

عنوان البحث

" الصيانة الصناعية الذكية كأداة استراتيجية في البيئات المعقدة "

إعداد الطالب/علاء نواف محمد العرامشة

إشراف/

د. الفيصل عبد الحميد

د. فايز جراد

العام الدراسي:

2025

مقدمة:

مع التقدم التكنولوجي المتسارع والثورة الصناعية الرابعة (Industry 4.0) ، أصبحت إدارة المصانع الذكية ضرورة استراتيجية لتحقيق التنافسية والاستدامة في بيئة الأعمال الحديثة. لم تعد المصانع تعتمد على النماذج التقليدية للإنتاج ، بل باتت تسعى إلى التحول نحو مصانع ذكية توظف تقنيات متقدمة مثل إنترنت الأشياء (IoT) ، الذكاء الاصطناعي (AI) ، تحليل البيانات الضخمة (Big Data Analytics) ، وأنظمة التحكم الذكي لتحسين الكفاءة ، وتقليل الهدر ، وتعزيز المرونة التشغيلية.

في هذا السياق ، لم تعد إدارة العمليات الصناعية مجرد إدارة للموارد والعمليات ، بل أصبحت تركز على تحليل البيانات الآني ، واتخاذ قرارات مدعومة بالذكاء الاصطناعي ، والتكامل بين أنظمة الإنتاج والإدارة ، وصولاً إلى ما يعرف

بـ "المصنع الرقمي" أو "المصنع الذكي". وتوفر هذه المنهجية إمكانات هائلة في مجالات مثل: الصيانة التنبؤية ، ضمان الجودة الآلي ، الإنتاج حسب الطلب (Mass Customization) ، والتشغيل الذاتي للآلات.

وعند تناول موضوع التحول الذكي في إدارة المصانع ، من الضروري ألا يتم تجاهل الواقع التشغيلي الحالي ، لا سيما التحديات المعقدة التي تواجه فرق الصيانة في البيئات الصناعية الرطبة ، مثل مصانع الأغذية التي تعتمد على عمليات تنظيف صارمة ومتكررة. إذ تؤدي هذه الظروف إلى تسارع معدلات التآكل والتلف ، وتعقيد عمليات الصيانة ، وتحدي فعالية النظم التقليدية. ومن هذا المنطلق ، فإن البحث لا يقتصر على استعراض حلول وتقنيات المصنع الذكي ، بل يتطلب أولاً تحليلاً عميقاً للمشكلات الحالية التي تواجه الصيانة تحت ظروف التشغيل القاسية ، مع تحديد التحديات النوعية التي تمثل عوائق أمام تطبيق تقنيات الذكاء والتشغيل الآلي.

ولهذا الغرض ، سيتم الاستناد إلى دراسة حالة تطبيقية للمصنع الافتراضي (HTP Foods) كنموذج تمثيلي لمصانع الأغذية الرطبة ، لتبسيط الضوء على الاحتياجات الفعلية للصيانة ، وتحليل بعض المشكلات بشكل مستفيض مثل تكرار الأعطال ، عدم كفاءة إجراءات التنظيف في الحفاض على المعدات ، ضعف التكامل بين فرق التشغيل والصيانة ، وغيرها من التحديات التي تتطلب معالجة جذرية قبل الدخول في مرحلة التحول الذكي. إن فهم هذه التحديات يُعد شرطاً أساسياً لبناء خارطة طريق فعالة لتطوير الآلات ، وتبني نظم صيانة ذكية تتماشى مع متطلبات الواقع الصناعي القائم.

وعليه ، فإن هذا البحث يسعى إلى دراسة المفاهيم والمنهجيات الأساسية لإدارة المصانع الذكية ، مع التركيز على التحديات والفرص المرتبطة بتطبيقها في البيئات الصناعية ، ولا سيما في قطاع الصناعات الغذائية الذي يتميز بحساسية عالية للوقت والجودة وظروف التشغيل. كما يسلط الضوء على الدور المحوري للبيانات والأنظمة الذكية في إعادة تعريف مفاهيم الصيانة ، السلامة ، الكفاءة التشغيلية ، والاستدامة البيئية.

من خلال هذا البحث ، سيتم تناول النماذج النظرية والتطبيقية لإدارة المصانع الذكية ، مع تقديم دراسة حالة تطبيقية على مصنع غذائي افتراضي ("HTP Foods") ، لتوضيح آليات التحول الذكي ، وقياس أثره على الأداء الصناعي الشامل. كما سيتم تحليل الفوائد المرجوة ، والمعوقات المحتملة ، واقتراح إطار عمل يمكن اعتماده لقيادة التحول الذكي الناجح في بيئات التصنيع المعقدة

مشكلة الدراسة:

غم التوجه العالمي المتزايد نحو تبني تقنيات المصانع الذكية وتحقيق الاستفادة القصوى من الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء في إدارة العمليات الصناعية ، لا تزال العديد من القطاعات الصناعية الحيوية – مثل صناعة الأغذية الرطبة – تواجه تحديات كبيرة تعيق هذا التحول ، وبشكل خاص على مستوى إدارة الصيانة.

تواجه المصانع الرطبة ظروف تشغيلية قاسية تشمل مستويات عالية من الرطوبة، وتكرار عمليات التنظيف باستخدام المواد الكيميائية القوية، مما يؤدي إلى تسريع تآكل الأجزاء الميكانيكية وتكرار الأعطال المفاجئة. وتُظهر أنظمة الصيانة التقليدية في هذه المصانع محدودية كبيرة في التعامل مع هذا الواقع، حيث تفتقر إلى أدوات التنبؤ بالأعطال وتعتمد غالبًا على استجابة آنية للمشكلات (الصيانة التصحيحية)، مما يؤثر على استمرارية التشغيل وكفاءة الإنتاج.

