digitatum*. وأشارت إحدى الدراسات إلى استمرار فعاليته حتى في وجود ١٪ من المادة العضوية، وهو ما يوفر مؤشراً أولياً إلى قدرته على الاحتفاظ بجزء من نشاطه في بعض البيئات المحتوية على حمل عضوي، إلا أن هذه النتيجة لا يمكن تعميمها مباشرة على بيئة اللحوم والمسالخ، التي تتميز بوجود الدم والبروتينات والدهون وحمل عضوي مختلف من حيث الطبيعة والكمية (Mathurin et al., 2012؛ Koffi-Nevry et al., 2011؛ Olmedo et al., 2018).

ومن الجوانب المهمة كذلك قدرة PHMG على الحد من تكوّن الأغشية الحيوية (Biofilms)، وليس فقط التأثير في الخلايا الميكروبية الحرة، إذ تشير الدراسات إلى تأثيره في سلامة الخلايا والمكونات البنيوية المرتبطة بتكوين الأغشية الحيوية، بما في ذلك الحمض النووي خارج الخلية، إضافة إلى إمكانية استمرار النشاط المضاد للميكروبات على بعض الأسطح المعالجة. وتكتسب هذه الخاصية أهمية تطبيقية محتملة في منشآت تصنيع الأغذية والمسالخ، حيث تمثل الأغشية الحيوية على المعدات والأسطح الملامسة للغذاء أحد مصادر استمرار التلوث وإعادة انتقاله، إلا أن إثبات هذا الأثر في بيئة المسالخ يتطلب تقييماً ميدانياً مباشراً تحت ظروف التشغيل الفعلية (Moshynets et al., 2022). كما اتجهت الدراسات إلى تطوير أنظمة تطهير تجمع بين PHMG ومركبات مؤكسدة. وقد أظهرت دراسة على الخس الجاهز للأكل أن الاستبدال الجزئي للمطهر بمطهر PHMG بمطهر بيروكسيمونوسلفات البوتاسيوم Potassium Peroxymonosulfate (PMS) حافظ على مستوى من الخفض الميكروبي مماثل تقريباً لاستخدام PHMG منفرداً ضد *E. coli* O157:H7 وبكتيريا *Salmonella typhimurium* وبكتيريا *Listeria monocytogenes* وبكتيريا *E. coli* غير O157.

تأثيرات سلبية ملحوظة في اللون أو القرمشة أو النكهة أو الرائحة أو سلامة سطح المنتج. كما أظهرت تركيبة ٥٠ mg/L من PHMG مع ٥٠ mg/L من PMS فعالية مقارنة لـ ١٥٠ mg/L من PHMG منفرداً ضمن ظروف التجربة. كما تبرز أهمية استخدام PMS أيضاً من الناحية الاقتصادية، إذ أشارت الدراسة إلى أن تكلفة المادة الخام للمطهر PMS كانت أقل بكثير من PHMG وقت إجراء الدراسة، ولذلك اختبر بوصفه بديلاً جزئياً يمكن أن يخفض كمية PHMG المستخدمة مع المحافظة على مستوى مماثل من الكفاءة الميكروبية. وتشير هذه النتائج إلى إمكانية تطوير تركيبات أكثر كفاءة من حيث استخدام المادة الفعالة والتكلفة، إلا أن هذا الاستنتاج يمثل مؤشراً اقتصادياً أولاً يعتمد أساساً على تكلفة المواد الخام، ولا يغني عن إجراء تقييم اقتصادي وتشغيلي متكامل يشمل الجرعات الفعلية، وأنظمة التحضير والتطبيق، والمياه والمعدات ومتطلبات التشغيل قبل اعتماد هذا النهج على نطاق صناعي.

ولا تثبت هذه الدراسة وجود تأثير تآزري (Synergistic Effect) بين المطهر PHMG والمطهر PMS بالمعنى التجريبي الصارم، إذ لم تستخدم تصميمياً إحصائياً مخصصاً لتحديد التفاعل بين المركبين، وإنما أظهرت أن الاستبدال الجزئي للمطهر PHMG بالمطهر PMS يمكن أن يحافظ على فعالية ميكروبية مقارنة للمطهر PHMG منفرداً، حيث افترض الباحثون أن تقارب آليات تأثير المركبين في الغشاء الخلوي قد يسهم في تفسير النتيجة، إلا أنهم اعتبروا ذلك فرضية تحتاج إلى تحقق إضافي بوسائل تجريبية مباشرة. ومن منظور السلامة والملاءمة الغذائية، تعزز الدراستان السابقتان أهمية PHMG لكونه قد اختبر مباشرة على منتجات غذائية جاهزة للأكل، مع الإشارة إلى اعتماده كمطهر ملامس للغذاء ضمن النظام التنظيمي الصيني، ودون ظهور تأثيرات سلبية ملحوظة في خصائص المنتج ضمن ظروف الاستخدام المدروسة. ويوفر ذلك دليلاً داعماً لملاءمته المحتملة للاستخدام الغذائي المباشر عند الالتزام بالتركيزات وشروط التطبيق المعتمدة. ومع ذلك، فإن هذه الدراسات لم تكن دراسات سمية طويلة الأمد ولم تتناول استخدام PHMG مباشرة على اللحوم، ولذلك فإن الانتقال إلى تطبيقه على المنتجات الحيوانية يظل مرتبطاً بالتحقق من سلامة الاستخدام والمتبقيات والتعرض الغذائي والمتطلبات التنظيمية المعتمدة لهذا الاستخدام. وفي ضوء الأدلة المتاحة، يمثل PHMG أحد المطهرات البولييمرية الواعدة في مجال سلامة الأغذية لما يجمعه من نشاط مضاد للميكروبات، وإمكان الحد من الأغشية الحيوية، والمحافظة على جودة المنتجات الغذائية في ظروف الاستخدام المدروسة، إضافة إلى وجود أدلة تطبيقية مباشرة على أغذية جاهزة للأكل تدعم فعاليته الميكروبية وملاءمته المحتملة للاستخدام الغذائي المباشر. ومع ذلك، فإن غالبية الدراسات

التطبيقية المنشورة تناولت الخضروات والفواكه والمنتجات النباتية، بينما ما تزال الأدلة المتعلقة باستخدامه المباشر في تطهير اللحوم داخل المسالخ محدودة.

٦.٣.٣. المعالجات المركبة لإزالة التلوث

٦.٣.٣. (أ) الجمع بين المعالجات الفيزيائية والكيميائية

تشير الأدلة العلمية إلى أن كفاءة إزالة التلوث من الذبائح تتحسن عند دمج وسائل التدخل الفيزيائية والكيميائية ضمن تسلسل تشغيلي متكامل، إذ يتيح هذا النهج الاستفادة من آليات متعددة لخفض الحمل الميكروبي بدل الاعتماد على تدخل منفرد. ويعد الجمع بين الأحماض العضوية والمعالجات الحرارية مثل الغسيل بالماء الساخن أو البسترة من أكثر النماذج دراسة في هذا المجال (Dickson and Anderson, 1992; Bolton *et al.*, 2001). كما أظهرت التطبيقات التجريبية أن تنفيذ مراحل متتابعة تشمل الغسيل الأولي لإزالة الملوثات السطحية، ثم المعالجة الحرارية، ثم تطبيق الأحماض العضوية، يؤدي إلى تحسين فعالية إزالة التلوث مقارنة باستخدام أي وسيلة بصورة مستقلة. ويفسر ذلك بأن إزالة الملوثات الظاهرية أولاً تحسن وصول العامل الكيميائي إلى سطح الذبيحة وتزيد من كفاءة تأثيره الميكروبي (Bolton *et al.*, 2001; Carpenter *et al.*, 2011).

كما بينت نتائج المقارنات أن تطبيق الغسيل متبوعاً بالأحماض العضوية حقق انخفاضات أكبر في أعداد بكتيريا *E. coli* O157 وبكتيريا *Salmonella* مقارنة بالغسيل أو التشذيب وحدهما، مما يدعم مفهوم تكامل الحواجز الميكروبية داخل خطوط الذبح (Carpenter *et al.*, 2011)، كما أظهرت تطبيقات أخرى أن الجمع بين الماء الساخن والبخار أو دمج أكثر من خطوة معالجة حرارية أدى إلى تحسين خفض العدد الكلي لبكتيريا *E. coli* بصورة تفوق المعالجات الأحادية، حيث يشير ذلك إلى أن كفاءة إزالة التلوث لا تعتمد على نوع التدخل فقط، بل على ترتيب تطبيقه وتوافقه مع خصائص الذبيحة والظروف التشغيلية (Gill, 2009; Antic *et al.*, 2021). كذلك أوضحت تطبيقات المعالجة المتتابعة باستخدام الغسيل والمحاليل الحمضية أن زيادة عدد مراحل التدخل ترتبط غالباً بتحقيق انخفاضات ميكروبية أكبر مقارنة بالأنظمة المبسطة، وهو ما يعزز مفهوم تعدد الحواجز Multiple Hurdles كأحد أكثر النماذج فاعلية للتحكم الميكروبي داخل منشآت تجهيز اللحوم (Bolton *et al.*, 2001; Antic *et al.*, 2021).

٦.٣.٣. (ب) المعالجات المتعددة المتتالية أثناء الذبح

يمثل تطبيق المعالجات المتعددة والمتتالية أحد الاتجاهات التشغيلية المتقدمة في إدارة المخاطر الميكروبية داخل المسالخ، ويقوم هذا النهج على توزيع إجراءات إزالة التلوث عبر مراحل الذبح المختلفة بهدف تحقيق خفض تراكمي ومستمر للحمل الميكروبي بدل التركيز على تدخل نهائي واحد (Bacon *et al.*, 2000؛ Antic *et al.*, 2021)، حيث تعتمد هذه المقاربة على دمج عدة خطوات تشمل إزالة الملوثات الموضعية، والغسيل المرحلي، والمعالجة الحرارية، والتطبيق المتكرر لبعض المعالجات الكيميائية ضمن نقاط تشغيلية مختلفة على خط الذبح، كما يهدف هذا التدرج إلى تقليل فرص انتقال التلوث بين المراحل ومنع تراكم الحمل الميكروبي على الذبيحة (Gill, 2009). كذلك أظهرت النتائج أن تطبيق المعالجات المتعددة يمكن أن يحقق انخفاضات تراكمية ملحوظة في مستويات التلوث على ذبائح الأبقار، مع تسجيل انخفاضات وصلت إلى عدة مراتب لوجاريمية بحسب نوع التدخل وترتيبه وظروف التشغيل، حيث تدعم هذه النتائج اعتماد استراتيجيات إزالة التلوث المتعددة بوصفها جزءاً من برامج التحكم الميكروبي داخل منشآت تجهيز اللحوم (Bacon *et al.*, 2000).

كما أظهرت التقييمات التطبيقية في المسالخ صغيرة الحجم أن اختلاف نوع التدخل لم يكن دائماً العامل الحاسم في تحقيق خفض الميكروبي، إذ تبين أن متغيرات مثل سرعة خفض درجة حرارة السطح، والرطوبة النسبية، وزمن الرش قد تؤثر بصورة مباشرة في كفاءة إزالة التلوث بغض النظر عن نوع التقنية المستخدمة (Algino *et al.*, 2007)، حيث تشير هذه المعطيات إلى أن تصميم برامج إزالة التلوث يجب أن يركز على ضبط الظروف التشغيلية وتكامل المعالجات أكثر من الاعتماد على مادة أو تقنية بعينها، بما يحقق أعلى مستوى ممكن من التحكم الميكروبي ضمن القيود التشغيلية الفعلية للمسالخ (Gill, 2009؛ Codex Alimentarius Commission, 2022).

٧.٣.٣. المعالجات البيولوجية لإزالة التلوث

تمثل المعالجات البيولوجية أحد الاتجاهات الحديثة في إزالة التلوث، وتركز بصورة رئيسة على استخدام بكتيريا Bacteriophages وبكتيريا Bacteriocins كوسائل تستهدف خفض مسببات الأمراض بطريقة أكثر انتقائية مقارنة بالمعالجات التقليدية (Endersen and Coffey, 2020؛ Moye *et al.*, 2018)، وقد شهد استخدام بكتيريا Bacteriophages توسعاً تدريجياً داخل التطبيقات الغذائية، خاصة في مكافحة بكتيريا *Listeria Monocytogenes*، ويعود ذلك إلى ارتفاع درجة خصوصيتها تجاه العائل المستهدف وانخفاض

احتمالية تأثيرها في الصفات الحسية للمنتج الغذائي (Endersen and Coffey, 2020). ورغم هذه المزايا، ما تزال التطبيقات الصناعية لهذه المعالجات تواجه تحديات تتعلق بتحقيق خفض ميكروبي ثابت، واحتمالية تطور المقاومة، إضافة إلى محدودية الأدلة التطبيقية المباشرة على الذبائح مقارنة بالدراسات المنفذة على منتجات اللحوم المصنعة (Moye et al., 2018؛ Vikram et al., 2020). كما تشمل الاتجاهات المستقبلية في إزالة التلوث عدداً من التقنيات الناشئة مثل المعالجة بالضغط العالي، والموجات فوق الصوتية، والمياه المحللة كهربائياً، والبلازما الباردة، والضوء عالي الشدة، وهي تقنيات تستهدف رفع كفاءة إزالة التلوث وتقليل الاعتماد على المعالجات التقليدية مستقبلاً (Milios et al., 2014).

٨.٣.٣. تقنيات إزالة التلوث لذبائح الدواجن

حظيت تقنيات إزالة التلوث المطبقة على ذبائح الدواجن باهتمام بحثي وتنظيمي واسع، ويرتبط ذلك بكون منتجات الدواجن من أكثر الأغذية ارتباطاً بمخاطر انتقال مسببات الأمراض المنقولة بالغذاء، وخاصة العوامل الممرضة المعوية مثل بكتيريا *Campylobacter spp* وبكتيريا *Salmonella spp*، الأمر الذي جعل التحكم الميكروبي خلال الذبح والتجهيز أحد المحاور الرئيسة في برامج سلامة الغذاء (Loretz et al., 2010؛ EFSA and ECDC, 2024)، حيث تشمل المعالجات الفيزيائية المستخدمة في إزالة التلوث المعالجات المعتمدة على الماء، والتشعيع، والموجات فوق الصوتية، والتبريد الهوائي أو التجميد، وقد أظهرت التطبيقات أن الماء الساخن والبخار والمياه المحللة كهربائياً قادرة على تحقيق خفض ملموس في الأحمال البكتيرية على أسطح الذبائح، كما سجلت الانخفاضات المسجلة ٩،٠-١،٢ مرتبة لوغاريتمية ($\log_{10}$ CFU) للماء الساخن، و٢،٣-٣،٨ مراتب لوغاريتمية ($\log_{10}$ CFU) للبخار، و١،١-٢،٣ مرتبة لوغاريتمية ($\log_{10}$ CFU) للمياه المحللة كهربائياً، مع ملاحظة أن بعض المعالجات الحرارية قد تؤثر في المظهر الخارجي للذبيحة عند عدم ضبط ظروف التشغيل (Loretz et al., 2010).

أما المعالجات الكيميائية فتتركز بصورة رئيسة على استخدام الأحماض العضوية والمعالجات المعتمدة على الكلور أو الفوسفات، حيث أظهرت التطبيقات أن حمض الأسيتيك (CH_3COOH) Acetic Acid، وحمض اللاكتيك ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$) Lactic Acid، وحمض كلوريت الصوديوم المحمض Acidified Sodium Chlorite (ASC)، وفوسفات ثلاثي الصوديوم Trisodium Phosphate (Na_3PO_4) حققت، بصورة عامة، انخفاضات في الحمل الميكروبي تراوحت بين ١،٠-٢،٢ مرتبة لوغاريتمية ($\log_{10}$ CFU)، مع اختلاف النتائج

باختلاف نوع الذبيحة، ودرجة التلوث الابتدائي، وظروف التطبيق (Loretz *et al.*, 2010؛ Stopforth *et al.*, 2007).

كما تشير الأدلة إلى أن بعض المعالجات المركبة تؤدي إلى تحسين إضافي في كفاءة خفض التلوث مقارنة بالمعالجات المفردة، إلا أن وجود المواد العضوية على سطح الذبيحة قد يقلل من كفاءة بعض المركبات الكيميائية نتيجة استهلاك المادة الفعالة أو تقليل وصولها إلى الخلايا الميكروبية المستهدفة (Loretz *et al.*, 2010). وفي المقابل، تظهر المعالجات البيولوجية - وعلى وجه الخصوص Bacteriophage - إمكانات مستقبلية واعدة بوصفها وسائل أكثر انتقائية وأقل اعتماداً على المركبات الكيميائية، إلا أن الأدلة التطبيقية الحالية ما تزال غير كافية لاعتمادها كبديل مستقل في البيئات الصناعية مرتفعة الكثافة (Endersen and Coffey, 2020؛ Vikram *et al.*, 2020). وبصورة عامة، تؤكد المعطيات أن إزالة التلوث في ذبائح الدواجن تحقق أفضل نتائجها عندما تطبق ضمن نظام متكامل لسلامة الغذاء يجمع بين إجراءات الوقاية، والضبط التشغيلي، وممارسات النظافة الجيدة، ولا تستخدم بوصفها بديلاً عن التحكم بالمخاطر خلال مراحل الذبح والتجهيز (Loretz *et al.*, 2010؛ Codex Alimentarius Commission, 2022).

٩.٣.٣. التقييم العام لوسائل إزالة التلوث وتطبيقاتها

توضح الأدلة العلمية أن إدارة سلامة اللحوم داخل المسالخ تتباين عالمياً بين نماذج تنظيمية تعتمد على الوقاية الصارمة والتحكم بالمخاطر عند المصدر، وأخرى تسمح باستخدام وسائل إزالة التلوث التدخلية ضمن أطر رقابية محددة، كما يعكس النهج الأوروبي توجهاً قائماً على تقليل الحاجة إلى المعالجات النهائية من خلال رفع كفاءة النظافة التشغيلية، في حين يتبنى النموذج الأمريكي مفهوم دمج وسائل إزالة التلوث ضمن برامج إدارة المخاطر دون اعتبارها بديلاً عن الضبط الصحي والتشغيلي (Bolton *et al.*, 2001؛ European Commission, 2013؛ USDA-FSIS, 2024).

كذلك تبين المراجعة أن وسائل إزالة التلوث - سواء الفيزيائية أو الكيميائية أو البيولوجية - تمتلك قدرة متفاوتة على خفض الحمل الميكروبي، إلا أن فعاليتها ترتبط بصورة مباشرة بخصائص الذبيحة، وتسلسل العمليات، ومستوى التلوث الابتدائي، ودقة التحكم في المتغيرات التشغيلية. كما أن تحقيق خفض الميكروبي لا يعني بالضرورة إزالة الخطر بصورة كاملة، مما يحد من إمكانية الاعتماد على المعالجات بوصفها إجراءً منفرداً (Gill, 2009؛ Antic *et al.*, 2021). وتشير النتائج أيضاً إلى أن المعالجات المركبة والمعالجات المتعددة المتتابعة تمثل من أكثر النماذج فاعلية في تحسين الأداء الميكروبي، نظراً لاعتمادها على مفهوم

تعدد الحواجز وتقليل احتمالية تجاوز الملوثات لنقاط التحكم المختلفة. ومع ذلك، فإن تطبيق هذه المعالجات يتطلب موازنة دقيقة بين الفعالية الميكروبية، وسلامة المتبقيات، والتكلفة التشغيلية، وقابلية التطبيق داخل بيئات الذبح الفعلية (Bolton *et al.*, 2001؛ Antic *et al.*, 2021). وفي ضوء ذلك، فإن تحقيق سلامة اللحوم لا يرتبط باختيار تقنية إزالة تلوث بعينها بقدر ارتباطه ببناء منظومة متكاملة تبدأ من الوقاية، مروراً بالتحكم التشغيلي، وانتهاءً باستخدام المعالجات عند الحاجة وفق أسس علمية وتنظيمية واضحة. كما ينبغي تفسير نتائج القياسات الميكروبية باعتبارها أدوات لدعم التحسين المستمر واتخاذ الإجراءات التصحيحية، وليس بوصفها مؤشرات منفردة للتحكم على كفاءة النظام الغذائي أو استبدال متطلبات النظافة الأساسية (Codex Alimentarius Commission, 2022)؛ (USDA-FSIS, 2024). وبناءً على مجمل الأدلة المتاحة، فإن وسائل إزالة التلوث تمثل أدوات مساندة يمكن أن تسهم في تعزيز السلامة الميكروبية للحوم عند استخدامها ضمن ضوابط محددة، إلا أن فعاليتها واستدامة أثرها تظل مرتبطة بقدرة المسالخ على الحفاظ على ممارسات النظافة الجيدة وتطبيق نظم إدارة سلامة الغذاء بصورة متكاملة ومستقرة.

٢.٣. تطبيقات تقنية ATP في مراقبة النظافة والتحقق من فعالية التطهير في المسالخ أصبحت تقنية قياس ATP (Adenosine Triphosphate) من التقنيات السريعة المستخدمة في مراقبة مستوى النظافة والتحقق من كفاءة إجراءات الغسيل والتطهير في منشآت تصنيع الأغذية والمسالخ، إذ تعتمد على قياس كمية ATP الموجودة على السطح والتعبير عنها بوحدة الضوء النسبية (Relative Light Units, RLU). وتمتاز بسرعة الحصول على النتائج مقارنة بالطرق الميكروبية التقليدية التي تتطلب الزرع والتحضير قبل تقدير الحمل الميكروبي، مما يتيح استخدامها في الرصد السريع للتغير في مستوى التلوث قبل إجراءات التنظيف أو التطهير وبعدها (Moazzami *et al.*, 2023). وقد طبقت تقنية ATP في قطاع اللحوم على الذبائح وبيئات المسالخ. ففي دراسة على ذبائح الدواجن، أظهرت التقنية إمكانية التقييم السريع للجودة الميكروبية للذبائح خلال أقل من ١٥ دقيقة، كما أظهرت نتائجها ارتباطاً مع العد الميكروبي التقليدي، مما دعم إمكانية استخدامها أداة سريعة لمراقبة نقاط التحكم في عمليات تجهيز اللحوم (Bautista *et al.*, 1995). وفي تطبيقات أحدث داخل مسالخ اللحوم الحمراء والدواجن، استخدمت قياسات ATP قبل عمليات التنظيف والتطهير وبعدها بالتوازي مع العد الكلي للبكتيريا الهوائية وبكتيريا *Enterobacteriales*. كما أظهرت النتائج قدرة التقنية على توفير تقييم سريع

لنظافة الأسطح، مع وجود اختلاف في أدائها مقارنة بالعد الميكروبي المرجعي، بما يؤكد أن فائدتها الأساسية تتمثل في المراقبة السريعة والتحقق التشغيلي من كفاءة إجراءات النظافة والتطهير (Moazzami *et al.*, 2023).

كما دعمت التطبيقات الحديثة إمكانية استخدام المسحات القائمة على ATP مباشرة على أسطح اللحوم والدواجن للكشف السريع عن التلوث، حيث طورت طريقة مسحية للكشف عن ATP في اللحوم والدجاج والحليب، وأظهرت قدرتها على التمييز بين العينات الملوثة وغير الملوثة، بما يعزز إمكانية توظيف التقنية في تطبيقات الرقابة السريعة على سلامة اللحوم (Mendes *et al.*, 2025).

ومع ذلك، ينبغي تفسير قراءات ATP على أسطح اللحوم في ضوء طبيعة التقنية، إذ لا تمثل قيمة RLU قياساً مباشراً لعدد الأحياء الدقيقة القابلة للحياة. فقد تحتوي أسطح اللحوم والذبائح على ATP من مصادر ميكروبية وغير ميكروبية، بما في ذلك بقايا الأنسجة والدم والمواد العضوية، ومن ثم قد لا يقابل التغير في RLU تغيراً مماثلاً في CFU. ويتفق ذلك مع ما خلصت إليه المراجعات المنهجية من أن العلاقة بين قياسات ATP والمؤشرات الميكروبية ليست ثابتة في جميع البيئات الغذائية، وأن التقنية لا ينبغي أن تحل بصورة منفردة محل الاختبارات الميكروبية المرجعية. كما أظهرت دراسة المسالخ الحديثة انخفاض خصوصية ATP مقارنة بالعد الكلي للبكتيريا الهوائية، مما يدعم الاستخدام التكميلي للطريقتين عند تقييم فعالية التنظيف والتطهير (Moazzami *et al.*, 2023).

وبناءً على ذلك، تشير الأدبيات إلى أن تقنية ATP تمثل أداة مناسبة للتحقق السريع من مستوى النظافة ورصد اتجاه التغير في التلوث السطحي قبل عمليات الغسيل أو التطهير وبعدها، ولا سيما في البيئات التشغيلية التي تتطلب نتائج فورية. إلا أن استخدامها لتقدير الخفض الميكروبي يستلزم تفسير النتائج بالتكامل مع طرق العد الميكروبي التقليدية APC المعبر عنها بوحدة CFU/cm²، بما يوفر تقييماً أكثر شمولاً وموثوقية لكفاءة إجراءات التطهير.

٣.٣. أهمية الدراسات السابقة في دعم الدراسة الحالية

أسهمت الدراسات السابقة في بناء الأساس العلمي والمنهجي للدراسة الحالية، إذ أوضحت أن التلوث الميكروبي لأسطح الذبائح قد يحدث خلال مراحل الذبح والتجهيز نتيجة انتقال الملوثات من الجلد ومحتويات الجهاز الهضمي والعاملين والمعدات والأسطح المحيطة، وأن ممارسات النظافة الجيدة ونظم سلامة الغذاء تمثل الأساس في الوقاية من التلوث، في حين تعد تقنيات إزالة التلوث تدخلات مكملية لخفض

الحمل الميكروبي المتبقي على أسطح الذبائح. كما بينت الأدبيات أن فعالية هذه التدخلات تختلف باختلاف نوع المطهر وتركيزه وزمن التلامس وطريقة التطبيق وطبيعة السطح والظروف التشغيلية، بما يؤكد أهمية تقييم المطهرات في ظروف الاستخدام الفعلية وعدم الاكتفاء بفعاليتها المثبتة تحت الظروف المختبرية. ودعمت الدراسات المتعلقة بالمعالجات الكيميائية اختيار المطهرات محل الدراسة الحالية، إذ أظهرت الأدلة امتلاك حمض الهيپوكلوروس (HOCl)، وبيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2)، وبولي هيكساميثيلين جوانيديين (PHMG) خصائص مضادة للميكروبات، مع اختلاف طبيعة الأدلة المتاحة ومحددات الاستخدام لكل منها. وأظهرت الدراسات أن فعالية HOCl تتأثر بتركيز الكلور الحر المتاح ودرجة الحموضة وزمن التلامس والحمل العضوي، في حين تتباين فعالية H_2O_2 تبعاً للتركيز وزمن المعالجة وظروف التطبيق، كما أشارت بعض التطبيقات إلى الاستفادة من الأنظمة المؤكسدة المركبة، مثل التركيبات القائمة على حمض البيروكسيتيك وبيروكسيد الهيدروجين (PAA/H_2O_2)، لتعزيز التأثير المضاد للميكروبات في بعض الظروف. أما PHMG، فقد أظهرت الدراسات نشاطه المضاد للبكتيريا والفطريات والأغشية الحيوية، مع محدودية الدراسات التي تناولت تطبيقه المباشر على اللحوم والذبائح مقارنة بتطبيقاته الأخرى. كما أسهمت الدراسات السابقة في دعم المنهجية المستخدمة لتقييم كفاءة التطهير، حيث بينت إمكانية استخدام تقنية الأدينوسين ثلاثي الفوسفات (ATP) أداة سريعة لرصد مستوى النظافة والتغير في التلوث السطحي قبل عمليات الغسيل والتطهير وبعدها. وفي الوقت نفسه، أظهرت الأدبيات أن قراءات RLU قد تعكس ATP من مصادر ميكروبية وغير ميكروبية، ولا تمثل بالضرورة قياساً مباشراً لأعداد الأحياء الدقيقة القابلة للحياة، مما يدعم استخدامها بالتكامل مع طرق العد الميكروبي التقليدية المعبر عنها بوحدة CFU/cm² عند التحقق من فعالية المعالجة.

وبذلك أسهمت الدراسات السابقة في تحديد الأساس العلمي لاختيار المطهرات، والتعرف على محددات فعاليتها، ودعم اختيار أدوات القياس، وتحديد الفجوة البحثية المتمثلة في محدودية الدراسات التي قارنت بصورة مباشرة بين المطهرات الثلاثة على أسطح الذبائح، ولا سيما تحت ظروف المسالخ عالية الكثافة التشغيلية، وهو ما وفر الأساس لإجراء الدراسة الحالية في البيئة التشغيلية لمشروع أضاحي.

٤.٣. خلاصة الدراسات السابقة

يتضح من مجمل الدراسات السابقة أن السيطرة على التلوث الميكروبي لأسطح الذبائح تتطلب منظومة متكاملة تبدأ بالالتزام بممارسات النظافة وسلامة الغذاء خلال مراحل الذبح والتجهيز، وتدعمها تدخلات

إزالة التلوث عند الحاجة. وقد أظهرت الأدبيات تنوع الوسائل الفيزيائية والكيميائية المستخدمة لهذا الغرض وتفاوت مستويات خفض الميكروبي التي تحققها، بما يؤكد أن كفاءة المعالجة لا ترتبط بالمادة المطهرة وحدها، وإنما تتأثر كذلك بالتركيز وزمن التلامس وطريقة التطبيق والحمل العضوي والظروف التشغيلية.

وفيما يتعلق بالمطهرات محل الدراسة، تشير الأدلة إلى امتلاك المطهر HOCl والمطهر H_2O_2 والمطهر PHMG نشاطاً مضاداً للميكروبات، مع اختلاف نطاق الأدلة ومحددات الاستخدام، كما وتبرز بالنسبة إلى HOCl أهمية ضبط تركيز الكلور الحر ودرجة الحموضة وزمن التلامس، إضافة إلى تأثير الحمل العضوي في فعاليته، أما H_2O_2 فتتباين كفاءته تبعاً للتركيز وظروف المعالجة، وتشير بعض الدراسات إلى إمكانية تعزيز التأثير المضاد للميكروبات من خلال الأنظمة المؤكسدة المركبة مثل $\text{PAA}/\text{H}_2\text{O}_2$ في بعض التطبيقات. وفي المقابل، أظهرت الدراسات المتعلقة بالمطهر PHMG خصائص واعدة مضادة للميكروبات، إلا أن الأدلة الخاصة باستخدامه المباشر على أسطح اللحوم والذبائح ما تزال محدودة نسبياً.

كما أظهرت الدراسات أن تقنية ATP توفر وسيلة سريعة للتحقق من مستوى النظافة ورصد التغير في التلوث السطحي قبل عمليات الغسيل أو التطهير وبعدها، إلا أن قراءاتها لا تمثل قياساً مباشراً للحمل الميكروبي القابل للحياة، نظراً لإمكان تأثرها بالمصادر غير الميكروبية عند تقدير تركيز ATP الموجودة على أسطح اللحوم. ومن ثم، فإن تكاملها مع طرق العد الميكروبي التقليدية يوفر أساساً أكثر شمولاً للتحقق من كفاءة المعالجة.

وبوجه عام، تكشف مراجعة الأدبيات عن محدودية الدراسات التي قارنت بصورة مباشرة بين المطهر HOCl والمطهر H_2O_2 والمطهر PHMG في خفض التلوث على أسطح الذبائح تحت ظروف التشغيل الفعلية، ولا سيما في المسالخ عالية الكثافة، إلى جانب محدودية الدراسات التي جمعت بين القياس السريع باستخدام ATP والعد الميكروبي للتحقق من فعالية هذه المطهرات. ومن هنا تبرز الحاجة إلى الدراسة الحالية لإجراء تقييم مقارن للمطهرات الثلاثة على لحوم الهدي والأضاحي في بيئة مشروع أضاحي، والتحقق من كفاءتها ومدى ملاءمتها للظروف التشغيلية الفعلية.

٤. المنهجية وطرق البحث

٤.١. تصميم الدراسة

اعتمدت الدراسة تصميماً تجريبياً مقارناً تضمن مسارين للتطبيق، حيث تمثل المسار الأول في تقييم التغير في قراءات ATP بعد مرور الذبائح عبر وحدات الغسيل والرش الآلي المستخدمة فعلياً في المجازر محل الدراسة، بينما تمثل المسار الثاني في تطبيق المطهرات بالرش اليدوي المباشر في ظروف أكثر ضبطاً بهدف تقليل بعض التباينات المرتبطة بأنظمة التطبيق الآلي. وبلغ عدد الذبائح المستخدمة ٣٠ ذبيحة في كل مسار، بواقع ٦ ذبائح لكل مجموعة تطبيقية، ليبلغ إجمالي الذبائح ٦٠ ذبيحة. وسجلت لكل ذبيحة قراءة مرجعية قبل المعالجة وقراءات لاحقة بعد ٥ دقائق، وبعد ١٠ دقائق ثم بعد ١٥ دقيقة من تطبيق المطهر. كما لا تتضمن النتائج المعروضة في الدراسة الحالية تحقيقاً ميكروبياً مباشراً باستخدام العد الهوائي للمستعمرات APC (Aerobic Plate Count)، وقد خصص هذا الجانب لمرحلة لاحقة للتحقق من مدى توافق نتائج ATP مع مؤشرات الحمل الميكروبي القابل للحياة

٤.٢. المرحلة الأولى: الدراسة الميدانية خلال موسم الحج

نفذت المرحلة الأولى من الدراسة في بيئة التشغيل الفعلية بمسالخ مشروع أضاحي خلال موسم حج ١٤٤٧هـ، بهدف تقييم فعالية المطهرات المستخدمة في خفض مستوى التلوث على أسطح الذبائح تحت ظروف التشغيل الواقعية، كما شملت هذه المرحلة تطبيق المطهرات في عدد من المجازر، واختيار عينات من الذبائح، وإجراء قياسات قبل المعالجة وبعدها في فترات زمنية محددة، بما يتيح مقارنة التغير في مستوى التلوث وتقييم كفاءة المطهرات في الظروف الميدانية.

٤.٢.١. موقع الدراسة

أجريت الدراسة الميدانية في عدد من مجازر مشروع أضاحي خلال موسم حج ١٤٤٧هـ، وشملت مجازر المعيصيم (١)، والمعيصيم (٢)، والمعيصيم (٣)، إضافة إلى المجزرة الحمراء الوحدة (و)، والمجزرة الزرقاء الوحدة (هـ). واختيرت هذه المواقع وفق الخطة التشغيلية لتطبيق المطهرات، بما أتاح تقييم فعاليتها في بيئة العمل الفعلية وتحت ظروف التشغيل السائدة أثناء الموسم.

٢.٢.٤. تقدير كمية الماء العالقة على سطح الذبيحة بعد الغسيل والرش

قدّرت كمية الماء العالقة على سطح الذبيحة بعد عمليتي الغسيل والرش باستخدام طريقة الفرق في الوزن (Gravimetric Method). ولتحقيق ذلك، كُفّنت كل ذبيحة قبل دخول نفق الغسيل بثلاث قطع من الشاش الجاف ذات وزن معلوم، ثم أزيلت مباشرة بعد خروجها من وحدة الغسيل، ووضعت داخل كيس نايلون معلوم الوزن، وأغلق بإحكام لمنع فقد الرطوبة، ثم وزن باستخدام ميزان إلكتروني دقيق. وحسبت كمية الماء العالقة على سطح الذبيحة من خلال الفرق بين الوزن النهائي والوزن الابتدائي للشاش والكيس، باعتبار أن الزيادة في الوزن تمثل كمية الماء الممتصة بواسطة الشاش أثناء ملاسته لسطح الذبيحة. وفي المجازر التي تنفذ فيها عمليتا الغسيل والتطهير داخل نفق واحد (معيصيم (٢)، ومعيصيم (٣)، ومجزرتا وحدة (و) ووحدة (هـ))، أما في مجزرة المعيصيم (١)، حيث تتم عمليتا الغسيل والتطهير في نفقين منفصلين، فقد أجري القياس على مرحلتين، الأولى بعد خروج الذبيحة من نفق الغسيل لتقدير كمية الماء العالقة على سطحها، والثانية بعد خروجها من نفق التطهير باستخدام قطع شاش جافة جديدة وبالطريقة نفسها، لتقدير كمية الماء أو محلول التطهير العالق على سطح الذبيحة بعد عملية الرش.

٣.٢.٤. المطهرات المستخدمة

شملت الدراسة ثلاث مطهرات هي حمض الهيبوكلوروس HOCl، وبيروكسيد الهيدروجين H₂O₂، وبولي هيكساميثيلين جوانيديين PHMG، ووزعت المطهرات على المجازر وفق الخطة التشغيلية، حيث طبق H₂O₂ في مجزرة المعيصيم (١)، والمطهر PHMG في مجزرة المعيصيم (٢) ومجزرة المعيصيم (٣)، بينما طبق المطهر HOCl في المجزرة الحمراء الوحدة (و)، والمجزرة الزرقاء الوحدة (هـ). كما اعتمدت الدراسة التراكيز التشغيلية النهائية بعد التخفيف وفق آلية التحضير المعتمدة، وهي نسبة ٠,١٪ (١٠٠٠ ppm) للمطهر PHMG، ونسبة ٠,٥٪ (٥٠٠ ppm) للمطهر HOCl، ونسبة ٠,٥٪ (٥٠٠ ppm) للمطهر H₂O₂، وتمثل هذه القيم تركيز المحلول النهائي بعد التخفيف وقبل التطبيق. ولم تتضمن الدراسة قياساً مباشراً لتركيز المادة الفعالة على سطح الذبيحة بعد الرش، ومن ثم فإنها تعبر عن التركيز التشغيلي للمحلول المحضر وليس الجرعة الفعلية المتبقية على سطح الذبيحة.

٤.٢.٤. عينات الدراسة

تكونت عينات المرحلة الميدانية من ٣٠ ذبيحة من الأغنام، بواقع ست ذبائح من كل مجزرة من المجازر الخمسة المشمولة بالدراسة. واعتمدت منطقة الكتف موقعاً ثابتاً لإجراء القياسات على جميع الذبائح، حيث حددت مساحة قياس ثابتة قدرها ٢٥ سم^٢، واستخدمت بصورة موحدة في القياس المرجعي والقياسات اللاحقة، بما يحد من التباين المرتبط باختلاف موقع أو مساحة أخذ العينة ويعزز قابلية المقارنة بين القراءات، وقد توزعت العينات على النحو التالي:

- (١) عدد ٦ ذبائح من مجزرة المعيصيم (١) عولجت بمطهر H₂O₂.
- (٢) عدد ١٢ ذبيحة من مجزرة المعيصيم (٢) ومجزرة المعيصيم (٣) عولجت بمطهر PHMG.
- (٣) عدد ١٢ ذبيحة من المجزرة الحمراء الوحدة (و)، والمجزرة الزرقاء الوحدة (هـ) عولجت بمطهر HOCl.