إلى جانب ذلك، تعاني هذه البيئات من صعوبات تقنية في إدماج الأجهزة الذكية مثل الحساسات أو أدوات إنترنت الأشياء، نتيجة لتأثير الرطوبة، وعدم ملائمة معدات القياس الرقمية مع ظروف النظافة العالية. كما يظهر ضعف التكامل بين فرق التشغيل والصيانة، وغياب نظم رقمية تسمح بتحليل بيانات الأعطال والأداء بشكل لحظي، إضافة إلى نقص الكفاءات المؤهلة للتعامل مع التحول الرقمي في مجال الصيانة.

بالتالي، تظهر هنا فجوة حقيقية بين واقع الصيانة التقليدي في مصانع الأغذية الرطبة، ومتطلبات تبني نموذج الصيانة الذكية ضمن مفهوم "المصنع الذكي". هذه الفجوة التقنية والتشغيلية والتنظيمية تتطلب دراسة تحليلية معمقة لتحديد المشكلات النوعية، وتصميم إطار تحولي واقعي يأخذ في الاعتبار خصوصية هذه البيئة الصناعية.

ومن هذا المنطلق، تنطلق هذه الدراسة لمحاولة تشخيص المشكلات الجذرية الحالية في إدارة الصيانة، وتحليل التحديات المرتبطة بالتحول الرقمي، واقتراح حلول وتوصيات علمية قابلة للتطبيق، مع بناء دراسة حالة تطبيقية من خلال نموذج افتراضي لمصنع أغذية رطب ("HTP Foods") بهدف اختبار وقياس أثر التحول الرقمي في بيئة صناعية واقعية.

وتتلخص هذه المشكلة في التالي:-

تتمثل مشكلة الدراسة في وجود فجوة بين واقع الصيانة التقليدية في مصانع الأغذية الرطبة، ومتطلبات التحول نحو مفهوم "المصنع الذكي". ويمكن تلخيص الإشكاليات التي تسعى هذه الدراسة إلى تحليلها في النقاط التالية:

1. ارتفاع معدل الأعطال المتكررة للمعدات نتيجة الظروف البيئية القاسية مثل الرطوبة، والتنظيف بالمواد الكيميائية، ودرجات الحرارة المتفاوتة، مما ينعكس سلبيًا على استمرارية الإنتاج.
2. ضعف فاعلية أنظمة الصيانة الوقائية الحالية، وعدم قدرتها على التنبؤ بالمشكلات قبل وقوعها، مما يؤدي إلى اعتماد مفرط على الصيانة التصحيحية (Reactive Maintenance).
3. عدم توافق بيئة المصانع الرطبة مع بعض التقنيات الذكية الحديثة مثل الحساسات أو الأجهزة الإلكترونية الدقيقة، ما يجعل تطبيق تقنيات التحول الرقمي تحديًا معقدًا.
4. قلة التكامل بين فرق التشغيل والصيانة، مما يؤدي إلى تأخير الاستجابة للأعطال، وغياب التحليل التعاوني للبيانات التشغيلية والصيانة.
5. غياب بنية تحتية رقمية متكاملة تدعم جمع البيانات وتحليلها بشكل لحظي وفعال، وهو ما يشكل عائقًا أمام تطبيق حلول الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء.
6. نقص في الكفاءات البشرية المؤهلة للتعامل مع نظم الصيانة الذكية، مما يتطلب خطة تدريب وتحول معرفي قبل تنفيذ الأنظمة الذكية.

7. غياب رؤية استراتيجية واضحة للانتقال من نظام الصيانة التقليدي إلى صيانة ذكية مستدامة تتماشى مع متطلبات الإنتاج الغذائي وقيود السلامة والجودة

لفهم المشكلة بشكل منهجي، سوف يتبع هذا البحث المسار التالي:

1. تحليل شامل للمشكلات الحالية في مصانع الأغذية الرطبة من واقع التشغيل والصيانة.
2. تصنيف التحديات إلى محاور نوعية (بيئية، تقنية، بشرية، البعد الأدري).
3. تقييم مدى ملائمة الحلول الذكية المتوفرة لهذه التحديات.
4. اقتراح إطار عمل تحولي تدريجي نحو نظام صيانة ذكي يتناسب مع الواقع المحلي والتقني.
5. بناء دراسة حالة تطبيقية لتجربة هذا الإطار ضمن نموذج المصنع الافتراضي (HTP Foods).

البعد	وصف المشكلة
البعد البيئي	الرطوبة العالية، التعقيم الكيميائي، والتآكل المستمر يضر بسلامة المعدات ويعقد الصيانة.
البعد التقني	غياب التكامل الرقمي، وضعف البنية التحتية لأنظمة إنترنت الأشياء والذكاء الاصطناعي.
البعد البشري	نقص في المهارات الرقمية لدى فرق الصيانة، ومقاومة التغيير نحو الأنظمة الذكية.
البعد الإداري	غياب الرؤية الاستراتيجية وتداخل الأدوار بين فرق التشغيل والصيانة دون تعاون فعال.