٥.٢.٤. إجراءات الدراسة الميدانية

نفذت التجربة ضمن مسار التشغيل الفعلي للمجازر، وقبل دخول الذبيحة إلى نفق الغسيل والتطهير، حددت على منطقة الكتف مساحة ثابتة قدرها ٢٥ سم^٢، وأجري عليها القياس الأولي باستخدام ATP، واعتمدت القراءة الناتجة بوصفها القياس المرجعي (Baseline) قبل المعالجة. وبعد مرور الذبيحة بمرحلة الغسيل والتطهير باستخدام المطهر المخصص لكل مجزرة، أعيد إجراء قياسات ATP للذبائح نفسها بعد ٥ دقائق، وبعد ١٠ دقائق ثم بعد ١٥ دقيقة من تطبيق المطهر، مع الالتزام بمنطقة الكتف والمساحة المحددة نفسها في جميع القياسات اللاحقة، وقد استند تقييم فعالية المعالجة إلى مقارنة القراءات اللاحقة بالقراءة المرجعية لكل ذبيحة، بهدف تحديد التغير في مستوى التلوث السطحي وتتبع تأثير المطهر خلال الفترات الزمنية المحددة.

٣.٤. المرحلة الثانية: مسار التطبيق المباشر بالرش اليدوي

نفذ مسار التطبيق المباشر بالرش اليدوي بهدف تقييم التغير في قراءات ATP بعد تطبيق المطهرات تحت ظروف أكثر ضبطاً من وحدات الغسيل والرش الآلي. وشمل هذا المسار ٣٠ ذبيحة موزعة على المجموعات التطبيقية بواقع ٦ ذبائح لكل مجموعة، وأجريت لكل ذبيحة قراءة مرجعية قبل المعالجة، أعقبها قياسات بعد ٥ دقائق، وبعد ١٠ دقائق ثم بعد ١٥ دقيقة من تطبيق المطهر. وروعي توحيد المنطقة التشريحية

ومساحة القياس وإجراءات الرش والقياس قدر الإمكان بين المعاملات قبل تطبيق المطهرات وبعدها باستخدام تقنية قياس ATP.

١.٣.٤. تصميم التجربة

اعتمدت المرحلة الثانية تصميماً تجريبياً قلياً وبعدياً، وشملت ست ذبائح من الأغنام، بواقع ذبائح لكل مطهر من المطهرات الثلاثة، ثم أخذت العينات من منطقتي الكتف الأيمن والأيسر لكل ذبيحة، بواقع أربع عينات لكل مطهر، وبإجمالي ١٢ عينة. وقبل تطبيق رش المطهر الذبيحة، جمعت العينات الضابطة قراءة مرجعية (Baseline) باستخدام تقنية قياس ATP، ثم رشت الذبائح بالمطهر المخصص لكل مجموعة، وتم إعادة القياسات بعد المعالجة لتحديد مقدار التغير مقارنة بالقياسات المرجعية، بما يتيح تقييم فعالية كل مطهر باستخدام طريقتي القياس.

٢.٣.٤. تحضير العينات

اعتمدت منطقتا الكتف الأيمن والأيسر مواقع موحدة لأخذ العينات من جميع الذبائح، بما يحد من التباين الناتج عن اختلاف المواقع التشريحية. وقبل تطبيق المطهرات، حددت مناطق أخذ العينات وجمعت منها القياسات المرجعية باستخدام ATP، ثم خضعت الذبائح للمعالجة بالمطهرات وفق التصميم التجريبي المحدد، مع المحافظة على توحيد مواقع وإجراءات أخذ العينات في القياسات اللاحقة.

٣.٣.٤. تطبيق المطهرات

طبقت المطهرات الثلاثة على أسطح الذبائح باستخدام التراكيز التشغيلية المعتمدة في مجازر مشروع أضاحي، وهي نسبة ٠,١٪ (١٠٠٠ ppm) للمطهر PHMG، ونسبة ٠,٠٥٪ (٥٠ ppm) للمطهر HOCl، ونسبة ٠,٠٥٪ (٥٠ ppm) للمطهر H₂O₂، وقبل تطبيق المطهرات، أخذت القياسات المرجعية (Baseline) لكل ذبيحة، ثم رشت أسطح الذبائح بالمطهر المخصص لكل مجموعة، وأجريت القياسات اللاحقة بعد ٥ دقائق، وبعد ١٠ دقائق ثم بعد ١٥ دقيقة من المعالجة، مع توحيد موقع (اكتاف الذبيحة) ومساحة (٢٥ سم^٢) أخذ العينات وإجراءات التطبيق والقياس بين جميع المعاملات، بما يضمن إمكانية المقارنة بين كفاءة المطهرات خلال الفترات الزمنية المحددة. كما تمثل هذه القيم التراكيز المستهدفة للمحالييل المستخدمة عند التحضير. ولم تتضمن الدراسة قياساً مباشراً للتركيز الفعلي للمادة الفعالة على سطح الذبيحة بعد الرش، كما لم

يجر التحقق من مقدار التغير في التركيز الناتج عن ملاسة الماء العالق أو المواد العضوية على السطح. ولذلك استخدمت قيم التركيز بوصفها وصفاً لظروف التحضير والتطبيق، وليس قياساً للجرعة الفعلية التي تعرض لها سطح الذبيحة

-----طبقت المطهرات الثلاثة على أسطح الذبائح باستخدام التراكيز التشغيلية المعتمدة في مجازر مشروع أضاحي، وهي ١٠٠ ppm لحمض الهيبوكلوروس (HOCl)، ونسبة ١٪ لبيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2)، ونسبة ١٪ لبولي هيكساميثيلين جوانيديين (PHMG)، وقبل تطبيق المطهرات، أخذت القياسات المرجعية (Baseline) لكل ذبيحة، ثم رشّت أسطح الذبائح بالمطهر المخصص لكل مجموعة، وأجريت القياسات اللاحقة بعد ٥ دقائق، وبعد ١٠ دقائق ثم بعد ١٥ دقيقة من المعالجة، مع توحيد موقع (اكتاف الذبيحة) ومساحة (٢٥ سم^٢) أخذ العينات وإجراءات التطبيق والقياس بين جميع المعاملات، بما يضمن إمكانية المقارنة بين كفاءة المطهرات خلال الفترات الزمنية المحددة. كما تمثل هذه القيم التراكيز المستهدفة للمحالييل المستخدمة عند التحضير. ولم تتضمن الدراسة قياساً مباشراً للتركيز الفعلي للمادة الفعالة على سطح الذبيحة بعد الرش، كما لم يجر التحقق من مقدار التغير في التركيز الناتج عن ملاسة الماء العالق أو المواد العضوية على السطح. ولذلك استخدمت قيم التركيز بوصفها وصفاً لظروف التحضير والتطبيق، وليس قياساً للجرعة الفعلية التي تعرض لها سطح الذبيحة.

٤.٣.٤. تقييم كفاءة التطهير

قيمت كفاءة المطهرات من خلال مقارنة مستوى التلوث قبل المعالجة بالقياسات المسجلة بعد ٥ دقائق، وبعد ١٠ دقائق ثم بعد ١٥ دقيقة من تطبيق المطهر. واستخدمت تقنية قياس ATP لتقدير التغير في مستوى التلوث السطحي. واستند تقييم الفعالية إلى مقدار التغير في القراءات مقارنة بالقيم المرجعية، بما يتيح مقارنة كفاءة المطهرات الثلاثة عبر أزمنة القياس المختلفة.

٤.٤. الكشف عن مستوى التلوث السطحي

استخدمت تقنية قياس للأدينوسين ثلاثي الفوسفات (Adenosine Triphosphate Bioluminescence, ATP) بوصفها أداة سريعة لتقييم مستوى التلوث على أسطح الذبائح ورصد التغير الناتج عن تطبيق المطهرات. وتعتمد التقنية على الكشف عن ATP من خلال تفاعل اللوسيفيرين-لوسيفيراز وإنتاج إشارة

ضوئية تقاس بوحدة الضوء النسبية (Relative Light Units, RLU). وقد أظهرت الدراسات الحديثة إمكانية تطبيق المسحات المعتمدة على ATP مباشرة على أسطح اللحوم للكشف السريع عن التلوث، بما يدعم استخدامها في تطبيقات مراقبة سلامة اللحوم وتقييم إجراءات المعالجة (Mendes *et al.*, 2025). وفي الدراسة الحالية، حددت مساحة ثابتة قدرها ٢٥ سم^٢ من منطقة الكتف لأخذ العينات، وأجريت القراءة المرجعية (Baseline) قبل تطبيق المطهر، ثم أعيد القياس بعد ٥ دقائق، وبعد ١٠ دقائق ثم بعد ١٥ دقيقة من المعالجة، مع توحيد موقع ومساحة أخذ العينات وإجراءات القياس في جميع المعاملات. واعتمد التغير في قراءات RLU مقارنة بالقراءة المرجعية مؤشراً لتقييم تأثير المعالجة ومقارنة كفاءة المطهرات خلال أزمنة القياس المختلفة.

٥.٤. القياس المرجعي وضبط جودة القياسات

اعتمدت القراءة المسجلة لكل ذبيحة قبل المعالجة بوصفها قياساً مرجعياً فردياً (Baseline) لمقارنة القراءات اللاحقة للذبيحة نفسها. ولا تمثل هذه القراءة مجموعة ضابطة مستقلة بالمعنى التجريبي، إذ لم تتضمن الدراسة مجموعة موازية تخضع للغسيل بالماء فقط دون إضافة المطهر. ولذلك يستخدم القياس المرجعي لتقدير التغير داخل الذبيحة، دون أن يسمح بمفرده بالفصل الكامل بين أثر الغسيل وأثر المطهر في مسار الغسيل والرش الآلي.

٦.٤. التحليل الإحصائي

حللت البيانات إحصائياً باستخدام المتوسط الحسابي (Mean) والانحراف المعياري (SD)، وحسبت نسب الانخفاض في قراءات ATP مقارنة بالقراءات المرجعية قبل المعالجة، واستخدم اختبار العينات المترابطة (Paired-samples t-test) لتقييم دلالة التغير في القراءات قبل المعالجة وبعدها عند الأزمنة المختلفة، بينما استخدم تحليل التباين الأحادي (One-way ANOVA) لمقارنة نسب الانخفاض بين المطهرات الثلاثة، متبوعاً باختبار Tukey HSD للمقارنات البعدية. كما استخدم تحليل التباين الثنائي المتين (Robust Two-way ANOVA; HC3) لتقييم أثر كل من نوع المطهر وطريقة التطبيق (الرش اليدوي والآلي)، والتفاعل بينهما، كما اعتمدت الدلالة الإحصائية عند $p < 0.05$.

٥. نتائج الدراسة

يعرض هذا القسم النتائج الميدانية للدراسة من خلال وصف عينة الدراسة وخصائصها الأساسية، ثم استعراض الخصائص التشغيلية لوحداث الغسيل والتطهير، وبيانات كمية المياه العالقة على سطح الذبائح، يلي ذلك عرض نتائج التغير في قراءات الأدينوسين ثلاثي الفوسفات (ATP) وفق نوع المطهر وطريقة التطبيق وزمن القياس. كما يتضمن القسم المقارنات الوصفية بين التطبيق بالرش اليدوي والتطبيق الآلي داخل وحدات الغسيل والتطهير، بما يدعم تفسير الفروق في الاستجابة بين المطهرات والظروف التشغيلية المختلفة.

٥.١. وصف عينة الدراسة

شملت الدراسة عدداً من الذبائح التي خضعت للمعالجة بالمطهرات الثلاثة وهي المطهر PHMG والمطهر HOCl والمطهر H_2O_2 باستخدام طريقتي التطبيق محل الدراسة، وهما الرش اليدوي ووحدة الغسيل والرش الآلي. واعتمدت كل ذبيحة بوصفها وحدة تجريبية مستقلة، وسجلت لها قراءة مرجعية قبل المعالجة، تلتها قراءات بعد ٥ و ١٠ و ١٥ دقيقة من تطبيق المطهر.

٥.١.١. عدد العينات

شملت التجربة الميدانية ٣٠ ذبيحة لكل طريقة تطبيق، موزعة على المطهرات والمجازر محل الدراسة بواقع ٦ ذبائح لكل مجموعة تطبيقية، ليبلغ إجمالي الذبائح المستخدمة في طريقتي الرش اليدوي والآلي ٦٠ ذبيحة. وأجريت لكل ذبيحة قياسات متتابعة لقراءات ATP قبل المعالجة بعد ٥ دقائق، وبعد ١٠ دقائق ثم بعد ١٥ دقيقة.

٥.٢.١. عينات خط الأساس لمقارنة النتائج

اعتمدت قراءة ATP المسجلة لكل ذبيحة قبل تطبيق المطهر بوصفها قراءة خط الأساس (Baseline)، واستخدمت مرجعاً لمقارنة القراءات اللاحقة وحساب مقدار ونسبة الانخفاض بعد المعالجة. وأسهم اعتماد خط أساس مستقل لكل ذبيحة في مراعاة الاختلافات الأولية في مستوى التلوث السطحي بين الذبائح، وتقييم التغير في قراءات ATP المرتبط بالمعالجة عند أزمنة القياس المختلفة.

٢.٥. الخصائص التشغيلية لوحدات الغسيل والتطهير وكمية الماء على سطح الذبيحة

يوضح جدول (١) الخصائص التشغيلية لوحدات الغسيل والتطهير في المجازر محل الدراسة، متضمناً طول نفق المعالجة، وزمن مرور الذبيحة داخل وحدة الغسيل، وكمية الماء العالقة على سطح الذبيحة بعد انتهاء عملية الغسيل أو الغسيل والتطهير، حيث أظهرت النتائج أن طول وحدات الغسيل والتطهير تراوح بين ١ و٧ أمتار، في حين بلغ طول وحدة الغسيل ٣ أمتار في مجازر المعيصيم (١)، والمعيصيم (٢)، والمعيصيم (٣)، بينما بلغت ٧ أمتار في مجزرتي وحدة (و) ووحدة (هـ). وفي المقابل، بلغ طول نفق التطهير في مجزرة المعيصيم (١) متراً واحداً، نظراً إلى أن عمليتي الغسيل والتطهير تنفذان في وحدتين منفصلتين.

جدول (١): الخصائص التشغيلية لوحدات الغسيل والتطهير وكمية الماء العالقة على سطح الذبيحة بعد المعالجة في المجازر محل الدراسة

المجزرة	مرحلة المعالجة	طول وحدة الرش الالي / م		زمن مرور الذبيحة / ثانية	كمية الماء العالقة على سطح الذبيحة / مل
		غسيل	التطهير		
معيصيم (٢)	غسيل + تطهير	٢	١	١٤,٩١	٤٣٥,٩
معيصيم (٣)	غسيل + تطهير	٢	١	١٥,٢	٤٧٩,٤٩
معيصيم (١)	غسيل	٢		١٤,٨	٣٧٣,٢٥
معيصيم (١)	تطهير		١,٥	٣,١٨	٤٧,٩٦
مجزرة وحدة (و)	غسيل + تطهير	٤	١,٩	٢١,٦١	٣٥٠,٩٨
مجزرة وحدة (هـ)	غسيل + تطهير	٤	١,٩	٢١,١٩	٣١٠,٦

كما أظهرت النتائج اختلافاً في زمن مرور الذبيحة داخل وحدات المعالجة، حيث تراوح بين زمن ٣,١٨ وزمن ٢١,٦١ ثانية. وسجل أقصر زمن مرور في نفق التطهير بمجزرة المعيصيم (١)، في حين سجلت مجزرة وحدة (و) أطول زمن مرور، تلتها مجزرة وحدة (هـ)، بينما تراوحت أزمانه المرور في مجازر المعيصيم (١)، والمعيصيم (٢)، والمعيصيم (٣) بين زمن ١٤,٨ وزمن ١٥,٢ ثانية.

وفيما يتعلق بكمية الماء العالقة على سطح الذبيحة، أظهرت النتائج تبايناً بين المجازر، إذ تراوحت القيم المسجلة في وحدات الغسيل والتطهير المشتركة بين كمية ٣١٠,٦ مل وكمية ٤٧٩,٤٩ مل. وسجلت مجزرة المعيصيم (٣) أعلى كمية ماء عالقة على سطح الذبيحة (٤٧٩,٤٩ مل)، تلتها مجزرة المعيصيم (٢) (٤٣٥,٩ مل)، ثم مجزرة المعيصيم (١) بعد الغسيل (٣٧٣,٢٥ مل)، في حين سجلت مجزرة وحدة (و) ومجزرة وحدة (هـ) قيماً بلغت كمية ٣٥٠,٩٨ مل، وكمية ٣١٠,٦ مل على التوالي.

أما في مجزرة المعيصيم (١)، فقد أجري القياس بصورة مستقلة في مرحلتي الغسيل والتطهير، وأظهرت النتائج أن كمية الماء العالقة على سطح الذبيحة انخفضت من ٣٧٣,٢٥ مل بعد نفق الغسيل إلى ٤٧,٩٦ مل بعد نفق التطهير، وذلك نتيجة إجراء عملية التغليف والتطهير في وحدتين منفصلتين تمثل كل منهما مرحلة تشغيلية مستقلة.

٣.٥. التغير في قراءات ATP بعد التطبيق المباشر للمطهرات بالرش اليدوي

أظهرت نتائج التحليل الوصفي لقراءات الأدينوسين ثلاثي الفوسفات (ATP) انخفاضاً تدريجياً في متوسط القراءات بعد الرش اليدوي مقارنة بالقراءات المرجعية قبل المعالجة للمطهرات الثلاثة بولي هيكساميثيلين جوانيديين (PHMG)، وحمض الهيپوكلوروس (HOCl)، وبيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2)، مع استمرار الانخفاض بزيادة زمن المعالجة من ٥ إلى ١٥ دقيقة في جميع المجازر محل الدراسة (جدول ٢).

جدول (٢): التحليل الوصفي لقراءات ATP بعد الرش اليدوي بالمطهرات

المجزرة	نوع المطهر	عدد العينات	قبل الغسيل	بعد ٥ دقائق	بعد ١٠ دقائق	بعد ١٥ دقيقة
			SD	Mean	SD	Mean
معيصيم (٢)	PHMG	6	7323	436.1	3373.8	563.8
معيصيم (٣)	PHMG	6	6939.2	785.8	3085.8	782.3
معيصيم (١)	H_2O_2	6	7723.5	478.2	5416.5	736.8
مجزرة وحدة (و)	HOCl	6	7009.2	830.1	4599.5	394.2
مجزرة وحدة (هـ)	HOCl	6	6623.5	580.5	4256	788.4

Mean: المتوسط الحسابي لقراءات ATP

SD: الانحراف المعياري

حقق مطهر PHMG أعلى انخفاض في قراءات ATP، إذ انخفض متوسط القراءة في مجزرة المعيصيم (٢) من ٧٣٢٣ RLU قبل المعالجة إلى قراءة ٣٣٧٣,٨ وقراءة ٢٦٤٠ وقراءة ١٩٢٥,٢ RLU بعد ٥ و ١٠ و ١٥ دقيقة، على التوالي، بينما انخفض في مجزرة المعيصيم (٣) من قراءة ٦٩٣٩,٢ RLU إلى قراءة ٣٠٨٥,٨ وقراءة ٢٤٠٣ وقراءة ١٧٣٠,٧ RLU خلال الأزمنة نفسها، حيث بلغت نسب الانخفاض في المعيصيم (٢) نسبة ٥٤٪ ونسبة ٦٤٪ ونسبة ٧٣,٨٪، وفي المعيصيم (٣) نسبة ٥٦,١٪ ونسبة ٦٦٪ ونسبة ٧٥,٩٪ بعد ٥ و ١٠ و ١٥ دقيقة، على التوالي (جدول ٢، جدول ٣).

وأظهر مطهر HOCl انخفاضاً متدرجاً في قراءات ATP، حيث بلغت نسب الانخفاض في مجزرة وحدة (و) ٣٤٪ ونسبة ٤١،٨٪ ونسبة ٥٦،٩٪ بعد ٥ و ١٠ و ١٥ دقيقة، على التوالي، مقابل نسبة ٣٦٪ ونسبة ٤٥٪ ونسبة ٥٩٪ في مجزرة وحدة (هـ). أما بيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2)، فانخفض متوسط قراءة ATP من ٧٧٢٣،٥ RLU قبل المعالجة إلى قراءة ٥٤١٦،٥ وقراءة ٤٤٢٥،٧ وقراءة ٣٦٤٣،٣ RLU بعد ٥ و ١٠ و ١٥ دقيقة، بما يعادل نسب انخفاض بلغت ٣٠٪ ونسبة ٤٢،٩٪ ونسبة ٥٣٪، على التوالي (جدول ٢، جدول ٣).

جدول (٣): نسبة الانخفاض في قراءات ATP والدلالة الإحصائية لتأثير المطهرات بعد الرش اليدوي

المجزرة	نوع المطهر	عدد العينات	بعد ٥ دقائق		بعد ١٠ دقائق		بعد ١٥ دقيقة	
			p-value	Mean (%)	p-value	Mean (%)	p-value	Mean (%)
معيصيم (٢)	PHMG	6	<0.001	54	<0.001	64	<0.001	73.8
معيصيم (٣)	PHMG	6	<0.001	56.1	<0.001	66	<0.001	75.9
معيصيم (١)	H_2O_2	6	<0.001	30	<0.001	42.9	<0.001	53
مجزرة وحدة (و)	HOCl	6	<0.001	34	<0.001	41.8	<0.001	56.9
مجزرة وحدة (هـ)	HOCl	6	<0.001	36	<0.001	45	<0.001	59

Mean (%): المتوسط الحسابي لنسبة الانخفاض في قراءة ATP مقارنة بالقراءة المرجعية قبل المعالجة

p-value: قيمة الدلالة الإحصائية للمقارنة بين قراءة ATP قبل المعالجة والقراءة بعد المعالجة عند الزمن المحدد

وللتحقق من دلالة التغير داخل كل معاملة، استخدم اختبار العينات المترابطة Paired-samples t-test، لمقارنة قراءات ATP المرجعية قبل الرش بالقراءات المسجلة للعينات نفسها بعد ٥ و ١٠ و ١٥ دقيقة. وأظهرت النتائج وجود انخفاض ذي دلالة إحصائية عند جميع أزمنة القياس ولجميع المطهرات ($p < 0.001$)، مما يدل على أن المطهرات الثلاثة أحدثت انخفاضاً معنوياً في قراءات ATP مقارنة بمستوياتها قبل المعالجة (جدول ٣).

وللمقارنة المباشرة بين كفاءة المطهرات الثلاثة، استخدم تحليل التباين الأحادي One-way ANOVA، لمقارنة متوسط نسب الانخفاض في قراءات ATP عند كل زمن، حيث أظهرت النتائج وجود فروق ذات دلالة إحصائية بين المطهرات بعد ٥ دقائق ($F = 39.97$, $p < 0.001$)، وبعد ١٠ دقائق ($F = 28.09$, $p < 0.001$)، وبعد ١٥ دقيقة ($F = 20.16$, $p < 0.001$) (جدول ٤)، كما بلغ متوسط الانخفاض في مجموعة PHMG 55.0٪ و ٦٥،٠٪ و ٧٤،٨٪ بعد ٥ و ١٠ و ١٥ دقيقة، على التوالي، مقارنة بنسبة ٣٥٪ ونسبة ٤٣،٤٪ ونسبة ٥٧،٩٪ لمطهر HOCl، ونسبة ٣٠٪ ونسبة ٤٢،٩٪ ونسبة ٥٣٪ لمطهر H_2O_2 .

وأظهرت المقارنات البعدية باستخدام اختبار Tukey HSD أن المطهر PHMG حقق نسب انخفاض أعلى بصورة دالة إحصائية من كل من المطهر HOCl والمطهر H₂O₂ عند أزمنة القياس الثلاثة، في حين لم تظهر فروق ذات دلالة إحصائية بين المطهر HOCl والمطهر H₂O₂ عند أي من أزمنة القياس ($p > 0.05$). وبوجه عام، تبين أن فعالية المطهرات ازدادت مع امتداد زمن المعالجة حتى ١٥ دقيقة، وأن المطهر PHMG حقق أعلى كفاءة في خفض قراءات ATP ضمن ظروف التجربة الميدانية، بينما لم يثبت إحصائياً وجود اختلاف في كفاءة المطهر HOCl والمطهر H₂O₂ رغم ارتفاع متوسط نسب الانخفاض وصفيّاً مم المطهر HOCl.

جدول (٤): مقارنة نسب الانخفاض في قراءات ATP بين المطهرات

p-value	F	نسب الانخفاض H ₂ O ₂		نسب انخفاض HOCl		نسب الانخفاض PHMG		زمن القياس
		SD	Mean reduction (%)	SD	Mean reduction (%)	SD	Mean reduction (%)	
<0.001	39.97	6.9	30	6.8	35	6.3	55	بعد ٥ دقائق
<0.001	28.09	8.1	42.9	8.2	43.4	7.2	65	بعد ١٠ دقائق
<0.001	20.16	7.1	53	7.2	57.9	9.1	74.8	بعد ١٥ دقيقة

Mean reduction (%): المتوسط الحسابي لنسبة الانخفاض في قراءة ATP مقارنة بالقراءة المرجعية قبل المعالجة.

SD: الانحراف المعياري

F: قيمة اختبار تحليل التباين الأحادي (One-way ANOVA)

p-value: قيمة الدلالة الإحصائية للفروق بين المطهرات الثلاثة

٤.٥. التغير في قراءات ATP بعد المعالجة عبر وحدة الغسيل والرش الآلي بالمطهر

أظهرت نتائج التحليل الوصفي لقراءات ATP انخفاضاً تدريجياً في متوسط القراءات بعد مرور الذبائح عبر وحدة الغسيل والرش الآلي بالمطهرات الثلاثة مقارنة بالقراءات المرجعية قبل المعالجة، واستمر الانخفاض مع زيادة الزمن من ٥ إلى ١٥ دقيقة في جميع المجازر محل الدراسة (جدول ٥)، حيث حقق مطهر PHMG أعلى نسب انخفاض، ففي مجزرة المعيصيم (٢) انخفض متوسط قراءة ATP من ٧١٥٣,٨ RLU قبل المعالجة إلى قراءة ٦٠٤٧,٥ وقراءة ٥٤٤٢,٧ وقراءة ٤٣٥٤,٢ RLU بعد ٥ و ١٠ و ١٥ دقيقة، على التوالي، وبنسب انخفاض بلغت نسبة ١٥,٧٪ ونسبة ٢٤,١٪ ونسبة ٣٩,٣٪. كما ظهر اتجاه مماثل في مجزرة المعيصيم (٣)، حيث انخفض المتوسط من قراءة ٧٦٠,٢ RLU إلى قراءة ٦٥٠,٨ وقراءة ٥٥٣,٠ وقراءة

٤٤٢٤,٠ RLU، ونسب انخفاض بلغت نسبة ١٤,٤٪ ونسبة ٢٧,٢٪ ونسبة ٤١,٨٪ خلال الأزمنة نفسها (جدول ٥، جدول ٦).

وأظهر مطهر HOCl انخفاضاً متدرجاً في قراءات ATP في وحدتي التطبيق، إذ بلغت نسب الانخفاض في مجزرة وحدة (و) نسبة ١٠,٨٪ ونسبة ١٩,٧٪ ونسبة ٢٧,٧٪ بعد ٥ و ١٠ و ١٥ دقيقة، على التوالي، مقابل ١١,١٪ و ٢٠,٩٪ و ٢٨,٠٪ في مجزرة وحدة (هـ). أما بيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2)، فقد انخفض متوسط قراءة ATP من ٧٢٦٩,٥ RLU قبل المعالجة إلى قراءة ٦٥٩٣,٣ وقراءة ٦٢٦٣,٧ وقراءة ٥٦٣٧,٣ RLU بعد ٥ و ١٠ و ١٥ دقيقة، على التوالي، ونسب انخفاض بلغت نسبة ٩,٣٪ ونسبة ١٣,٨٪ ونسبة ٢٢,٤٪ (جدول ٥، جدول ٦).

وللتحقق من الدلالة الإحصائية للتغير داخل كل معاملة، استخدم اختبار العينات المترابطة (Paired-samples t-test) لمقارنة قراءات ATP المرجعية قبل المعالجة بالقراءات المسجلة للعينات نفسها بعد ٥ و ١٠ و ١٥ دقيقة. وأظهرت النتائج وجود انخفاض ذي دلالة إحصائية في جميع المجموعات وعند جميع أزمنة القياس ($p < 0.001$)، مما يشير إلى أن استخدام وحدة الغسيل والرش الآلي بالمطهرات الثلاثة ارتبط بانخفاض معنوي في قراءات ATP مقارنة بمستوياتها المرجعية قبل المعالجة (جدول ٣). ولمقارنة فعالية المطهرات الثلاثة، استخدم تحليل التباين الأحادي (One-way ANOVA) لمقارنة متوسط نسب الانخفاض في قراءات ATP عند كل زمن. وأظهرت النتائج وجود فروق ذات دلالة إحصائية بين المطهرات بعد ٥ دقائق ($F = 43.40, p < 0.001$)، وبعد ١٠ دقائق ($F = 108.47, p < 0.001$)، وبعد ١٥ دقيقة ($F = 478.40, p < 0.001$). وبلغ متوسط الانخفاض لمطهر PHMG نسبة ١٥٪ ونسبة ٢٥,٧٪ ونسبة ٤٠,٥٪ بعد ٥ و ١٠ و ١٥ دقيقة، على التوالي، مقابل نسبة ١٠,٩٪ ونسبة ٢٠,٣٪ ونسبة ٢٧,٩٪ لمطهر HOCl، ونسبة ٩,٣٪ ونسبة ١٣,٨٪ ونسبة ٢٢,٤٪ لمطهر H_2O_2 (جدول ٧).

وأظهرت المقارنات البعدية باستخدام اختبار Tukey HSD أن PHMG حقق نسب انخفاض أعلى بصورة دالة إحصائية من كل من HOCl و H_2O_2 عند أزمنة القياس الثلاثة. وفي المقابل، لم يظهر فرق ذو دلالة إحصائية بين HOCl و H_2O_2 بعد ٥ دقائق ($p = 0.060$)، بينما أصبحت الفروق بينهما ذات دلالة إحصائية بعد ١٠ و ١٥ دقيقة، لصالح HOCl. وبوجه عام، أظهرت النتائج أن المطهرات الثلاثة أحدثت انخفاضاً معنوياً في قراءات ATP بعد استخدام وحدة الغسيل والرش الآلي، وأن مقدار الانخفاض ازداد مع امتداد زمن المعالجة حتى ١٥ دقيقة. كما أظهرت المقارنة بين المطهرات تفوق PHMG في نسب الانخفاض عند جميع

الأزمنة، يليه المطهر HOCl ثم المطهر H₂O₂، مع ثبوت الفروق بين المطهر HOCl والمطهر H₂O₂ إحصائياً عند الزمنين ١٠ و ١٥ دقيقة.

جدول (٥): التحليل الوصفي لقراءات ATP بعد وحدة الغسيل والرش الآلي بالمطهرات

المجزرة	نوع المطهر	عدد العينات	قبل الغسيل		بعد ٥ دقائق		بعد ١٠ دقائق		بعد ١٥ دقيقة	
			SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean
معيصيم (٢)	PHMG	6	1992.9	7153.8	1730.8	6047.5	1557.8	5442.7	1246.3	4354.2
معيصيم (٣)	PHMG	6	1239.7	7602.7	1059.5	6505.8	900.6	5530	720.5	4424
معيصيم (١)	H ₂ O ₂	6	536	7269.5	469.5	6593.3	445.9	6263.7	401.4	5637.3
مجزرة وحدة (و)	HOCl	6	1075.8	6671.2	989.1	5957.2	890.1	5361.5	801.1	4825.3
مجزرة وحدة (هـ)	HOCl	6	979.6	7549.2	853.4	6707.7	759.7	5969.8	691.1	5432.5

Mean: المتوسط الحسابي لقراءات ATP

SD: الانحراف المعياري

جدول (٦): نسبة الانخفاض في قراءات ATP والدلالة الإحصائية لتأثير المطهرات بعد وحدة الغسيل والرش الآلي

المجزرة	نوع المطهر	عدد العينات	بعد ٥ دقائق		بعد ١٠ دقائق		بعد ١٥ دقيقة	
			p-value	Mean (%)	p-value	Mean (%)	p-value	Mean (%)
معيصيم (٢)	PHMG	6	<0.001	15.7	<0.001	24.1	<0.001	39.3
معيصيم (٣)	PHMG	6	<0.001	14.4	<0.001	27.2	<0.001	41.8
معيصيم (١)	H ₂ O ₂	6	<0.001	9.3	<0.001	13.8	<0.001	22.4
مجزرة وحدة (و)	HOCl	6	<0.001	10.8	<0.001	19.7	<0.001	27.7
مجزرة وحدة (هـ)	HOCl	6	<0.001	11.1	<0.001	20.9	<0.001	28

Mean (%): المتوسط الحسابي لنسبة الانخفاض في قراءة ATP مقارنة بالقراءة المرجعية قبل المعالجة

p-value: قيمة الدلالة الإحصائية للمقارنة بين قراءة ATP قبل المعالجة والقراءة بعد المعالجة عند الزمن المحدد

جدول (٧): مقارنة نسب الانخفاض في قراءات ATP بين المطهرات بعد وحدة الغسيل والرش الآلي

p-value	F	نسب الانخفاض H ₂ O ₂		نسب انخفاض HOCl		نسب الانخفاض PHMG		زمن القياس
		SD	Mean reduction (%)	SD	Mean reduction (%)	SD	Mean reduction (%)	
<0.001	43.4	1.4	9.3	0.8	10.9	1.8	15	بعد ٥ دقائق

بعد ١٠ دقائق	25.7	2.2	20.3	0.9	13.8	1.3	108.47	<0.001
بعد ١٥ دقيقة	40.5	1.8	27.9	0.6	22.4	1.2	478.4	<0.001

Mean reduction (%): المتوسط الحسابي لنسبة الانخفاض في قراءة ATP مقارنة بالقراءة المرجعية قبل المعالجة.

SD: الانحراف المعياري

F: قيمة اختبار تحليل التباين الأحادي (One-way ANOVA)

p-value: قيمة الدلالة الإحصائية للفروق بين المطهرات الثلاثة

٥.٥. مقارنة نسب الانخفاض في قراءات ATP بين مساري الرش اليدوي والغسيل والرش الآلي
أظهرت المقارنة بين طريقتي تطبيق المطهرات (الرش اليدوي والرش الآلي) اختلافاً واضحاً في نسب الانخفاض في قراءات ATP، حيث سجل الرش اليدوي نسب انخفاض أعلى من الرش الآلي للمطهرات الثلاثة وعند جميع أزمنة القياس، فعند استخدام PHMG بلغت نسب الانخفاض في الرش اليدوي ٥٥٪ ونسبة ٦٥٪ ونسبة ٧٤,٨٪ بعد ٥ و ١٠ و ١٥ دقيقة، على التوالي، مقابل نسبة ١٥٪ ونسبة ٢٥,٧٪ ونسبة ٤٠,٥٪ باستخدام الرش الآلي. كما بلغت نسب الانخفاض باستخدام HOCI في الرش اليدوي نسبة ٣٥٪ ونسبة ٤٣,٤٪ ونسبة ٥٧,٩٪، مقابل نسبة ١٠,٩٪ ونسبة ٢٠,٣٪ ونسبة ٢٧,٩٪ في الرش الآلي، في حين سجل H_2O_2 نسب انخفاض بلغت نسبة ٣٠٪ ونسبة ٤٢,٩٪ ونسبة ٥٣٪ في الرش اليدوي، مقابل نسبة ٩,٣٪ ونسبة ١٣,٨٪ ونسبة ٢٢,٤٪ في الرش الآلي خلال الأزمنة نفسها.
وللتحقق من أثر كل من نوع المطهر وطريقة التطبيق في نسب الانخفاض، استخدم تحليل التباين الثنائي بتقديرات متينة للتباين (Robust Two-way ANOVA; HC3) نظراً إلى عدم تحقق افتراض تجانس التباينات بين المجموعات، فقد أظهرت النتائج وجود تأثير ذي دلالة إحصائية لنوع المطهر عند ٥ و ١٠ و ١٥ دقيقة ($p < 0.001$)، كما ظهر تأثير دال إحصائياً لطريقة التطبيق (يدوي أو رش آلي) عند الأزمنة الثلاثة ($p < 0.001$)، مما يؤكد اختلاف نسب الانخفاض في قراءات ATP باختلاف كل من نوع المطهر وطريقة تطبيقه (جدول ٨). كما أظهر التحليل وجود تفاعل ذي دلالة إحصائية بين نوع المطهر وطريقة التطبيق بعد ٥ دقائق ($F = 21.31, p < 0.001$) وبعد ١٠ دقائق ($F = 11.82, p < 0.001$)، مما يشير إلى أن مقدار الاختلاف بين الرش اليدوي والآلي خلال هذين الزمنين تباين باختلاف نوع المطهر.

جدول (٨): مقارنة تأثير نوع المطهر وطريقة التطبيق في خفض قراءات ATP باستخدام تحليل التباين الثنائي المتين (Robust Two-way ANOVA; HC3)

البيان	مصدر التباين	F	p-value	الدلالة الإحصائية
بعد ٥ دقائق	نوع المطهر	45.67	<0.001	دال إحصائياً
	طريقة التطبيق (يدوي/آلي)	548.83	<0.001	دال إحصائياً
	نوع المطهر × طريقة التطبيق	21.31	<0.001	دال إحصائياً
بعد ١٠ دقائق	نوع المطهر	105.56	<0.001	دال إحصائياً
	طريقة التطبيق (يدوي/آلي)	428.29	<0.001	دال إحصائياً
	نوع المطهر × طريقة التطبيق	11.82	<0.001	دال إحصائياً
بعد ١٥ دقيقة	نوع المطهر	341.22	<0.001	دال إحصائياً
	طريقة التطبيق (يدوي/آلي)	432.28	<0.001	دال إحصائياً
	نوع المطهر × طريقة التطبيق	0.76	<0.001	غير دال إحصائياً

F: قيمة اختبار تحليل التباين.

p-value: قيمة الدلالة الإحصائية.