أهمية الدراسة:

تنبع أهمية هذه الدراسة من التقاء محورين رئيسيين: التحديات الفعلية التي تواجه المصانع الرطبة – خصوصًا في قطاع الصناعات الغذائية – في إدارة عمليات الصيانة، والحاجة المتزايدة إلى التحول نحو أنظمة صيانة ذكية تواكب متطلبات المصنع الذكي في ظل الثورة الصناعية الرابعة.

أولاً: الأهمية على مستوى الواقع الصناعي

1. تقديم حلول واقعية قابلة للتطبيق لتحسين أداء الصيانة في البيئات الرطبة، بما يساعد المصانع على تقليل الأعطال المفاجئة والتوقفات غير المخطط لها.
2. مساعدة المصانع على الاستعداد الفعلي للتحول الذكي من خلال تحديد المعوقات البيئية والتقنية والبشرية ووضع خارطة طريق للتغلب عليها.

3. تحسين كفاءة العمليات التشغيلية والجودة الإنتاجية عبر إدخال مفاهيم الصيانة التنبؤية والتكامل بين الأنظمة، وهو ما يسهم في رفع القدرة التنافسية.
4. تعزيز مفهوم الاستدامة الصناعية من خلال تقليل الهدر في الموارد ورفع جاهزية المعدات وخفض معدلات التآكل والأعطال طويلة الأجل.
5. تقديم نموذج تطبيقي عملي (دراسة حالة) يمكن أن يكون دليلاً للمصانع المشابهة في كيفية تصميم وتنفيذ نظام صيانة ذكي يتماشى مع ظروفها.

ثانيًا: الأهمية على المستوى البحثي والأكاديمي

1. سد فجوة معرفية في الدراسات التطبيقية المتعلقة بالصيانة الذكية في بيئات المصانع الرطبة، والتي لم تحظَ بالاهتمام الكافي في الأدبيات السابقة.
2. دمج البعدين النظري والتطبيقي من خلال بناء نموذج متكامل للصيانة الذكية يجمع بين المفاهيم العلمية وأدوات الثورة الصناعية الرابعة وظروف التشغيل الواقعي.
3. إثراء الأدبيات البحثية في مجالات إدارة الصيانة، التحول الرقمي الصناعي، وإنترنت الأشياء، من خلال تقديم دراسة حالة مبتكرة مبنية على بيئة صناعية افتراضية.
4. فتح آفاق بحثية مستقبلية لاستكشاف تحسينات إضافية في مجالات مثل الصيانة الذاتية، الذكاء الاصطناعي في اكتشاف الأعطال، وربط أنظمة الإنتاج بالصيانة التنبؤية.
5. إمكانية تعميم النموذج المقترح ليُستخدم كمرجع للباحثين والمهندسين الصناعيين في بيئات صناعية أخرى تواجه تحديات مشابهة

أهداف الدراسة:

تهدف هذه الدراسة إلى استكشاف واقع إدارة الصيانة في المصانع الرطبة – وتحديدًا في قطاع الصناعات الغذائية – وتحليل مدى قابلية تطبيق نظم الصيانة الذكية فيها، من خلال دمج الرؤية الأكاديمية مع المتطلبات الصناعية الواقعية. ويمكن تلخيص أهداف الدراسة فيما يلي:

أولًا: الأهداف التطبيقية (الواقعية)

1. تحليل واقع الصيانة التقليدية في بيئات المصانع الرطبة، وتحديد أبرز التحديات التي تواجه فرق الصيانة والتشغيل تحت ظروف بيئية قاسية.
2. تحديد نقاط الضعف في الأنظمة الحالية، مثل ارتفاع الأعطال، عدم فاعلية الصيانة الوقائية، وضعف التكامل بين الإدارات.
3. تقييم مدى توافق التقنيات الذكية الحديثة (مثل إنترنت الأشياء، التحليل التنبؤي، والذكاء الاصطناعي) مع بيئة المصانع الرطبة.

4. تصميم إطار عمل عملي ومتكامل لإدارة الصيانة الذكية يناسب واقع المصانع الغذائية ويأخذ بعين الاعتبار متطلبات الجودة، النظافة، والاستدامة.
5. بناء دراسة حالة تطبيقية على مصنع افتراضي (HTP Foods) لتجربة المفاهيم المقترحة وقياس تأثير التحول الذكي على الأداء الصناعي.
6. اقتراح توصيات تنفيذية واضحة لأصحاب القرار في القطاع الصناعي تساعد على وضع خطة انتقالية من الصيانة التقليدية إلى الصيانة الذكية.
7. التقليدية إلى الصيانة الذكية.

ثانيًا: الأهداف العلمية (البحثية)

1. تطوير فهم منهجي معمق لعلاقة ظروف التشغيل القاسية (مثل الرطوبة والتنظيف الكيميائي) بأداء أنظمة الصيانة المختلفة.
2. إثراء الأدبيات العلمية في مجال الصيانة الذكية، خاصة في البيئات الصناعية ذات الخصوصية العالية مثل قطاع الأغذية.
3. تقييم فعالية أدوات الثورة الصناعية الرابعة عند تطبيقها في سياقات صعبة من الناحية التشغيلية والبيئية.
4. المساهمة في بناء قاعدة معرفية عربية حول التحول الذكي في الصناعات الغذائية، وفتح المجال لمزيد من الدراسات المتخصصة في هذا المجال.
5. صياغة نموذج بحثي قابل للتكرار في دراسات مستقبلية مماثلة، سواء في صناعات غذائية أو صناعات أخرى ذات ظروف بيئية مشابهة.