نوع المطهر: H₂O₂، HOCl، PHMG.

طريقة التطبيق: الرش اليدوي والرش الآلي.

وبوجه عام، سجل مسار الرش اليدوي نسب انخفاض في قراءات ATP أعلى من مسار الغسيل والرش الآلي في المجموعات محل الدراسة وعند أزمنة القياس المختلفة، كما سجلت مجموعات PHMG أعلى المتوسطات العددية للانخفاض، تلتها مجموعات HOCl ثم H₂O₂. وينبغي تفسير هذه المقارنات في ضوء اختلاف الظروف التشغيلية بين المسارين وارتباط أنواع المطهرات بالمواقع التي استخدمت فيها. كما تقتصر النتائج الحالية على التغير في مؤشر ATP، ولا تمثل قياساً مباشراً لمقدار الخفض في الحمل الميكروبي القابل للحياة

٦. مناقشة النتائج

تتناول هذه الدراسة تقييم فعالية ثلاث مطهرات آمنة هي حمض الهيبيكلوروس (HOCl)، وبيروكسيد الهيدروجين (H₂O₂)، وبولي هيكساميثيلين جوانيديين (PHMG) في الحد من التلوث السطحي على لحوم الهدي والأضاحي تحت الظروف التشغيلية الفعلية في مجازر مشروع أضاحي، حيث يهدف هذا الفصل إلى تفسير النتائج في ضوء الخصائص الكيميائية والتشغيلية للمطهرات، وربطها بما توصلت إليه الدراسات السابقة، مع مناقشة أوجه الاتفاق والاختلاف، وبيان العوامل التي قد تكون أسهمت في تباين كفاءة

المطهرات، واستعراض الدلالات العلمية والتطبيقية للنتائج بما يدعم تطوير ممارسات التطهير في بيئات الذبح عالية الكثافة.

١.٦. مقارنة أنماط الانخفاض في مؤشرات ATP بين مجموعات المطهرات

أظهرت النتائج اختلافاً في متوسطات الانخفاض في قراءات ATP بين مجموعات المطهرات محل الدراسة، حيث سجلت المجموعات التي استخدم فيها PHMG أعلى متوسطات عددية للانخفاض، تلتها مجموعات H_2O_2 ثم $HOCl$. إلا أن تفسير هذا الترتيب ينبغي أن يراعي أن كل مطهر طبق في مجزرة أو مجازر محددة، وأن المواقع اختلفت في تصميم وحدات الغسيل والتطهير وزمن المرور وكمية السائل العالق على سطح الذبيحة. ولذلك لا تسمح الدراسة الحالية بفصل أثر نوع المطهر بصورة كاملة عن أثر الموقع والظروف التشغيلية المصاحبة له، ويقتصر الاستنتاج على وصف الأداء المرصود للمجموعات تحت ظروف التطبيق التي أجريت فيها الدراسة، حيث تشير هذه النتائج إلى أن فعالية المطهرات في الظروف التشغيلية الفعلية لا تعتمد على الخصائص الكيميائية للمادة الفعالة فحسب، وإنما تتأثر بمجموعة من العوامل المتداخلة، تشمل الحمل العضوي، وطبيعة سطح الذبيحة، وآلية التطبيق، وزمن التلامس، والتركيز المستخدم، وهي عوامل تؤدي دوراً رئيساً في تحديد كفاءة إزالة التلوث في بيئات الذبح عالية الكثافة (Milios *et al.*, 2014; Antic *et al.*, 2021; Codex Alimentarius Commission, 2022).

ويبدو أن الأداء المرتفع لمطهر PHMG يرتبط بخصائصه التشغيلية وآلية تأثيره، إذ يعتمد على التفاعل المباشر مع الغشاء الخلوي للكائنات الدقيقة، مما يؤدي إلى اضطراب نفاذيته وفقدان مكوناته وتعطيل الوظائف الحيوية داخل الخلية، كما يتميز بنشاط واسع ضد البكتيريا والفطريات، مع احتفاظه بجزء من فعاليته في البيئات التي تحتوي على مستويات مرتفعة نسبياً من المواد العضوية، وهي ظروف تتشابه مع بيئة المسالخ التي تتواجد فيها الدماء وبقايا الأنسجة والدهون على أسطح الذبائح. ولذلك، فإن تفوقه في الدراسة الحالية يتفق مع ما تشير إليه الأدبيات من أن المطهرات الكاتيونية قد تكون أقل تأثيراً بالحمل العضوي مقارنة ببعض المطهرات المؤكسدة، مع ضرورة الإشارة إلى أن الأدلة المنشورة حول تطبيقه المباشر على الذبائح ما تزال أقل من تلك المتوافرة لمطهرات مثل $HOCl$ (Oulé *et al.*, 2008; Asiedu-Gyekye *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2022).

أما المطهر $HOCl$ فقد أظهر قدرة جيدة على خفض مستوى التلوث، إلا أن كفاءته جاءت أقل من PHMG، حيث يمكن تفسير ذلك بأن فعالية $HOCl$ ترتبط ارتباطاً وثيقاً بظروف التطبيق، ولا سيما تركيز الكلور

الحر المتاح، والرقم الهيدروجيني، وزمن التلامس، والحمل العضوي، ففي بيئة الذبح الفعلية، تتفاعل المادة الفعالة بسرعة مع الدم والبروتينات والمواد العضوية الموجودة على سطح الذبيحة، مما يؤدي إلى استهلاك جزء من قدرتها المؤكسدة قبل وصولها إلى الخلايا الميكروبية. كما أن سرعة خطوط الذبح، واستمرار الغسيل بالمياه، وقصر زمن التلامس الفعلي قد تحد من الكمية الفعالة المترسبة على السطح، وهو ما قد يفسر انخفاض كفاءته مقارنة بما سجلته بعض الدراسات المخبرية أو الدراسات التي أجريت في ظروف تشغيل أكثر ضبطاً (Roobab *et al.*, 2023; FDA, 2021; FAO/WHO, 2009; USDA-FSIS, 2026).

وفي المقابل، مطهر H_2O_2 أقل نسب الانخفاض بين المطهرات الثلاثة، وهو ما لا يعني بالضرورة انخفاض كفاءته المضادة للميكروبات، وإنما قد يعكس محدودية أدائه تحت ظروف التشغيل الفعلية. ففاعلية هذا المطهر تعتمد على توليد أنواع الأكسجين التفاعلية، إلا أن هذه الأنواع تتعرض للاستهلاك السريع في البيئات الغنية بالمواد العضوية، كما يسهم وجود إنزيم الكاتالاز (CAT) (Catalase enzyme) في الدم والأنسجة في تسريع تحلل بيروكسيد الهيدروجين إلى ماء وأكسجين، مما يقلل من زمن بقاء المادة الفعالة على سطح الذبيحة. ويضاف إلى ذلك أن الرش المباشر مع زمن تلامس قصير قد لا يوفر الظروف المثلى لتحقيق أعلى كفاءة للمطهر، وهو ما يتفق مع ما تشير إليه الأدبيات من أن أفضل أداء للمطهر H_2O_2 يتحقق غالباً عند استخدامه ضمن أنظمة تطهير متكاملة أو عند دمجها مع الأحماض البيروكسوية Peroxy Acids، والتي تشمل حمض البيروأسيستيك (PAA) (Peracetic Acid)، وحمض البيروفورميك (PFA) (Performic Acid)، وحمض البيروكسي بروبيونيك (PPA) (Peroxypropionic Acid)، حيث يسهم هذا الدمج في تعزيز الكفاءة الميكروبية مقارنة باستخدام بيروكسيد الهيدروجين منفرداً، ولا سيما في البيئات ذات الحمل العضوي المرتفع (Walsh *et al.*, 2018).

وتشير النتائج مجتمعة إلى أن اختيار المطهر الأنسب للمسالخ لا ينبغي أن يستند إلى فعاليته المخبرية فقط، وإنما إلى مدى احتفاظه بكفاءته تحت ظروف التشغيل الفعلية، حيث تتداخل كثافة الإنتاج، والحمل العضوي، وسرعة خطوط الذبح، وطريقة التطبيق مع الخصائص الكيميائية للمطهر لتحديد كفاءته النهائية. ويتفق ذلك مع الاتجاه الحديث في مجال سلامة اللحوم، الذي يؤكد أن نجاح برامج إزالة التلوث يعتمد على تكامل خصائص المطهر مع الممارسات التشغيلية الجيدة، وليس على استخدام مطهر عالي الكفاءة بمعزل عن ظروف التطبيق.

كما ينبغي تفسير هذه النتائج في إطار طبيعة تقنية ATP المستخدمة في هذه المرحلة من الدراسة، إذ تعكس قراءات ATP إجمالي المحتوى الحيوي الموجود على سطح الذبيحة، بما يشمل المصادر الميكروبية وغير

الميكروبية، ولا تمثل قياساً مباشراً للحمل الميكروبي القابل للحياة. ومن ثم، فإن تفوق أحد المطهرات في خفض قراءات ATP يعد مؤشراً على تحسن مستوى النظافة السطحية وانخفاض المحتوى الحيوي الكلي، بينما يبقى التحقق النهائي من مقدار الخفض الميكروبي معتمداً على نتائج العد الهوائي للمستعمرات (APC)، وهو ما يوفر دليلاً تكملياً لتفسير فعالية المطهرات (Mendes *et al.*, 2025).

٢.٦. التغير في قراءات ATP باختلاف الزمن بعد تطبيق المطهر

أظهرت نتائج الدراسة أن زيادة زمن التلامس أسهمت في تحسين كفاءة المطهرات الثلاثة في خفض مستوى التلوث السطحي، حيث استمر الانخفاض في قراءات ATP بصورة تدريجية مع الانتقال من الدقيقة الخامسة إلى الدقيقة الخامسة عشرة. وتشير هذه النتيجة إلى أن زمن التلامس يمثل أحد أهم العوامل المحددة لكفاءة المطهرات الكيميائية

أظهرت النتائج استمرار الانخفاض في قراءات ATP عند الانتقال من القياس المجري بعد ٥ دقائق إلى القياسين المجريين بعد ١٠ و ١٥ دقيقة من تطبيق المطهرات. ويشير ذلك إلى وجود نمط زمني في الاستجابة المقاسة بتقنية ATP، إلا أن هذه الأزمنة تمثل أوقات القياس بعد التطبيق، ولا يمكن مساواتها تلقائياً بزمن التلامس الفعلي للمادة الفعالة مع سطح الذبيحة ما لم يقس استمرار وجود المطهر وتركيزه على السطح خلال هذه الفترة. ولذلك تفسر النتائج بوصفها تغيراً زمنياً في مؤشر ATP بعد التطبيق، وليس قياساً مباشراً لعلاقة الجرعة بزمن التلامس، إذ إن عملية إزالة التلوث لا تعتمد على وجود المادة الفعالة فحسب، وإنما تتطلب وقتاً كافياً يسمح بانتشارها على سطح الذبيحة، واختراقها للخلايا الميكروبية، وإحداث التغيرات الكيميائية والبيولوجية اللازمة لتعطيل وظائفها الحيوية والقضاء عليها. وقد أكدت العديد من الدراسات أن العلاقة بين زمن التلامس وكفاءة التطهير علاقة طردية، ما دام تركيز المطهر وظروف التطبيق ثابتة، وأن قصر زمن التعرض يعد من أكثر الأسباب شيوعاً لانخفاض كفاءة المطهرات في التطبيقات الصناعية (Milios *et al.*, 2014; Antic *et al.*, 2021; Codex Alimentarius Commission, 2022).

ورغم أن جميع المطهرات أظهرت تحسناً مع زيادة زمن التلامس، فإن مقدار هذا التحسن لم يكن متماثلاً، مما يشير إلى اختلاف استجابة كل مطهر للظروف التشغيلية. ويعزى ذلك إلى اختلاف آليات عمل المطهرات واستقرارها الكيميائي ومدى تأثيرها بالحمل العضوي الموجود على أسطح الذبائح. فالمطهرات المؤكسدة، مثل المطهر HOCl، والمطهر H₂O₂، حيث تعتمد في كفاءتها على استمرار توفر المادة المؤكسدة خلال فترة التلامس، في حين قد يؤدي تفاعلها مع الدم والبروتينات وبقايا الأنسجة إلى استهلاك جزء من المادة الفعالة

قبل وصولها إلى جميع الكائنات الدقيقة، وهو ما قد يحد من كفاءتها، خاصة عند قصر زمن التعرض. أما PHMG فيعتمد على آلية مختلفة ترتكز على الارتباط بالغشاء الخلوي وإحداث اضطراب في نفاذيته، الأمر الذي قد يفسر احتفاظه بكفاءة مرتفعة نسبياً حتى في البيئات ذات الحمل العضوي المرتفع (Oulé *et al.*, 2008; Asiedu-Gyekye *et al.*, 2014; Roobab *et al.*, 2023).

كما توضح النتائج أن زيادة زمن التلامس لم تؤد إلى تقارب كفاءة المطهرات، وإنما حافظ كل مطهر على نمط أدائه النسبي، وهو ما يشير إلى أن زمن التلامس وحده لا يكفي لتعويض الفروق الجوهرية في الخصائص الكيميائية وآليات التأثير بين المطهرات. ويتفق ذلك مع ما تشير إليه الأدبيات من أن فعالية المطهرات في تطبيقات اللحوم تمثل محصلة لتفاعل عدة عوامل، تشمل نوع المطهر، وتركيزه، وزمن التلامس، وطريقة التطبيق، والحمل العضوي، والظروف البيئية المحيطة بعملية التطهير، وليس لأي عامل منفرد (Roobab *et al.*, 2023; Walsh *et al.*, 2018).

وتكتسب هذه النتيجة أهمية تطبيقية في المجازر ذات الكثافة التشغيلية العالية، حيث يكون زمن بقاء المطهر على سطح الذبيحة محدوداً نتيجة سرعة انتقال الذبائح بين مراحل الغسيل والتجهيز. وفي مثل هذه الظروف، قد لا يتحقق زمن التلامس اللازم للوصول إلى أعلى كفاءة ممكنة، حتى عند استخدام المطهر بالتركيز الموصى به. ومن ثم، فإن تحسين فعالية برامج التطهير لا يقتصر على اختيار المطهر المناسب، وإنما يتطلب أيضاً تصميم الإجراءات التشغيلية بما يضمن تحقيق زمن التلامس الفعلي الملائم لكل مطهر، مع مراعاة خصائصه الكيميائية وظروف التشغيل داخل المجازر (FDA, 2021; FAO/WHO, 2009; USDA- (FSIS, 2026).

كما تؤكد هذه النتائج أن زمن التلامس يمثل متغيراً تشغيلياً حاسماً في كفاءة التطهير، إلا أن تأثيره يظل مرتبطاً بخصائص المطهر نفسه وبالظروف التشغيلية المحيطة بعملية التطبيق. ولذلك، فإن تعظيم كفاءة برامج إزالة التلوث في المجازر يتطلب الموازنة بين نوع المطهر، وتركيزه، وزمن التلامس، وطريقة التطبيق، بدلاً من الاعتماد على أي عامل منها بصورة منفردة.

٣.٦. تأثير طريقة التطبيق (الرش اليدوي والرش الآلي) في فعالية المطهرات

أظهرت المقارنة أن مسار التطبيق اليدوي سجل نسب انخفاض في قراءات ATP أعلى من مسار الغسيل والرش الآلي في المجموعات محل الدراسة. غير أن المسارين لم يختلفا في وسيلة إيصال المطهر فقط، بل اختلفا كذلك في وجود مرحلة الغسيل السابقة، وكمية الماء العالقة، وخصائص وحدات الرش، وزمن المرور

وظروف التشغيل. ولذلك لا يمكن إرجاع الفروق المرصودة إلى طريقة الرش وحدها، وإنما ينبغي تفسيرها بوصفها فروقاً بين مسارين تشغيليين مختلفين في مجموعة من المتغيرات المصاحبة. وتنسجم هذه النتيجة مع ما أكدته الأدبيات من أن نجاح برامج إزالة التلوث يعتمد على تحقيق تغطية متجانسة لسطح اللحوم، وضمان وصول كمية كافية من المطهر، والمحافظة على زمن التلامس المناسب، وهي عوامل قد يكون تأثيرها مساوياً أو أكبر من تأثير نوع المطهر نفسه (Milios *et al.*, 2014; Antic *et al.*, 2021; Codex Alimentarius, 2022).

قد يكون ارتفاع نسب الانخفاض المسجلة في مسار الرش اليدوي مرتبطاً بعدة عوامل محتملة، من بينها توجيه المطهر مباشرة إلى منطقة التطبيق، واختلاف كمية السائل المترسبة على السطح، وعدم تعرض المطهر الفوري لطبقة الماء الناتجة عن الغسيل الآلي. إلا أن الدراسة لم تقس بصورة مباشرة تجانس التغطية أو كمية المادة الفعالة المترسبة أو ضغط الرش ومعدل التدفق على مستوى الذبيحة، ولذلك تعد هذه العوامل تفسيرات محتملة مدعومة بالخصائص التشغيلية والأدبيات، وليست أسباباً مثبتة تجريبياً ضمن الدراسة الحالية. وفي المقابل، يعتمد الرش الآلي على متغيرات تشغيلية متعددة، مثل تصميم فوهات الرش، وضغط التشغيل، ومعدل التدفق، وسرعة مرور الذبائح، وهي عوامل قد تؤثر في انتظام توزيع المطهر وكمية المادة الفعالة التي تستقر على سطح الذبيحة، خاصة في خطوط الإنتاج ذات الكثافة التشغيلية المرتفعة (Roobab *et al.*, 2023; FAO/WHO, 2009).

كما يحتمل أن يكون انخفاض كفاءة الرش الآلي مرتبطاً بوجود طبقة من الماء المتبقي على سطح الذبيحة بعد مرحلة الغسيل، مما قد يؤدي إلى تخفيف المطهر عند ملامسته للسطح أو زيادة سرعة انسيابه، وبالتالي تقليل التركيز الفعلي للمادة الفعالة خلال فترة التلامس. ويزداد احتمال حدوث ذلك مع المطهرات المؤكسدة، مثل مطهر HOCl ومطهر H₂O₂، التي تعتمد كفاءتها على المحافظة على تركيز المادة الفعالة طوال فترة التلامس، في حين قد يؤدي التخفيف أو التفاعل السريع مع المواد العضوية إلى انخفاض قدرتها على إزالة التلوث (Roobab *et al.*, 2023; FDA, 2021).

وتشير النتائج أيضاً إلى أن الفروق بين الرش اليدوي والرش الآلي كانت أكثر وضوحاً خلال الدقائق الأولى من المعالجة، في حين انخفض تأثير التفاعل بين نوع المطهر وطريقة التطبيق مع زيادة زمن التلامس. وقد يعكس ذلك أن إطالة زمن التعرض أتاحت فرصة أكبر لاستمرار تأثير المطهرات بغض النظر عن طريقة تطبيقها، إلا أنها لم تكن كافية لإزالة الفروق الناجمة عن كفاءة إيصال المطهر إلى سطح الذبيحة. ويؤكد ذلك أن

طريقة التطبيق وزمن التلامس يمثلان عاملين متكاملين، وأن تحسين أحدهما لا يغني عن ضبط الآخر لتحقيق أعلى كفاءة للتطهير.

وتبرز هذه النتائج أهمية تصميم أنظمة الرش الآلي بما يضمن تحقيق تغطية متجانسة، ومعدل تدفق مناسب، وضغط رش ملائم، وزمن تلامس كافٍ، مع التحقق الدوري من وصول التركيز التشغيلي للمطهر إلى سطح الذبيحة، وليس الاكتفاء بقياس تركيزه داخل خزان التحضير. كما تشير إلى أن تحسين الأداء التشغيلي لوحدة الرش قد يكون ذا أثر لا يقل أهمية عن اختيار المطهر نفسه، وهو ما يدعم تبني نهج تكاملي يجمع بين اختيار المطهر المناسب، وضبط معايير التشغيل، والتحقق المستمر من كفاءة التطبيق في بيئات الذبح عالية الكثافة.

٤.٦. التحديات التشغيلية المؤثرة في كفاءة المطهرات داخل المجازر

أظهرت نتائج الدراسة أن كفاءة المطهرات لا ترتبط بنوع المادة الفعالة وحده، وإنما تتأثر بدرجة كبيرة بالظروف التشغيلية السائدة داخل المجازر، وهو ما قد يسهم في تفسير التفاوت في الاستجابة المرصودة رغم استخدام كل مطهر وفق التركيز التشغيلي المستهدف له. وتؤكد الأدبيات أن فعالية المطهرات الكيميائية في بيئات تصنيع اللحوم تمثل محصلة لتفاعل عدة عوامل تشمل الحمل العضوي، وطريقة التطبيق، وزمن التلامس، وخصائص سطح الذبيحة، ودرجة تغطية السطح بالمطهر، وليس لأي عامل منفرد (Milios *et al.*, 2014; Antic *et al.*, 2021; Roobab *et al.*, 2023).

ومن العوامل المحتملة ذات الأهمية في بيئة المسالخ الحمل العضوي الناتج عن الدم وبقايا الأنسجة والدهون على أسطح الذبائح. وتشير الأدبيات إلى أن هذه المواد قد تستهلك جزءاً من المادة الفعالة لبعض المطهرات، ولا سيما المطهرات المؤكسدة. إلا أن الحمل العضوي لم يقس كمياً في الدراسة الحالية، ولذلك يستخدم هذا العامل لتفسير النتائج في ضوء الأدبيات ولا يعد متغيراً مثبتاً بوصفه سبباً مباشراً للفروق المرصودة، إذ تستهلك هذه المواد جزءاً من المادة الفعالة قبل وصولها إلى الكائنات الدقيقة، مما يؤدي إلى انخفاض الكفاءة الفعلية لبعض المطهرات، ولا سيما المطهرات المؤكسدة. ويزداد تأثير هذا العامل في المجازر الموسمية التي تعمل بكثافة إنتاجية مرتفعة، حيث يصعب المحافظة على ظروف تشغيلية مثالية طوال فترة التشغيل (FAO/WHO, 2009; Roobab *et al.*, 2023).

كما يمثل قصر زمن التلامس أحد أهم التحديات التشغيلية، إذ تمر الذبائح بسرعة بين مراحل الغسيل والتجهيز، مما قد لا يتيح للمطهر الوقت الكافي لإتمام تفاعله مع الكائنات الدقيقة، خاصة بالنسبة

للمطهرات التي تعتمد كفاءتها على استمرار وجود المادة الفعالة خلال فترة التعرض. وتبين الأدبيات أن انخفاض زمن التلامس يعد من أكثر الأسباب شيوعاً لتراجع كفاءة المطهرات في التطبيقات الصناعية، حتى عند استخدام التركيزات الموصى بها (Codex Alimentarius Commission, 2022; FDA, 2021).

وتشير نتائج الدراسة أيضاً إلى أهمية طريقة التطبيق بوصفها أحد المحددات الرئيسة لكفاءة التطهير. فالاختلاف في انتظام توزيع المطهر، وكمية المادة الفعالة المترسبة على سطح الذبيحة، ودرجة تغطية مناطق التطبيق، قد يؤدي إلى تباين واضح في كفاءة إزالة التلوث. كما أن بقاء طبقة من الماء على سطح الذبيحة بعد الغسيل قد يسهم في تخفيف المطهر أو زيادة سرعة انسيابه من السطح، مما يقلل من التركيز الفعلي للمادة الفعالة خلال فترة التلامس، خاصة عند استخدام أنظمة الرش الآلي.

وتبدو هذه التحديات أكثر وضوحاً عند استخدام المطهر HOCl، إذ تعتمد كفاءته على المحافظة على تركيز الكلور الحر، والرقم الهيدروجيني المناسب، وزمن التلامس الكافي، كما يتأثر بسرعة بتفاعله مع المواد العضوية، مما يؤدي إلى انخفاض كمية المادة الفعالة المتاحة لإزالة التلوث إذا لم تضبط هذه العوامل بعناية (FDA, 2021; FAO/WHO, 2009; Roobab *et al.*, 2023).

أما مطهر H_2O_2 ، فتشير نتائج الدراسة إلى أن محدودية كفاءته النسبية قد تكون مرتبطة بطبيعته الكيميائية وظروف التشغيل، إذ إن فعاليته تعتمد على استمرار نشاط أنواع الأكسجين التفاعلية، التي قد تتعرض للاستهلاك في البيئات الغنية بالمواد العضوية، كما يسهم وجود إنزيم الكاتالاز CAT في الدم والأنسجة في تسريع تحلل المطهر إلى ماء وأكسجين، مما يقلل من مدة بقائه على سطح الذبيحة. كما تشير الأدبيات كذلك إلى أن كفاءة المطهر H_2O_2 تتحسن عند استخدامه ضمن أنظمة تطهير متكاملة أو عند دمجه مع الأحماض البيروكسكية (Peroxy Acids)، وتشمل حمض البيروأسيستيك PAA، وحمض البيروفورميك PFA، وحمض البيروكسي بروبيونيك PPA، مقارنة باستخدامه منفرداً في البيئات ذات الحمل العضوي المرتفع (Walsh *et al.*, 2018).

وتؤكد هذه النتائج أن نجاح برامج إزالة التلوث في المجازر لا يعتمد على اختيار المطهر المناسب فقط، وإنما يتطلب إدارة متكاملة للعوامل التشغيلية التي تؤثر في كفاءة التطبيق، بما يشمل ضبط التركيز التشغيلي، والتحقق من وصول المطهر إلى سطح الذبيحة بالتركيز المطلوب، وتحسين تغطية الرش، وتوفير زمن تلامس كافٍ، والحد من تأثير الحمل العضوي قدر الإمكان. ومن ثم، فإن تطوير إجراءات التشغيل القياسية (SOPs) بما يراعي هذه العوامل قد يسهم في رفع كفاءة برامج التطهير وتحسين مستوى سلامة اللحوم في المجازر عالية الكثافة.

٥.٦. دلالات استخدام تقنية ATP وحدودها في تقييم التغير في التلوث السطحي

أظهرت نتائج الدراسة أن تقنية ATP وفرت وسيلة سريعة وحساسة لرصد التغير في مستوى التلوث السطحي على أسطح الذبائح بعد تطبيق المطهرات، حيث أمكن من خلالها متابعة الاستجابة المباشرة لعمليات التطهير ومقارنة كفاءة المطهرات المختلفة وطرائق تطبيقها تحت الظروف التشغيلية الفعلية. وتعكس هذه النتيجة الأهمية المتزايدة لتقنية ATP بوصفها أداة للتحقق السريع من كفاءة إجراءات النظافة والتطهير في منشآت تصنيع الأغذية، إذ تمتاز بسرعة الحصول على النتائج وإمكانية استخدامها ميدانياً لاتخاذ قرارات تشغيلية فورية، وهو ما أكدته العديد من الدراسات الحديثة (Mendes *et al.*, 2025; Shama and Malik, 2013).

ورغم المزايا التشغيلية لتقنية ATP، فإن نتائج الدراسة تؤكد ضرورة تفسير قراءاتها في إطار حدودها المنهجية. فقياسات ATP على أسطح الذبائح لا تعكس الحمل الميكروبي وحده، وإنما تمثل إجمالي المواد الحيوية المحتوية على ATP، بما في ذلك الخلايا الميكروبية وبقايا الدم والأنسجة والسوائل الحيوية والمواد العضوية الأخرى. ولذلك، فإن انخفاض قراءات ATP بعد المعالجة يشير إلى تحسن مستوى النظافة السطحية وانخفاض المحتوى الحيوي الكلي، إلا أنه لا يمكن اعتباره دليلاً مباشراً على مقدار الانخفاض في أعداد الكائنات الدقيقة القابلة للحياة (Mendes *et al.*, 2025).

وتتفق هذه النتيجة مع ما أشارت إليه الأدبيات من أن العلاقة بين قراءات ATP ونتائج العد الهوائي للمستعمرات APC ليست علاقة ثابتة أو خطية في جميع الظروف، خاصة عند تقييم أسطح اللحوم الطازجة، حيث تؤثر طبيعة السطح وكمية المواد العضوية ومرحلة المعالجة في قيمة قراءة ATP بصورة قد لا تعكس التغير الحقيقي في الحمل الميكروبي. ولذلك توصي الدراسات باستخدام ATP بوصفه مؤشراً تشغيلياً سريعاً للتحقق من مستوى النظافة، مع الاعتماد على الطرق الميكروبية المرجعية للتحقق من كفاءة إزالة الكائنات الدقيقة (Mendes *et al.*, 2025; Shama and Malik, 2013).

وتبرز أهمية هذا النهج بصورة خاصة في المجازر ذات الكثافة التشغيلية العالية، حيث تتطلب برامج سلامة الغذاء أدوات سريعة لدعم اتخاذ القرار أثناء التشغيل، دون الاستغناء عن وسائل التحقق الميكروبية المرجعية. ومن ثم، فإن الجمع بين تقنية ATP وطريقة APC يمثل نهجاً تكاملياً يجمع بين سرعة التقييم الميداني ودقة التحقق المختبري، ويعزز من قدرة برامج مراقبة النظافة والتطهير على تقييم الأداء التشغيلي

واكتشاف أوجه القصور بصورة مبكرة، وهو ما يتوافق مع الاتجاهات الحديثة في أنظمة إدارة سلامة الغذاء (Mendes *et al.*, 2025).

وتشير النتائج مجتمعة إلى أن تقنية ATP لا ينبغي النظر إليها بوصفها بديلاً عن الفحوص الميكروبية التقليدية، وإنما بوصفها أداة مكملتها، حيث تسهم في التقييم السريع لفعالية إجراءات التطهير، بينما توفر اختبارات APC الدليل الميكروبي اللازم للتحقق من كفاءة خفض الحمل الميكروبي. ويعزز هذا التكامل من موثوقية برامج التحقق من النظافة، ويدعم تطوير أنظمة رقابية أكثر كفاءة وملاءمة للظروف التشغيلية في المجازر الموسمية عالية الإنتاجية.

٦.٦. دلالة الخصائص التشغيلية لوحادات الغسيل والتطهير في كفاءة تطبيق المطهرات

تشير نتائج الدراسة إلى أن الخصائص التشغيلية لوحادات الغسيل والتطهير تمثل أحد العوامل المؤثرة في كفاءة تطبيق المطهرات على أسطح الذبائح، إذ أظهرت اختلافاً في طول وحدات المعالجة، وزمن مرور الذبيحة، وكمية الماء العالقة على سطحها بعد المعالجة. وتؤكد الأدبيات أن كفاءة إزالة التلوث في المسالخ لا تعتمد على نوع المطهر أو تركيزه فحسب، وإنما تتأثر أيضاً بالظروف التشغيلية التي تحدد مقدار تعرض سطح الذبيحة للمطهر، وكمية المادة الفعالة التي تصل إلى السطح، ومدى استمرارها خلال فترة التلامس (Milios *et al.*, 2014; Antic *et al.*, 2021; Codex Alimentarius Commission, 2022).

وتوضح النتائج أن اختلاف زمن مرور الذبيحة داخل وحدات الغسيل والتطهير لا يعكس بالضرورة اختلافاً في زمن التلامس الفعلي مع المطهر، إلا أنه يمثل مؤشراً على اختلاف ظروف التشغيل بين المجازر. وقد بينت الدراسات أن إطالة زمن التعرض للمطهر ضمن الحدود التشغيلية المناسبة تسهم في تحسين كفاءة إزالة التلوث، في حين قد يؤدي قصر زمن التعرض إلى الحد من الاستفادة الكاملة من فعالية المطهر، خصوصاً عند استخدام المطهرات التي تعتمد على التفاعل الكيميائي المباشر مع الخلايا الميكروبية (Roobab *et al.*, 2023; FDA, 2021).

كما أظهرت الدراسة تبايناً في كمية الماء العالقة على سطح الذبيحة بعد المعالجة، وهو متغير تشغيلي يحظى باهتمام محدود في الدراسات المنشورة رغم أهميته العملية. فكمية الماء المتبقية على سطح الذبيحة قد تؤثر في تركيز المطهر الفعلي عند التطبيق، وفي درجة تغطيته للسطح، واستمراره خلال فترة التلامس، وهي عوامل ترتبط بكفاءة إزالة التلوث. وفي المقابل، فإن انخفاض كمية الماء العالقة قد يعكس سرعة تصريف السائل من سطح الذبيحة أو اختلاف ظروف الرش، الأمر الذي قد يؤثر في كمية المادة الفعالة المتاحة للتفاعل مع

الكائنات الدقيقة. إلا أن تحديد اتجاه هذا التأثير ومقداره يتطلب دراسة تجريبية تضبط كمية الماء وتركيز المطهر بصورة مستقلة، وتقيس التركيز الفعلي للمادة الفعالة على سطح الذبيحة إلى جانب مؤشرات ATP والعد الميكروبي المباشر، ولذلك لا يمكن الاستدلال على أثر كمية الماء من القياسات الحالية وحده، ولا يمكن الاستدلال عليه من كمية الماء وحدها.

وتبرز مجزرة المعيصم (١) بوصفها حالة تشغيلية مختلفة عن بقية المجازر، حيث تنفذ عمليتا الغسيل والتطهير في وحدتين منفصلتين يفصل بينهما انتقال الذبيحة على السير الناقل، في حين تنفذ المرحلتان داخل وحدة واحدة في بقية المجازر. ويشير هذا الاختلاف إلى وجود تباين في آلية التطبيق قد ينعكس على كمية الماء المتبقية على سطح الذبيحة قبل مرحلة التطهير، ومن ثم على ظروف تعرض السطح للمطهر. وتبرز أهمية هذه الملاحظة عند تفسير نتائج فعالية المطهرات، إلا أن الدراسة الحالية لم تقس بصورة مباشرة تركيز المطهر على سطح الذبيحة بعد الرش أو معدل تصريفه، ولذلك يقتصر الاستدلال على بيان الاختلاف في الخصائص التشغيلية دون الجزم بأثره المباشر.

وتؤكد هذه النتائج أهمية مراعاة الخصائص التشغيلية عند تصميم برامج التطهير في المجازر، إذ إن تحسين كفاءة المطهرات لا يقتصر على اختيار المادة الفعالة المناسبة، بل يتطلب أيضاً ضبط معايير التشغيل، بما يشمل تصميم وحدات الغسيل والتطهير، وزمن مرور الذبائح، وآلية الرش، بما يحقق أفضل استفادة من المطهر تحت ظروف التشغيل الفعلية. كما تشير النتائج إلى أن كمية الماء العالقة على سطح الذبيحة يمكن أن تمثل مؤشراً تشغيلياً واعداً لتقييم أداء وحدات الغسيل والتطهير، وهو جانب لم يحظ باهتمام كافٍ في الأدبيات، ويستحق مزيداً من الدراسة لبحث علاقته بكفاءة إزالة التلوث وسلامة اللحوم.

٧.٦. محددات الدراسة

ينبغي تفسير نتائج الدراسة في ضوء عدد من المحددات المنهجية. أولاً، اعتمدت النتائج بصورة رئيسة على تقنية ATP التي تقيس إجمالي المحتوى الحيوي السطحي ولا تعد قياساً مباشراً للكائنات الدقيقة القابلة للحياة. ثانياً، ارتبط نوع المطهر بالمجزرة التي استخدم فيها، مما يحد من إمكانية فصل أثر المطهر عن أثر الموقع وخصائص الوحدة التشغيلية. ثالثاً، كان عدد الذبائح في كل مجموعة محدوداً، بما يقلل من قوة التعميم خارج المواقع والظروف محل الدراسة. رابعاً، لم تتضمن الدراسة مجموعة موازية للغسيل بالماء فقط دون مطهر، ولذلك لا يمكن تحديد المقدار المستقل للخفض المرتبط بالمطهر في مسار الغسيل والرش الآلي. خامساً، لم يقس التركيز الفعلي للمطهر على سطح الذبيحة أو الحمل العضوي أو معدل التدفق

وتجانس التغطية بصورة كمية، وهي متغيرات قد تؤثر في كفاءة المعالجة. وأخيراً، لم تتضمن النتائج الحالية تحققاً مباشراً باستخدام العد الميكروبي، ولذلك ينبغي اعتبار النتائج مؤشرات تشغيلية ميدانية تحتاج إلى التحقق الميكروبي قبل استخدامها أساساً للمفاضلة النهائية بين المطهرات

٧. الخلاصة

أظهرت الدراسة انخفاضاً في قراءات الأدينوسين ثلاثي الفوسفات (ATP) بعد تطبيق المطهرات محل الدراسة مقارنة بالقراءات المرجعية السابقة للمعالجة، مع استمرار الانخفاض عند القياسات المجراة بعد ٥ و ١٠ و ١٥ دقيقة. وسجلت مجموعات PHMG أعلى متوسطات عددية للانخفاض في قراءات ATP، تلتها مجموعات HOCl ثم H₂O₂، كما سجل مسار التطبيق المباشر بالرش اليدوي نسب انخفاض أعلى من مسار الغسيل والرش الآلي.

وتشير النتائج كذلك إلى وجود اختلافات تشغيلية بين المجازر في تصميم وحدات الغسيل والتطهير، وزمن مرور الذبائح، وكمية السائل العالق على أسطحها، وهي متغيرات ينبغي مراعاتها عند تفسير الفروق المرصودة. ولا تسمح الدراسة الحالية بفصل أثر نوع المطهر بصورة كاملة عن أثر الموقع، نظراً إلى ارتباط كل مطهر بالمجزرة أو المجازر التي استخدم فيها، كما أن الاختلاف بين مساري التطبيق يشمل متغيرات تشغيلية أخرى إلى جانب وسيلة الرش.

كما تقتصر النتائج الحالية على التغير في مؤشرات ATP، التي تعكس المحتوى الحيوي السطحي ولا تمثل قياساً مباشراً لأعداد الكائنات الدقيقة القابلة للحياة. ولذلك لا يمكن اعتبار نسب الانخفاض في ATP نسباً مكافئة للخفض الميكروبي، أو استخدامها منفردة للحكم النهائي على المطهر الأكثر كفاءة. وتوفر الدراسة، رغم هذه الحدود، بيانات ميدانية مهمة من بيئة تشغيل موسمية عالية الكثافة، وتبرز أهمية ضبط ظروف التطبيق وقياس التركيز الفعلي للمطهر وإجراء تحقق ميكروبيولوجي مباشر عند تطوير برامج الغسيل والتطهير في مجازر مشروع أضاحي.