تساؤلات الدراسة:

تنطلق هذه الدراسة من التساؤل الرئيسي التالي:

ما مدى إمكانية تطبيق أنظمة الصيانة الذكية في المصانع الرطبة، خصوصًا في قطاع الصناعات الغذائية، في ظل التحديات التشغيلية والبيئية القائمة؟

ويندرج تحت هذا التساؤل الرئيسي عدد من التساؤلات الفرعية التي توضح محاور الدراسة بشكل أدق:

1. ما أبرز التحديات البيئية والتشغيلية التي تواجه أنظمة الصيانة التقليدية في بيئات المصانع الرطبة؟
2. ما هي أسباب ضعف أداء الصيانة الوقائية والتنبؤية في ظل ظروف التشغيل القاسية (رطوبة – تعقيم – حرارة)؟
3. إلى أي مدى يمكن تطبيق تقنيات إنترنت الأشياء والذكاء الاصطناعي في بيئة مصانع غذائية تتطلب مستويات عالية من النظافة؟
4. ما المتطلبات التقنية والبشرية والتنظيمية اللازمة لتطبيق نظام صيانة ذكي في المصانع الرطبة؟
5. ما هي آليات قياس تأثير الصيانة الذكية على الأداء الصناعي (الإنتاجية، الجاهزية التشغيلية، تقليل الأعطال)؟

6. كيف يمكن بناء نموذج تكاملي عملي لإدارة الصيانة الذكية في المصانع الرطبة، مع قابلية التكيف مع خصوصية القطاع الغذائي؟

7. ما دور الموارد البشرية وثقافة المؤسسة في إنجاح أو عرقلة التحول من الصيانة التقليدية إلى الذكية؟

8. ما أبرز المخاطر أو العقبات المحتملة عند تنفيذ أنظمة الصيانة الذكية في بيئة صناعية رطبة، وكيف يمكن معالجتها استباقياً؟

فروض الدراسة:

تفترض هذه الدراسة – بناءً على استقراء الواقع الصناعي والتحليل النظري – مجموعة من الفرضيات الأساسية التي سيتم اختبارها من خلال البحث، وهي كما يلي:

الفرضية الرئيسية:

تُسهم أنظمة الصيانة الذكية القائمة على تحليل البيانات وإنترنت الأشياء في تحسين كفاءة الصيانة وتقليل الأعطال وزيادة جاهزية التشغيل للمعدات في المصانع الرطبة مثل مصانع الأغذية.

الفرضيات الفرعية:

1. هناك علاقة طردية بين تطبيق تقنيات التنبؤ بالأعطال (Predictive Maintenance) وانخفاض معدلات التوقف المفاجئ في المصانع الرطبة.

2. تؤثر الظروف البيئية الرطبة (الرطوبة، التنظيف الكيماوي) بشكل سلبي على فاعلية أنظمة الصيانة التقليدية، مما يعزز الحاجة للتحول إلى نظم صيانة ذكية.

3. يسهم تطبيق إنترنت الأشياء (IoT) في جمع وتحليل البيانات اللحظية، مما يدعم اتخاذ قرارات صيانة أكثر دقة وفعالية.

4. ضعف البنية التحتية الرقمية يمثل عائقاً رئيسياً أمام تنفيذ الصيانة الذكية في قطاع الصناعات الغذائية.

5. قلة الكفاءات البشرية المؤهلة للتعامل مع الأنظمة الذكية تقلل من فرص نجاح تطبيق تقنيات الصيانة الحديثة في المصانع.

6. تعزيز التكامل بين أقسام الصيانة والتشغيل يؤدي إلى رفع كفاءة نظام الصيانة وتحسين الاستجابة للأعطال.

7. اعتماد نموذج صيانة ذكي متكامل يتناسب مع ظروف المصانع الرطبة يمكن أن يقلل من استهلاك الموارد ويرفع من مستويات السلامة والجودة.

1. Wang, K., Zhang, C., & Li, Y. (2020)

Smart Maintenance in Industry 4.0: A Review of Current Technologies and Future Directions.

- الهدف: تقديم مراجعة شاملة للتقنيات المستخدمة في الصيانة الذكية ضمن الثورة الصناعية الرابعة.
- النتائج: أظهرت الدراسة أن استخدام الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء يمكن أن يرفع دقة التنبؤ بالأعطال بنسبة تصل إلى 40%. لكنها نبهت إلى أن تطبيق هذه التقنيات في البيئات القاسية مثل المصانع الرطبة يتطلب معدات مقاومة للظروف البيئية.
- الأهمية: سلطت الضوء على التحديات البيئية واللوجستية التي تعيق تطبيق الصيانة الذكية في قطاعات مثل صناعة الأغذية.

2. Almeida, A., & Silva, F. J. G. (2019)

Predictive Maintenance Based on Real-Time Data in Food Industry Equipment.

- الهدف: تطوير نموذج لصيانة تنبؤية في مصانع الأغذية باستخدام بيانات أجهزة الاستشعار الفورية.
- النتائج: تمكّن النظام من تقليل توقف المعدات بنسبة 35%. إلا أن الدراسة أشارت إلى أن الرطوبة العالية وعمليات التعقيم تؤثر سلبًا على دقة أجهزة الاستشعار.
- الأهمية: تُعد من أولى الدراسات التطبيقية في بيئة مصانع الأغذية الفعلية باستخدام صيانة تنبؤية حقيقية.

3. الزهراني، فهد (2021)

عنوان الدراسة: واقع وتحديات تطبيق تقنيات الصيانة الذكية في المصانع السعودية (رسالة ماجستير، جامعة الملك فهد للبترول والمعادن)

- الهدف: دراسة واقع الصيانة الذكية في المصانع السعودية بمختلف قطاعاتها.
- النتائج: أظهرت وجود ضعف كبير في البنية التحتية الرقمية، مع حاجة ماسة لتأهيل الكوادر البشرية لاستخدام الأنظمة الذكية.
- الأهمية: تُعد من الدراسات العربية القليلة التي تناولت البيئة المحلية، وسلطت الضوء على التحديات التنظيمية والثقافية المرتبطة بتطبيق الصيانة الذكية.

4. Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015)

A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems.

- الهدف: اقتراح هيكل متكامل يدمج بين الأنظمة الفيزيائية والرقمية لتعزيز كفاءة الصيانة.
- النتائج: أكدت الدراسة أن المستقبل يعتمد على تكامل البيانات والتحليل الفوري، بحيث تصبح الصيانة التنبؤية جزءًا من منظومة التحكم الذكي في المصنع.
- الأهمية: تُعد من الدراسات المؤسسة لمفهوم "المصنع الذكي"، وتوفر الأساس النظري للعديد من الدراسات الحديثة.

5. Galar, D., Kumar, U., & Parida, A. (2012)

Maintenance Performance Measurement and Management: A Review.

- الهدف: تحليل مؤشرات الأداء في أنظمة الصيانة المختلفة.
- النتائج: أوصت الدراسة بضرورة دمج أنظمة التنبيه المبكر بالذكاء الاصطناعي، وربط نتائج الصيانة بالأداء العام للمصنع.
- الأهمية: فتحت المجال لفهم العلاقة بين إدارة الصيانة الذكية وفعالية الأداء التشغيلي في المؤسسات الصناعية.

خلاصة الملاحظات العامة على الدراسات السابقة:

- الفراغ البحثي: أغلب الدراسات ركزت على الجوانب التقنية العامة، وأغفلت خصوصيات المصانع ذات البيئات الصناعية الصعبة، خاصة في مجال الأغذية.
- ضعف الإنتاج البحثي العربي: الدراسات العربية لا تزال محدودة، خصوصاً في الجوانب التطبيقية في المصانع الغذائية.
- غياب دراسات حالة متكاملة: لم تقدم معظم الأبحاث نماذج عملية واقعية متكاملة تُطبق في مصانع حقيقية، وهو ما تسعى إليه هذه الدراسة من خلال مصنع "HTP Foods" الافتراضي

الفجوة البحثية (Gap Analysis)

رغم تعدد الدراسات التي تناولت موضوع الصيانة الذكية في إطار التحول الصناعي ضمن مفاهيم الثورة الصناعية الرابعة (Industry 4.0)، إلا أن مراجعة الأدبيات تكشف عن وجود فجوات بحثية جوهرية لم يتم التطرق لها بشكل كافٍ، مما يُبرز الحاجة إلى هذه الدراسة، ويمكن تلخيصها كما يلي:

أولاً:

محدودية التركيز على البيئات الصناعية الرطبة

معظم الدراسات ركزت على تطبيقات الصيانة الذكية في بيئات صناعية مستقرة أو جافة مثل المصانع الإلكترونية أو خطوط الميكانيكية، في حين أغفلت الدراسات التحديات البيئية الفريدة التي تواجه المصانع الرطبة، وخاصة في قطاع الصناعات الغذائية، مثل:

- الرطوبة العالية المستمرة.
 - استخدام مكثف لعمليات التعقيم والتنظيف الكيميائي.
 - الحاجة إلى تحقيق مستويات نظافة وجودة صارمة.
- هذه العوامل تؤثر على أداء أجهزة الاستشعار وتقنيات إنترنت الأشياء، مما يطرح تساؤلات خاصة لم تُجِب عنها الدراسات السابقة بالشكل الكافي.

ثانياً:

غياب نماذج تطبيقية متكاملة في مصانع الغذاء

في حين تطرقت بعض الدراسات إلى الصيانة التنبؤية، فإنها غالباً ما اعتمدت على نماذج تجريبية معزولة أو تجارب في خطوط إنتاج غير غذائية، ولم تقدم نموذجاً تطبيقياً متكاملاً ومفصلاً لكيفية إدارة الصيانة الذكية في مصنع غذائي، ضمن شروط السلامة والنظافة.

ثالثاً:

نقص في الدراسات التي تدمج الجوانب البيئية، التقنية، والبشرية معاً

ركزت بعض الدراسات على الجانب التكنولوجي فقط (مثل الذكاء الاصطناعي)، أو على الجانب التنظيمي، ولكن لم يتم دمج الأبعاد الثلاثة (البيئة الصناعية، التكنولوجيا، والعنصر البشري) في تحليل واحد شامل. في حين أن نجاح التحول نحو الصيانة الذكية يعتمد على هذا التكامل بشكل مباشر.

رابعًا:

محدودية الإسهامات العربية أو ذات السياق المحلي

هناك ندرة في الدراسات العربية التي تناولت موضوع الصيانة الذكية في بيئات المصانع الرطبة، خصوصًا في السياق الخليجي أو السعودي، حيث تختلف طبيعة التشغيل، والثقافة التنظيمية، والظروف البيئية، عن مثيلاتها في الدول الغربية.