٨. التوصيات

تشير نتائج الدراسة إلى أن رفع كفاءة عمليات الغسيل والتطهير في المجازر يتطلب تبني نهج تشغيلي متكامل يجمع بين توحيد إجراءات التطبيق، وضبط تركيز وكمية المطهر، والتحقق من كفاءة المعالجة، ومراعاة المتغيرات التشغيلية المؤثرة. وفي ضوء ذلك، توصي الدراسة بما يلي:

- (١) إعداد دليل تشغيلي موحد لوحادات الغسيل والتطهير بمجازر مشروع أضاحي، يحدد متطلبات تحضير المطهرات وتخفيفها، وآليات التطبيق والرش، ومعدل التدفق والتغطية، وزمن المعالجة، مع مراعاة تصميم الوحدات وزمن مرور الذبائح، بما يحد من التباين التشغيلي بين المجازر ويعزز ثبات كفاءة المعالجة.
- (٢) التحقق من دقة تحضير وتخفيف المطهرات، وضبط تركيز وكمية محلول التطهير المطبقة لكل ذبيحة عند نقطة الاستخدام، مع مراعاة كمية مياه الغسيل المتبقية على سطح الذبيحة وما قد يترتب عليها من تخفيف للمطهر، بما يضمن تحقيق التركيز والجرعة التشغيلية المستهدفة وتجانس التغطية.
- (٣) تطبيق برنامج للتحقق الدوري من أداء عمليات الغسيل والتطهير يجمع بين المؤشرات السريعة مثل ATP والاختبارات الميكروبية المرجعية، مع قياس التركيز الفعلي للمطهر عند نقطة الاستخدام، بما يدعم تقييم كفاءة المعالجة والكشف المبكر عن أي انحرافات تشغيلية.
- (٤) استكمال الدراسات التجريبية لقياس العلاقة بين كمية الماء العالقة على سطح الذبيحة، والتركيز الفعلي للمطهر، والكمية التطبيقية، وكفاءة خفض الميكروبي، والاستفادة من نتائجها في تطوير المواصفات والبروتوكولات التشغيلية للمجازر عالية الكثافة، على أن تستند المفاضلة النهائية بين المطهرات إلى التحقق الميكروبي والمتطلبات التنظيمية ذات الصلة.

٩. الدراسات المستقبلية

في ضوء نتائج الدراسة الحالية وحدودها المنهجية، ينبغي أن تركز الدراسات المستقبلية على الفجوات البحثية التي تتطلب تحققاً علمياً إضافياً، مع فصلها عن الإجراءات التشغيلية والتطبيقية التي تناولتها التوصيات السابقة. وعليه، تقترح الدراسة المحاور البحثية الآتية:

- (١) إجراء دراسة مقارنة تقيس التلوث السطحي للذبائح قبل تطبيق المطهرات وبعدها باستخدام كل من تقنية الأدينوسين ثلاثي الفوسفات (ATP) والعد الهوائي للمستعمرات الميكروبية (APC)، بهدف التحقق من مقدار الخفض في الحمل الميكروبي القابل للحياة، ودراسة العلاقة بين نتائج الطريقتين، وتحديد مدى صلاحية ATP كمؤشر سريع للتحقق التشغيلي من مستوى التلوث السطحي.
- (٢) إجراء تجربة مضبوطة تتضمن مجموعة تخضع للغسيل بالماء فقط دون مطهر، إلى جانب مجموعات المعالجة بالمطهرات تحت ظروف تشغيلية متماثلة، بهدف تقدير مقدار الانخفاض الناتج عن الإزالة الفيزيائية أثناء الغسيل، وتحديد الأثر الإضافي الذي يمكن نسبه إلى تطبيق المطهر.

(٣) إجراء دراسة متعددة المواقع يطبق فيها كل مطهر في أكثر من مجزرة، وفق تصميم تجريبي موحد أو تبادلي قدر الإمكان، بما يسمح بفصل أثر نوع المطهر عن تأثير خصائص الموقع وتصميم وحدات الغسيل والتطهير، وتحسين دقة المقارنة بين المطهرات وقابلية تعميم النتائج.

(٤) إجراء دراسة تجريبية مضبوطة لتحديد العلاقة بين المتغيرات المؤثرة في وصول المطهر إلى سطح الذبيحة وفعاليتها، وبخاصة كمية الماء العالقة بعد الغسيل، والتركيز الفعلي للمادة المطهرة على السطح، وكمية المحلول المطبقة، ومعدل التدفق، وتجانس التغطية، والحمل العضوي، مع ربط هذه المتغيرات بمؤشرات ATP والقياسات الميكروبية المباشرة، بهدف تحديد الظروف التشغيلية المثلى لكل مطهر على أسس تجريبية.

المراجع

المراجع العربية

معهد خادم الحرمين الشريفين لأبحاث الحج والعمرة. (١٤٣٩هـ). أعمال مسالخ مكة المكرمة خلال موسم الحج: وصف الوضع الراهن. مكة المكرمة: جامعة أم القرى.

References

- Ahmed, A.H. and Al-Mahmood, O.A. (2023). Food Safety Programs that Should be Implemented in Slaughterhouses: Review. *Journal of Applied Veterinary Sciences*, 8(1).
- Aider, M., Gnatko, E., Benali, M., Plutakhin, G. and Kastyuchik, A. (2012). Electro-activated aqueous solutions: theory and application in the food industry and biotechnology. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 15, 38–49.
- Algino, R.J., Badtram, G.A., Ingham, B.H. and Ingham, S.C. (2007). Evaluation of carcass decontamination interventions in very small beef slaughter establishments. *Journal of Food Protection*, 70(4), 1009–1013.

- Alonso-Hernando, A., Alonso-Calleja, C. and Capita, R. (2013).** Effectiveness of several chemical decontamination treatments against Gram-negative bacteria on poultry during storage under different simulated cold chain disruptions. *Food Control*, 34(2), 574–580.
- Antic, D., Houf, K., Michalopoulou, E. and Blagojevic, B. (2021).** Beef abattoir interventions in a risk-based meat safety assurance system. *Meat Science*, 182, 108622
- Asiedu-Gyekye, I.J., Mahmood, S.A., Awortwe, C. and Nyarko, A.K. (2014).** A preliminary safety evaluation of polyhexamethylene guanidine hydrochloride. *International Journal of Toxicology*, 33(6), 523–531.
- Bacon, R.T., Belk, K.E., Sofos, J.N., Clayton, R.P., Reagan, J.O. and Smith, G.C. (2000).** Microbial populations on animal hides and beef carcasses at different stages of slaughter in plants employing multiple-sequential interventions for decontamination. *Journal of Food Protection*, 63(8), 1080–1086.
- Bautista, D.A., Vaillancourt, J.P., Clarke, R.A., Renwick, S. and Griffiths, M.W. (1995).** Rapid assessment of the microbiological quality of poultry carcasses using ATP bioluminescence. *Journal of Food Protection*, 58(5), 551–554.
- Bello, M., Lawan, M.K., Kwaga, J.K.P. and Raji, M.A. (2011).** Assessment of carcass contamination with *E. coli* O157 before and after washing with water at abattoirs in Nigeria. *International Journal of Food Microbiology*, 150(2–3), 184–186.
- Bolton, D.J., Pearce, R.A., Sheridan, J.J., Blair, I.S., McDowell, D.A. and Harrington, D. (2001).** Washing and decontamination of beef carcasses as a means of reducing bacterial contamination: a review. *Food Control*, 12(5), 257–267.
- Burfoot, D., Allen, V., Mulvey, E., Jewell, K., Harrison, D. and Morris, V. (2015).** Reducing *Campylobacter* numbers on chicken carcasses using lactic acid in processing plants. *International Journal of Food Science and Technology*, 50, 2451–

- Cadena, M., Kelman, T., Marco, M.L. and Pitesky, M. (2019).** Understanding antimicrobial resistance (AMR) profiles of *Salmonella* biofilm and planktonic bacteria challenged with disinfectants commonly used during poultry processing. *Foods*, 8(7), p.275
- Callaway, T.R., Edrington, T.S., Anderson, R.C., Genovese, K.J., Poole, T.L., Jung, Y.S., Bischoff, K.M., Nisbet, D.J. and Harvey, R.B. (2013).** Pre-harvest interventions to reduce foodborne pathogens in cattle. *Journal of Animal Science*, 91(4), 1605–1617.
- Carpenter, C.E., Broadbent, J.R. and Clarke, A.D. (2011).** Organic acid decontamination treatments for meat surfaces and residual antimicrobial activity. *Journal of Food Protection*, 74.
- Codex Alimentarius Commission (2022).** *General Principles of Food Hygiene (CXC 1-1969)*. Latest revision. Rome: FAO/WHO.
- Cutter, C.N. and Siragusa, G.R. (1994).** Efficacy of organic acid interventions on beef carcasses. *Journal of Food Protection*, 57.
- de Assis, D.C.S., da Silva, T.M.L., Brito, R.F., da Silva, L.C.G., Lima, W.G. and Brito, J.C.M. (2021).** Shiga toxin-producing *Escherichia coli* (STEC) in bovine meat and meat products over the last 15 years in Brazil: A systematic review and meta-analysis. *Meat Science*, 173, 108394.
- Dickens, J.A. and Whittemore, A.D. (1997).** Effects of acetic acid and hydrogen peroxide application during defeathering on the microbiological quality of broiler carcasses prior to evisceration. *Poultry Science*, 76(4), 657–660.
- Dickson, J.S. (1994).** Methods for reducing microbial contamination on carcass surfaces. *Journal of Food Protection*, 57(5), 430–435.
- Dickson, J.S. and Acuff, G.R. (2017).** Maintaining the safety and quality of beef carcass meat. In: *Ensuring Safety and Quality in the Production of Beef, Volume 1: Safety*. Cambridge: Burleigh Dodds Science Publishing, 145–167.

- Dickson, J.S. and Anderson, M.E. (1992).** Microbiological decontamination of food animal carcasses by washing and sanitizing systems: a review. *Journal of Food Protection*, 55(2), pp.133–140.
- Dixon, E., Rabanser, I., Dzieciol, M., Zwirzitz, B., Wagner, M., Mann, E. (2019).** Reduction potential of steam vacuum and high-pressure water treatment on microbes during beef meat processing. *Food Control*, 106, 106728.
- Dorsa, W.J. (1997).** New and established carcass decontamination procedures commonly used in the beef-processing industry. *Proceedings of the Reciprocal Meat Conference*, 50, 73–78.
- Dorsa, W.J., Cutter, C.N. and Siragusa, G.R. (1997).** Effects of acetic acid, lactic acid and trisodium phosphate on the microflora of refrigerated beef carcass surface tissue inoculated with *Escherichia coli* O157, *Listeria innocua*, and *Clostridium sporogenes*. *Journal of Food Protection*. 60(6), 619–624.
- Du, S., Zhang, Z., Xiao, L., Lou, Y., Pan, Y. and Zhao, Y. (2016).** Acidic electrolyzed water as a novel transmitting medium for high hydrostatic pressure reduction of bacterial loads on shelled fresh shrimp. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1–12.
- Dubal, Z.B., Paturkar, A.M., Waskar, V.S., Zende, R.J., Latha, C., Rawool, D.B. and Kadam, M.M. (2004).** Effect of food grade organic acids on inoculated *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* and *Salmonella typhimurium* in sheep/goat meat stored at refrigeration temperature. *Meat Science*. 66(4), 817–821.
- Endersen, L. and Coffey, A. (2020).** The use of bacteriophages for food safety. *Foods*, 9(1), 10.
- European Commission (2013).** Commission Regulation (EU) No 101/2013 concerning the use of lactic acid to reduce microbiological surface contamination on bovine carcasses. *Official Journal of the European Union*, L34, 1–3.

European Food Safety Authority (EFSA) (2010). Scientific Opinion on the safety and efficacy of recycled hot water for decontamination of carcasses. *EFSA Journal*, 8.

European Food Safety Authority (EFSA) and European Centre for Disease Prevention and Control (ECDC) (2024). The European Union One Health Zoonoses Report 2023. *EFSA Journal*.

European Food Safety Authority (EFSA) BIOHAZ Panel (2011). Scientific Opinion on the evaluation of the safety and efficacy of lactic acid for reduction of microbiological surface contamination on bovine carcasses. *EFSA Journal*, 9(7), 2317.

Fathul Karamah, E. and Wajdi, N. (2018). Application of ozonated water to maintain the quality of chicken meat: effect of exposure time, temperature, and ozone concentration. *E3S Web of Conferences*, 67, 04044.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and World Health Organization (WHO) (2009). *Benefits and Risks of the Use of Chlorine-containing Disinfectants in Food Production and Food Processing*. Rome: FAO/WHO.

Food and Drug Administration (FDA) (2021). *Secondary Direct Food Additives Permitted in Food for Human Consumption*. Code of Federal Regulations, Title 21, Part 173. Silver Spring, MD: U.S. Food and Drug Administration.

Garrido-Maestu, A., Fuciños, P., Azinheiro, S., Carvalho, C., Carvalho, J. and Prado, M. (2019). Specific detection of viable *Salmonella Enteritidis* by phage amplification combined with qPCR (PAA-qPCR) in spiked chicken meat samples. *Food Control*, 99, 79–83.

Gil, M.I., Marín, A., Andujar, S. and Allende, A. (2016). Should chlorate residues be of concern in fresh-cut salads? *Food Control*, 60, 416–421.

Gill, C.O. (2009). Improving slaughter hygiene and carcass interventions. *Meat Science*, 82(4), 395–404.

Gill, C.O. and Landers, C. (2003). Microbiological effects of carcass decontaminating treatments at four beef packing plants. *Meat Science*, 65(3), 1005–1011.

- Hamidi, A.A., Zarei, M., Khorvash, M. and Mahmoudi, R. (2021).** Combined antimicrobial effects of neutral electrolyzed water and peracetic acid against foodborne pathogens on meat surfaces. *Food Control*, 125, Article 107987.
- Hassan, F., Lakshmanan, P.T., Geethalakshmi, V. and Mukundan, M.K. (2013).** Evaluation of stabilised hydrogen peroxide as sanitiser in seafood processing industry. *Indian Journal of Fisheries*, 60(2), 145–149.
- Heir, E., Solberg, L.E., Jensen, M.R., Skaret, J., Grøvlen, M.S. and Holck, A.L. (2022).** Improved microbial and sensory quality of chicken meat by treatment with lactic acid, organic acid salts and modified atmosphere packaging. *International Journal of Food Microbiology*, 362, 109498.
- Helal, I.M., Megahed, A.A. and Galab, M.F. (2014).** Influence of immersion treatment with hydrogen peroxide to minimize microbial load of slaughtered chickens in Port-Said Governorate. *Food Safety Science*, 1, 66–73.
- Hewage, S.N., Makawita, P., Gibson, K.E., Lee, J.A. and Fraser, A.M. (2022).** Relationship between ATP bioluminescence measurements and microbial assessments in studies conducted in food establishments: A systematic literature review and meta-analysis. *Journal of Food Protection*, 85(12), 1855–1864.
- Inguglia, E.S., Oliveira, M., Burgess, C.M., Kerry, J.P. and Tiwari, B.K. (2020).** Plasma-activated water as an alternative nitrite source for the curing of beef jerky: influence on quality and inactivation of *Listeria innocua*. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 59, 102276.
- Iram, A., Wang, X. and Demirci, A. (2021).** Electrolyzed oxidizing water and its applications as sanitation and cleaning agent. *Food Engineering Reviews*, 13, 411–427.
- Jolley, J., Kiermeier, A. and Sumner, J. (2023).** Microbiological quality of Australian beef, sheep and pork carcasses, cuts and offals. *Foods*, 12(20), 3832.

- Kaehn, K. (2010).** Polyhexanide: a safe and highly effective biocide. *Skin Pharmacology and Physiology*, 23(Suppl. 1): 7–16.
- Kalchayanand, N., Bosilevac, J.M., Wheeler, T.L. and Koohmaraie, M. (2009).** Hot water intervention technologies for carcass decontamination. *Journal of Food Protection*, 72.
- Kalchayanand, N., Worlie, D. and Wheeler, T. (2019).** A novel aqueous ozone treatment as a spray chill intervention against *E. coli* O157 on surfaces of fresh beef. *Journal of Food Protection*, 82, p.1878.
- Kanaan, M.H.G. (2018).** Antibacterial effect of ozonated water against methicillin-resistant *S. aureus* contaminating chicken meat in Wasit Province, Iraq. *Veterinary World*, 11, 1445–1453.
- Kang, D.H., Koohmaraie, M., Dorsa, W.J. and Siragusa, G.R. (2001).** Development of a multiple-step process for the microbial decontamination of beef trim. *Journal of Food Protection*, 64(1), 63–71.
- Kartikawati, D., Lee, N.Y. and Lee, H.J. (2023).** Effect of slightly acidic electrolyzed water treatments on microbial quality and shelf life of chilled chicken meat. *Poultry Science*, 102(5), Article 102635.
- Kocharunchitt, C., Mellefont, L., Bowman, J.P. and Ross, T. (2020).** Application of chlorine dioxide and peroxyacetic acid during spray chilling as a potential antimicrobial intervention for beef carcasses. *Food Microbiology*, 87, 103355.
- Koffi-Nevry, R., Koussemon, M., Aboua, F. and Wognin, A.S. (2011).** Antifungal activity of polyhexamethylene guanidine hydrochloride against fungi associated with papaya fruit spoilage. *African Journal of Microbiology Research*, 5(23), 4162–4167.
- Latha, C., Sherikar, A.T., Waskar, V.S., Dubal, Z.B. and Ahmed, S.N. (2009).** Sanitizing effect of salts on experimentally inoculated organisms on pork carcasses. *Meat Science*, 83(4), 796–799.

- Lenahan, M., O'Brien, S.B., Kinsella, K., Sweeney, T. and Sheridan, J.J. (2010).** Assessment of lamb carcass hygiene before and after chilling at five Irish abattoirs. *Food Control*. 21(3), 313–318.
- Liao, X., Su, Y., Liu, D., Chen, S., Hu, Y., Ye, X. (2018).** Application of atmospheric cold plasma-activated water (PAW) ice for preservation of shrimps (*Metapenaeus ensis*). *Food Control*, 94, 307–314.
- Loretz, M., Stephan, R. and Zweifel, C. (2010).** Antimicrobial activity of decontamination treatments for poultry carcasses: a literature survey. *Food Control*, 21(6), 791–804.
- Mani-López, E., García, H.S. and López-Malo, A. (2012).** Organic acids as antimicrobials to control *Salmonella* in meat and poultry products. *Food Research International*. 45(2), 713–721.
- Manzoor, A., Jaspal, M.H., Yaqub, T., Ahmad, S., Imran, M. and Hussain, S. (2020).** Effect of lactic acid spray on microbial and quality parameters of buffalo meat. *Meat Science*. 159, p.107923.
- Mathurin, K., Koffi-Nevry, R., Guiraud, J.P. and Tano, K. (2012).** Antifungal activity of polyhexamethylene guanidine hydrochloride against fungal isolates from cocoa beans. *Research Journal of Microbiology*, 7(3), 153–161.
- McEvoy, J.M., Doherty, A.M., Finnerty, M., Sheridan, J.J., McGuire, L., Blair, I.S., McDowell, D.A. and Harrington, D. (2000).** The relationship between hide cleanliness and bacterial numbers on beef carcasses at a commercial abattoir. *Letters in Applied Microbiology*. 30(5), 390–395.
- Mendes, A., Carvalho, C., Viviani, V. and Bechara, E. (2025).** Development and validation of an ATP-based swab method for rapid detection of microbiological contamination in meat, chicken, and milk. *Chemosensors*, 13(2), 27.