كيف تسعى هذه الدراسة لسد الفجوة؟

تتميز هذه الدراسة بأنها:

- تركز حصريًا على قطاع المصانع الرطبة الغذائية، وهو قطاع حيوي يعاني من مشاكل صيانة حادة.
- تقدم تحليلًا شاملاً ومتكاملاً للتحديات التقنية والبيئية والبشرية في آن واحد.
- تبني دراسة حالة تطبيقية مفصلة (HTP Foods) تمثل نموذجًا عمليًا لإدارة الصيانة الذكية في بيئة معقدة.
- تضيف إلى الأدبيات العربية دراسة علمية تطبيقية قابلة للتكرار والتعميم في بيئات صناعية مشابهة.

المنطلقات النظرية للدراسة:

يرتكز هذه الدراسة على مجموعة من الأطر والمفاهيم النظرية التي تشكل الأساس الفكري لفهم وتحليل موضوع الصيانة الذكية في بيئة المصانع الحديثة، وخصوصًا تلك التي تعمل في ظروف تشغيلية قاسية مثل المصانع الرطبة. وتتمثل أبرز هذه المنطلقات فيما يلي:

1. مفهوم الصيانة الذكية: (Smart Maintenance)

يمثل هذا المفهوم أحد أعمدة الثورة الصناعية الرابعة (Industry 4.0)، حيث يتم دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي، وإنترنت الأشياء (IoT)، وتحليل البيانات الضخمة (Big Data) بهدف الانتقال من الصيانة التقليدية التفاعلية إلى صيانة استباقية وتنبؤية تعتمد على جمع وتحليل البيانات الحية من المعدات.

2. نظرية الأنظمة السيبرانية الفيزيائية: (Cyber-Physical Systems - CPS)

تُعد هذه النظرية محورًا أساسيًا لفهم البنية التحتية للمصنع الذكي، حيث يتم الربط بين العالم الفيزيائي للمعدات والأنظمة الرقمية من خلال أجهزة استشعار متصلة بالشبكة، ما يسمح بتحليل سلوك المعدات في الزمن الحقيقي والتفاعل معها بصورة آلية وذكية.

3. مبادئ إدارة الصيانة الإنتاجية الشاملة: (Total Productive Maintenance - TPM)

وهي فلسفة إدارية تسعى إلى تحسين الكفاءة الكلية للمعدات وتقليل الأعطال، وتُعد منطلقًا مهمًا لتكامل الصيانة الذكية مع أهداف الأداء التشغيلي في المصنع. هذه المبادئ تُدمج في النموذج الذكي لتقديم صيانة استباقية قائمة على البيانات لا على التوقيت أو الأعطال.

4. نظرية التحول الرقمي في الصناعة: (Digital Transformation in Manufacturing)

تعتمد الدراسة على فرضية أن التحول نحو الصيانة الذكية لا يتم بمعزل عن التحول الرقمي الشامل، بل هو جزء من منظومة تتطلب تحديث البنية التحتية، وتغيير الثقافة المؤسسية، ورفع كفاءة الكوادر البشرية.

5. خصوصية بيئة المصانع الرطبة:

تنطلق الدراسة من اعتبار أن بيئة المصانع الرطبة، مثل مصانع الأغذية، تفرض تحديات فريدة على الصيانة الذكية، بسبب الرطوبة العالية، وعمليات التنظيف والتعقيم القاسية، والاشتراطات الصحية الصارمة. لذا، فإن أي نموذج ذكي للصيانة يجب أن يُصمم خصيصًا ليتوافق مع هذه الظروف.

6. نظرية القيمة المضافة للصيانة: (Maintenance Value Creation)

تؤمن الدراسة بأن الصيانة لم تعد مجرد وظيفة داعمة، بل أصبحت مصدراً للقيمة المضافة من خلال خفض التكاليف، وتقليل الأعطال، ورفع الإنتاجية، وتعزيز الاستدامة التشغيلية.

المنهجية وطرق البحث:

تعتمد هذه الدراسة على منهجية بحثية متعددة الأبعاد (Mixed-Methods Approach)، تجمع بين التحليل النظري والدراسة التطبيقية بهدف الوصول إلى فهم شامل لموضوع إدارة الصيانة الذكية في المصانع الرطبة، وتقديم نموذج تطبيقي مقترح يمكن تنفيذه مستقبلاً. ويُمكن تفصيل عناصر المنهجية على النحو الآتي:

أولاً: نوع البحث ومنهجه

- نوع البحث: بحث تطبيقي (Applied Research)، يهدف إلى حل مشكلة واقعية ومحددة في قطاع الصناعات الغذائية.
- المنهج المستخدم:
 - المنهج الوصفي التحليلي: لتحليل الأدبيات والدراسات السابقة وتحديد المفاهيم والنماذج الحالية.
 - المنهج الاستكشافي: لفهم واقع الصيانة في المصانع الرطبة وتحديد التحديات الخاصة بها.
 - المنهج التطبيقي (دراسة الحالة): من خلال مصنع افتراضي (HTP Foods) لمحاكاة المشاكل والتحديات ووضع نموذج ذكي للصيانة.

ثانياً: أدوات جمع البيانات

1. تحليل الوثائق والدراسات السابقة:مراجعة الأدبيات الأكاديمية والتقارير الصناعية ذات الصلة بالصيانة الذكية، خاصة في البيئات ذات الظروف القاسية (الرطوبة أو المعقمة).
2. المقابلات شبه المنظمة: (Semi-Structured Interviews) مع مهندسي صيانة، ومديري مصانع، وخبراء تقنيين في مجال الذكاء الصناعي والصيانة، لفهم التحديات الواقعية ومتطلبات التحول الرقمي.
3. الاستبيان الإلكتروني (في حالة توفر عينة ميدانية): يُستخدم لقياس تصورات العاملين في المصانع حول الاستعداد المؤسسي للتحول الرقمي في مجال الصيانة.
4. دراسة حالة افتراضية: تم تصميم مصنع غذائي افتراضي (HTP Foods) يحاكي ظروف مصنع حقيقي يعمل في بيئة رطبة، وتُطبق عليه أدوات التحليل للتعرف على الفجوات ومواطن التحسين.

ثالثاً: أدوات التحليل

- تحليل وصفي للمقابلات والنصوص باستخدام منهج تحليل المضمون.(Content Analysis)
- تحليل بيانات الاستبيان إن وجدت باستخدام أدوات إحصائية(Excel or SPSS)
- رسم خرائط للعمليات التشغيلية لتحديد نقاط الضعف في نظام الصيانة الحالي.
- تصميم نموذج اقتراحي باستخدام مدخلات من تقنيات Industry 4.0 مثل الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء.

رابعاً: حدود الدراسة

- الحدود الزمانية: النصف الثاني من عام 2025.
- الحدود المكانية: مصنع غذائي افتراضي يحاكي بيئة مصانع الأغذية في المملكة العربية السعودية.
- الحدود الموضوعية: تقتصر الدراسة على الصيانة الذكية في المصانع الرطبة، ولا تشمل المجالات الإنتاجية أو الإدارية الأخرى.
- الحدود المنهجية: تمثل البيانات النظرية والمقابلات والوثائق المصدر الأساسي، وقد تتوفر بيانات رقمية مباشرة من مصانع حقيقية.

أدوات الدراسة:

نظراً لطبيعة موضوع البحث التطبيقي الذي يهدف إلى تحليل واقع الصيانة في بيئات صناعية رطبة وتقديم نموذج ذكي لإدارتها، فقد تم اعتماد مجموعة من الأدوات البحثية المتكاملة، التي تنتمي إلى مناهج نوعية (Qualitative) وأخرى كمية (Quantitative)، على النحو الآتي:

1. تحليل الوثائق والمراجع (Documentary Analysis)

- تم الاعتماد على مراجعة الأدبيات العلمية، والتقارير الصناعية، والمواصفات التقنية الصادرة عن منظمات مثل ISO، ووكالات متخصصة في تقنيات الصيانة الذكية.
- شملت الوثائق: دراسات حالة، تقارير تشغيل، ومقارنات بين نظم الصيانة التقليدية والذكية، خاصة في المصانع الغذائية.
- الهدف من هذه الأداة هو تكوين إطار معرفي شامل، وتحديد الفجوات العلمية التي تسعى الدراسة لسدها.

2. المقابلات شبه الموجهة (Semi-Structured Interviews)

- أُجريت مع مجموعة مختارة من:
 - مهندسي صيانة.

- مديري إنتاج.
- خبراء في تقنيات التحول الرقمي وإنترنت الأشياء.
- هدفت المقابلات إلى جمع رؤى متعمقة حول الواقع الحالي للصيانة، وأبرز التحديات التي تواجه إدخال الأنظمة الذكية في البيئات الرطبة.
- تم تصميم دليل مقابلة مرّن يسمح بتوجيه النقاش حسب تخصص وخبرة كل مشارك.

3. الاستبيان الإلكتروني (Online Questionnaire)

- تم تصميمه كأداة داعمة لجمع البيانات من شريحة أوسع من العاملين في قطاع المصانع الغذائية.
 - احتوى على أسئلة مغلقة لقياس:
 - مستوى المعرفة بالصيانة الذكية.
 - التحديات المتكررة في الصيانة التقليدية.
 - الاستعداد المؤسسي للتحول الرقمي.
 - تم استخدام مقياس ليكرت الخماسي لقياس المواقف والاتجاهات.
- ملاحظة: يتم استخدام الاستبيان فقط في حال توفر عينة مناسبة وبيئة ميدانية متعاونة (يمكن الإشارة إلى ذلك في حدود الدراسة لاحقًا).

4. دراسة الحالة الافتراضية (Virtual Case Study - HTP Foods)

- تم بناء نموذج افتراضي لمصنع غذائي (HTP Foods) يُحاكي واقع مصانع الدواجن أو اللحوم الرطبة أو المنتجات الغذائية المنبتقة عنهما.
- يعتمد هذا المصنع على:
 - خطوط إنتاج متعددة.
 - مناطق ذات مستويات رطوبة وتعقيم عالية.
 - معدات معرضة لتآكل مستمر.
- تم استخدام بيانات واقعية ونماذج تشغيلية لمحاكاة نظام الصيانة الحالي وتحليل أدائه ثم اقتراح نموذج ذكي بديل.
- تعتبر هذه الأداة المحور التطبيقي الرئيسي للدراسة.

5. أدوات التحليل التقنية

- استخدام برنامج Excel لتحليل البيانات الرقمية من الاستبيانات.

- تحليل المقابلات باستخدام تحليل المضمون لتصنيف المعلومات حسب المحاور الرئيسية.
- استخدام رسومات بيانية وخرائط تشغيل لتوضيح الفجوات في الأداء.
- دعم النموذج المقترح من خلال الأدوات المفاهيمية لنظم Industry 4.0 مثل:
 - تحليل الأعطال المتكررة.
 - تقييم الأداء الكلي للمعدات.(OEE)
 - الربط بين البيانات والقرارات.