- Milios, K., Drosinos, E.H. and Zoiopoulos, P.E. (2014).** Carcass decontamination methods in slaughterhouses: a review. *Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society*, 65(4), 291–312.
- Moazzami, M., Bergenkvist, E., Boqvist, S., Frosth, S., Langsrud, S., Møretro, T., Vågsholm, I. and Hansson, I. (2023).** Assessment of ATP-bioluminescence and dipslide sampling to determine the efficacy of slaughterhouse cleaning and disinfection compared with total aerobic and Enterobacterales counts. *Journal of Food Protection*, 86(10), 100155.
- Moghassem Hamidi, R., Shekarforoush, S.S., Hosseinzadeh, S. and Basiri, S. (2021).** Evaluation of the effect of neutral electrolyzed water and peroxyacetic acid alone and in combination on microbiological, chemical, and sensory characteristics of poultry meat during refrigeration storage. *Food Science and Technology International*, 27, 499–507.
- Moshynets, O., Baranov, V., Iungin, O., Potters, G. and Rogalsky, S. (2022).** Polyhexamethylene guanidine suppresses extracellular DNA and inhibits biofilm formation on abiotic surfaces. *Frontiers in Microbiology*, 13, Article 946206.
- Moye, Z.D., Woolston, J. and Sulakvelidze, A. (2018).** Bacteriophage applications for food production and safety. *Viruses*, 10(4), 205.
- Murray, K., Wu, F., Shi, J., Xue, S. and Warriner, K. (2017).** Challenges in the microbiological food safety of fresh produce: limitations of post-harvest washing and the need for alternative interventions. *Food Quality and Safety*, 1, 289–301.
- Nkosi, D.V., Bekker, J.L. and Hoffman, L.C. (2021).** The use of organic acids (Lactic and acetic) as a microbial decontaminant during the slaughter of meat animal species: A review. *Foods*, 10(10), p.2293.
- Olmedo, G.M., Cerioni, L. and González, M.M. (2018).** Polyhexamethylene guanidine hydrochloride as an alternative postharvest treatment to control green mould caused by *Penicillium digitatum* in lemon fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 146, 128–134.

Oulé, M.K., Azinwi, R., Bernier, A.M., Kablan, T., Maupertuis, A.M., Mauler, S., Nevry, R.K., Dembélé, K. and Forbes, L. (2008). Polyhexamethylene guanidine hydrochloride-based disinfectant: a novel tool to fight meticillin-resistant *Staphylococcus aureus* and nosocomial infections. *Journal of Medical Microbiology*, 57(12), 1523–1528.

Phillips, D., Jordan, D., Morris, S., Jenson, I. and Sumner, J. (2006). A national survey of the microbiological quality of beef carcasses and frozen boneless beef in Australia. *Journal of Food Protection*. 69(5), 1113–1117.

Quan, Y., Choi, K.D., Chung, D. and Shin, I.S. (2017). Antimicrobial effect of strongly acidic electrolyzed water against *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* biofilms on stainless steel surfaces. *Food Control*, 73, 956–963.

Reagan, J.O., Acuff, G.R., Buege, D.R., Buyck, M.J., Dickson, J.S., Kastner, C.L., Marsden, J.L., Morgan, J.B., Nickelson, R. II, Smith, G.C. and Sofos, J.N. (1996). Trimming and washing of beef carcasses as a method of improving the microbiological quality of meat. *Journal of Food Protection*, 59(7), 751–756.

Ribeiro, C.M., Stefani, L.M., Lucheis, S.B., Okano, W., Cruz, J.C.M., Souza, G.V. (2018). Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* in poultry and poultry meat: A meta-analysis. *Journal of Food Protection*, 81, 1055–1062.

Roobab, U., Aadil, R.M., Madni, G.M., Bekhit, A.E.D. and others (2023). Principles and applications of electrolyzed water for microbial decontamination of meat and fresh produce: A review. *Food Science of Animal Resources*, 43, 1–29.

Roobab, U., Khan, A.W., Lorenzo, J.M., Arshad, R.N., Chen, B.R., Zeng, X.A. (2021). A systematic review of clean-label alternatives to synthetic additives in raw and processed meat with a special emphasis on high-pressure processing (2018–2021). *Food Research International*, 150, 110792.

Sá Júnior, P.L.S., Silva, L.J., Andrade, H.A., Maciel, M.I.S., Shinohara, N.K.S., Gloria, M.B.A. (2021). Optimization of mechanically separated meat washing cycles and of corn

starch addition in saramunete sausages. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45, e16093.

Sallam, K.I., Abd-Elghany, S.M., Hussein, M.A., Imre, K., Morar, A., Morshdy, A.E. (2020). Microbial decontamination of beef carcass surfaces by lactic acid, acetic acid, and trisodium phosphate sprays. *BioMed Research International*, 2020, 2314358.

Scientific Committee on Consumer Safety (SCCS). (2017). *Final Opinion on Polyaminopropyl Biguanide (PHMB) – Submission III.*

Shama, G. and Malik, D.J. (2013). The uses and abuses of rapid bioluminescence-based ATP assays. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 216(2), 115–125.

Sheng, L., Han, Y., Wang, L., Liu, Y. and Zhang, Q. (2018). Effects of slightly acidic electrolyzed water on microbial quality and shelf life of chilled beef. *LWT – Food Science and Technology*, 95, 274–280.

Sheridan, J.J. (1998). Prevention of carcass contamination in slaughterhouses. *International Journal of Food Microbiology*, 44.

Siragusa, G.R. (1995). Organic acid treatments for microbial reduction on beef carcasses. *Journal of Food Protection*, 58.

Smith, J., Corkran, S., McKee, S.R., Bilgili, S.F. and Singh, M. (2015). Evaluation of post-chill applications of antimicrobials against *Campylobacter jejuni* on poultry carcasses. *Journal of Applied Poultry Research*, 24, 451–456.

Sofos, J.N. (2008). Challenges to meat safety in the 21st century. *Meat Science*. 78(1–2), 3–13.

Sofos, J.N., Belk, K.E. and Smith, G.C. (1999). Processes to reduce contamination with pathogenic microorganisms in meat. In: *Proceedings of the 45th International Congress of Meat Science and Technology*. Yokohama, Japan, 596–605.

Stearns, R., Freshour, A. and Shen, C. (2022). Literature review for applying peroxyacetic acid and/or hydrogen peroxide to control foodborne pathogens on food products. *Journal of Agriculture and Food Research*, 10, 100442.

Stopforth, J.D., O'Connor, R., Lopes, M., Kottapalli, B. and Samadpour, M. (2007). Validation of antimicrobial interventions in poultry processing. *Journal of Food Protection*, 70.

Taylor, S.A.N., Bailey, E.M. and Rybak, M.J. (1993). Enterococcus, an emerging pathogen. *Annals of Pharmacotherapy*. 27(10), 1231–1242.

Tesson, V., Federighi, M., Cummins, E., de Oliveira Mota, J., Guillou, S. and Boué, G. (2020). A systematic review of beef meat quantitative microbial risk assessment models. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 17(3), p.688.

Thomas, K.M., de Glanville, W.A., Barker, G.C., Benschop, J., Buza, J.J., Cleaveland, S. (2020). Prevalence of *Campylobacter* and *Salmonella* in African food animals and meat: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Food Microbiology*, 315, 108382.

United States Department of Agriculture – Food Safety and Inspection Service (USDA-FSIS) (1996). *Pathogen Reduction; Hazard Analysis and Critical Control Point (HACCP) Systems; Final Rule*. Federal Register, 61(144), 38806–38989.

United States Department of Agriculture – Food Safety and Inspection Service (USDA-FSIS) (2021). *Safe and Suitable Ingredients Used in the Production of Meat, Poultry, and Egg Products*. Washington, DC.

United States Department of Agriculture – Food Safety and Inspection Service (USDA-FSIS) (2024). *HACCP Regulatory Guidance and Verification Activities*. Washington, DC.

United States Department of Agriculture – Food Safety and Inspection Service (USDA-FSIS) (2026). *Safe and Suitable Ingredients Used in the Production of Meat, Poultry, and Egg Products*. Washington, DC: USDA-FSIS.

USDA-FSIS (2019). *Related documents for FSIS Directive 7120.1: Safe and Suitable Ingredients Used in the Production of Meat, Poultry, and Egg Products.* Washington, DC: United States Department of Agriculture – Food Safety and Inspection Service. Available at: <https://www.fsis.usda.gov>

Veasey, S., Muriana, P.M. and Luchansky, J.B. (2016). Evaluation of antimicrobial interventions for reducing microbial contamination in food systems, including hypochlorous acid applications. *Foods*, 5(2): 42.

Vikram, A., Woolston, J. and Sulakvelidze, A. (2020). Bacteriophage biocontrol in foods. *Annual Review of Food Science and Technology*, 11, 313–339.

Walsh, R.J., White, B., Hunker, L., Leishman, O., Hilgren, J. and Klein, D. (2018). Peracetic acid and hydrogen peroxide post-dip decay kinetics on red meat and poultry. *Food Protection Trends*, 38, 96–103.

Wang, J., Han, R., Liao, X. and Ding, T. (2021). Application of plasma-activated water (PAW) for mitigating methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) on cooked chicken surface. *LWT*, 137, 110465.

Wang, J., Yu, Y. and Dong, Y. (2020). Disinfection of ready-to-eat lettuce using polyhexamethylene guanidine hydrochloride. *Microorganisms*, 8(2), Article 272.

Wang, J., Yu, Y., Dong, Y. and Zhang, X. (2022). Synergistic disinfection of ready-to-eat lettuce using polyhexamethylene guanidine hydrochloride combined with potassium

Yong, H.I., Park, J., Kim, H.J., Jung, S., Park, S., Lee, H.J. (2018). An innovative curing process with plasma-treated water for production of loin ham and for its quality and safety. *Plasma Processes and Polymers*, 15, 1–9.

Youn, S.Y., Jeong, O.M., Choi, B.K., Jung, S.C. and Kang, M.S. (2017). Comparison of the antimicrobial and sanitizer resistance of *Salmonella* isolates from chicken slaughter processes in Korea. *Journal of Food Science*, 82, 711–717.

Zhang, L., Wang, Z., Song, Y., Li, M. and Yu, Q. (2020). Quality of vacuum packaged beef as affected by aqueous ozone and sodium citrate treatment. *International Journal of Food Properties*, 23, 1475–1489.

Zhao, Y., Chen, R., Tian, E., Liu, D., Niu, J., Wang, W. (2020). Plasma-activated water treatment of fresh beef: bacterial inactivation and effects on quality attributes. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*, 4, 113–120.

المحقات



ملحق (١)

كمية المياه المستخدمة وحدة الغسيل والرش النهائي بالمطهر داخل صالات الذبح

المجزرة	رقم العينة	نوع الكمية	زمن المرور/ ثانية	وزن الشاش بعد الغسيل	كمية المياه المستخدمة	ملاحظات
معيصيم (٢)	عينة (١)	غسيل + تطهير	15	544.6	441.6	استخدم في القياس: عدد ٣ شاش
معيصيم (٢)	عينة (٢)	غسيل + تطهير	16	533.2	430.2	استخدم في القياس: عدد ٣ شاش
معيصيم (١)	(أ)	غسيل	14	485.4	382.4	استخدم في القياس: عدد ٣ شاش
معيصيم (١)	(ب)	غسيل	15	467.1	364.1	استخدم في القياس: عدد ٣ شاش
معيصيم (١)	عينة (٣)	تطهير	3	80.3	43.11	استخدم في القياس: عدد ١ شاش
معيصيم (١)	عينة (٤)	تطهير	4	90	52.81	استخدم في القياس: عدد ١ شاش
وحدة (هـ)	عينة (٥)	غسيل + تطهير	20	426.2	323.2	استخدم في القياس: عدد ٣ شاش
وحدة (هـ)	عينة (٦)	غسيل + تطهير	19	401	298	استخدم في القياس: عدد ٣ شاش

ملحق (٢)

نتائج تأثير المطهرات على مؤشرات التلوث السطحي عند الرش اليدوي المباشر للذبائح



المجزرة	نوع المطهر	رقم العينة	قبل الغسيل القراءة	بعد ٥ دقائق من الغسيل نسبة التأثير % القراءة	بعد ١٠ دقائق من الغسيل نسبة التأثير % القراءة	بعد ١٥ دقيقة من الغسيل نسبة التأثير % القراءة
معيصم (٢)	PHMG	1	7802	4439	43.1	3735
		2	6683	3217	51.9	2683
		3	7677	3545	53.8	2754
		4	6925	3033	56.2	2365
		5	7366	3081	58.2	2347
		6	7485	2928	60.9	1956
معيصم (٣)	PHMG	1	7792	4354	44.1	3594
		2	7096	3252	54.2	2686
		3	7603	3355	55.9	2575
		4	6730	2817	58.1	2164
		5	6831	2722	60.2	2039
		6	5583	2015	63.9	1360



المجزرة	نوع المطهر	رقم العينة	قبل الغسيل		بعد ٥ دقائق من الغسيل		بعد ١٠ دقائق من الغسيل		بعد ١٥ دقيقة من الغسيل	
			القراءة	نسبة التأثير %	القراءة	نسبة التأثير %	القراءة	نسبة التأثير %	القراءة	نسبة التأثير %
معيصم (١)	H ₂ O ₂	1	7941	17.9	6522	17.9	5569	29.9	4675	41.1
		2	8038	27.9	5797	27.9	4923	38.8	4029	49.9
		3	7253	30.1	5067	30.1	4144	42.9	3419	52.9
		4	7998	31.7	5459	31.7	4379	45.2	3579	55.3
		5	8123	34.2	5341	34.2	4315	46.9	3483	57.1
		6	6988	38.3	4313	38.3	3224	53.9	2675	61.7
المجزرة الحمراء - وحدة (و)	HOCl	1	5471	23.8	4168	23.8	3949	27.8	3029	44.6
		2	7532	31.7	5142	31.7	4680	37.9	3445	54.3
		3	6811	34.2	4485	34.2	3940	42.2	2959	56.6
		4	7644	36.3	4872	36.3	4291	43.9	3124	59.1
		5	7612	37.5	4759	37.5	4140	45.6	2979	60.9
		6	6985	40.3	4171	40.3	3233	53.7	2395	65.7



المجزرة	نوع المطهر	رقم العينة	قبل الغسيل		بعد ٥ دقائق من الغسيل		بعد ١٠ دقائق من الغسيل		بعد ١٥ دقيقة من الغسيل	
			القراءة	نسبة التأثير %	القراءة	نسبة التأثير %	القراءة	نسبة التأثير %	القراءة	نسبة التأثير %
المجزرة الزرقاء - وحدة (هـ)	HOCl	1	7330	21.9	5727	31.9	4994	46.1	3948	46.1
		2	6042	33.8	3998	40.7	3585	55.7	2678	55.7
		3	6560	36.2	4188	44.8	3618	58.9	2698	58.9
		4	7046	37.6	4399	47.1	3724	61.1	2738	61.1
		5	5858	40.2	3505	49.2	2978	63.3	2147	63.3
		6	6905	46.1	3719	56.3	3018	68.8	2151	68.8

ملحق (٣)

نتائج التغير في مؤشرات التلوث السطحي للذبائح بعد المرور عبر وحدة الغسيل والرش النهائي بالمطهر



المجزرة	نوع المطهر	رقم العينة	قبل الغسيل		بعد ٥ دقائق من الغسيل		بعد ١٠ دقائق من الغسيل		بعد ١٥ دقيقة من الغسيل	
			القراءة	نسبة التأثير %	القراءة	نسبة التأثير %	القراءة	نسبة التأثير %	القراءة	نسبة التأثير %
معيصم (٢)	PHMG	1	8547	26.1	6315	34.8	5576	41.9	4967	41.9
		2	8251	34.9	5373	46.2	4436	54.8	3733	54.8
		3	7527	38.1	4657	47.7	3934	57.7	3181	57.7
		4	7120	40.4	4242	49.9	3570	60.1	2838	60.1
		5	8246	42.2	4763	52.1	3948	61.8	3153	61.8
		6	3232	46.7	1723	57.3	1380	70.4	957	70.4
معيصم (٣)	PHMG	1	7968	27.7	5757	34.1	5249	43.8	4482	43.8
		2	7968	36.9	5029	47.8	4163	57.7	3367	57.7
		3	8364	39.8	5038	49.9	4192	60.2	3326	60.2
		4	9011	41.9	5236	51.7	4355	62.1	3414	62.1
		5	6722	44.2	3748	54.4	3062	63.9	2427	63.9
		6	5583	49.4	2827	61.5	2152	71.6	1583	71.6



المجزرة	نوع المطهر	رقم العينة	قبل الغسيل		بعد ٥ دقائق من الغسيل		بعد ١٠ دقائق من الغسيل		بعد ١٥ دقيقة من الغسيل	
			القراءة	نسبة التأثير %	القراءة	نسبة التأثير %	القراءة	نسبة التأثير %	القراءة	نسبة التأثير %
معيصم (١)	H ₂ O ₂	1	7637	11.7	6741	23.7	5824	29.9	5356	29.9
		2	6940	20.1	5542	34.6	4541	44.3	3866	44.3
		3	7475	24.3	5661	36.9	4719	45.7	4057	45.7
		4	7745	25.9	5738	39.1	4714	48.1	4017	48.1
		5	6333	28.2	4547	40.8	3746	50.5	3137	50.5
		6	7487	34.1	4931	46.3	4023	58.2	3129	58.2
المجزرة الحمراء - وحدة (و)	HOCl	1	6431	7.8	5927	18.5	5243	21.7	5036	21.7
		2	6855	17.7	5641	29.3	4847	37.9	4259	37.9
		3	6558	19.9	5256	30.8	4535	40.1	3925	40.1
		4	4942	21.6	3875	32.4	3341	41.8	2876	41.8
		5	8125	23.8	6195	35.2	5261	43.9	4557	43.9
		6	7416	27.9	5349	39.9	4459	53.7	3431	53.7



المجزرة	نوع المطهر	رقم العينة	قبل الغسيل		بعد ٥ دقائق من الغسيل		بعد ١٠ دقائق من الغسيل		بعد ١٥ دقيقة من الغسيل	
			القراءة	نسبة التأثير. %	القراءة	نسبة التأثير. %	القراءة	نسبة التأثير. %	القراءة	نسبة التأثير. %
المجزرة الزرقاء - وحدة (هـ)	HOCl	1	8643	10.2	7759	19.9	6924	26.1	6386	26.1
		2	6924	18.7	5628	31.1	4768	38.6	4254	38.6
		3	8099	21.8	6337	32.8	5446	42.4	4667	42.4
		4	7988	24.1	6061	35.3	5172	44.4	4443	44.4
		5	5911	25.6	4397	36.7	3744	45.9	3198	45.9
		6	7730	30.6	5364	41.9	4493	55.3	3459	55.3





الذي بنعمته تتم الصالحات



@Hajj_uqu



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



hajj@uqu.edu.sa