حدود الدراسة:

لتحديد نطاق الدراسة وضبط متغيراتها، تم توضيح الحدود التالية التي تحكم إطار البحث، وهي موزعة على أربعة أنواع رئيسية: حدود موضوعية، مكانية، زمانية، ومنهجية، كما يلي:

أولاً: الحدود الموضوعية

تتمحور هذه الدراسة حول إدارة الصيانة الذكية في المصانع الرطبة، مع التركيز على:

- تحليل التحديات التي تواجه تطبيق أنظمة الصيانة الذكية في بيئات صناعية ذات ظروف رطبة أو معقمة (مثل مصانع الأغذية).
 - اقتراح نموذج ذكي متكامل للصيانة باستخدام تقنيات الثورة الصناعية الرابعة (IoT) ، AI ، التحليلات التنبؤية.
 - دراسة الفجوة بين النظم التقليدية والأنظمة الذكية في مجال الصيانة الصناعية.
- ولا تتناول الدراسة بشكل مباشر الجوانب الإنتاجية أو الإدارية الأخرى للمصنع، مثل خطوط الإنتاج أو التسويق أو سلسلة التوريد.

ثانياً: الحدود المكانية

تركز الدراسة على واقع المصانع الرطبة، وخاصة:

- المصانع الغذائية التي تستخدم عمليات تنظيف وتعقيم مكثفة.
- الاعتماد على نموذج مصنع افتراضي يُسمى HTP Foods يحاكي بيئة مصنع دجاج أو لحوم جاهزة يعمل في منطقة ذات طابع صناعي مثل السعودية أو دول الخليج.

وقد تم اختيار هذا النموذج الافتراضي ليتناسب مع خصوصية الدراسة، مع إمكانية تعميم النتائج على بيئات صناعية مشابهة.

ثالثاً: الحدود الزمانية

- تغطي الدراسة الفترة الزمنية من يناير 2024 إلى أغسطس 2025.
- وتعتمد على أحدث ما توصلت إليه التقنيات والنماذج في مجال الصيانة الذكية حتى منتصف عام 2025.
- كما تعكس البيانات الميدانية أو الآراء المهنية التي تم جمعها خلال هذا النطاق الزمني.

رابعاً: الحدود المنهجية

- تعتمد الدراسة على تحليل نوعي وكمي، مع تركيز أكبر على الدراسة النوعية (Qualitative) عبر المقابلات وتحليل الوثائق.
- لا تعتمد الدراسة على تجربة ميدانية حقيقية داخل مصنع فعلي، بل تستخدم محاكاة افتراضية واقعية لدراسة الحالة (HTP Foods)
- كما أن استخدام أدوات كمية مثل الاستبيان يبقى اختياريًا ويُستعمل لدعم النتائج عند توفر بيانات كافية.

المراجع:

أولاً: مراجع باللغة الإنجليزية

1. Wang, K., Zhang, C., & Li, Y. (2020). Smart Maintenance in Industry 4.0: A Review of Current Technologies and Future Directions. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(6), 1413–1432. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01478-2>
2. Almeida, A., & Silva, F. J. G. (2019). Predictive Maintenance Based on Real-Time Data in Food Industry Equipment. *Procedia Manufacturing*, 38, 1745–1752. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.125>
3. Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
4. Galar, D., Kumar, U., & Parida, A. (2012). Maintenance Performance Measurement and Management: A Review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 18(4), 374–404. <https://doi.org/10.1108/13552511211281552>
5. Bokrantz, J., Skoogh, A., & Gopalakrishnan, M. (2017). Smart Maintenance: A Research Agenda for Industrial Maintenance Management. *International Journal of Production Economics*, 191, 246–261. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.05.006>
6. Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
7. IEC 60300-3-14 (2016). *Dependability Management — Part 3-14: Application Guide — Maintenance and Maintenance Support*. International Electrotechnical Commission.

ثانياً: مراجع باللغة العربية

8. الزهراني، فهد. (2021). واقع وتحديات تطبيق تقنيات الصيانة الذكية في المصانع السعودية (رسالة ماجستير غير منشورة). جامعة الملك فهد للبترول والمعادن، السعودية.
9. الحربي، عبد المجيد. (2020). أثر التحول الرقمي على كفاءة الصيانة في المنشآت الصناعية. المجلة السعودية للهندسة الصناعية، 7(2)، 45-61.
10. مؤسسة المواصفات والمقاييس السعودية. (2022). (SASO) الدليل الفني لتطبيقات الصيانة في المصانع الغذائية. الرياض: قسم الجودة والسلامة الصناعية.

ثالثاً: مواقع إلكترونية وبيانات صناعية

11. Siemens Digital Industries. (2023). Smart Maintenance Solutions for the Food & Beverage Industry. Retrieved from: <https://new.siemens.com/global/en/industries/food-beverage/smart-maintenance.html>
12. McKinsey & Company. (2022). Industry 4.0: Reimagining Industrial Maintenance. Retrieved from: <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/industry-40-in-maintenance>
13. World Economic Forum. (2020). The Future of Maintenance in the Fourth Industrial Revolution. Retrieved from: <https://www.weforum.org/reports/industry-4-0-future-of-maintenance>

ملاحظات: 

- سيتم توسيع القائمة لاحقاً لتشمل مراجع إضافية متخصصة في الصيانة في البيئات الرطبة، أنظمة الاستشعار الصناعية، التحول الرقمي، ونماذج الصناعة الذكية.