Al-Farouk journal of sciences
Volume (2), Issue (3) (JUNE, 2026)
ISSN: 3135-2359

مجلة الفاروق للعلوم
المجلد (2) ملحق العدد 3 يونيو 2026
ردمد: 3135-2359

تطوير نموذج لإدارة صيانة الطرق باستخدام الذكاء الاصطناعي

خالد عبدالله ابراهيم عبدالوافي
المعهد العالي للتقنيات الهندسية / طرابلس
Kh.Tiha75@Gmail.com

Developing a road maintenance management model using artificial intelligence

High institute of Engineering / Tripoli
Kh_Tiha75 yahoo.com

تاريخ الاستلام: 2026/05/21 تاريخ المراجعة 06/16/ 2026 تاريخ القبول:2026/06/28- تاريخ النشر: 07/10/ 2026

الملخص:
يهدف هذا البحث إلى تطوير نموذج ذكي لإدارة صيانة الطرق بالاعتماد على تقنيات الذكاء الاصطناعي، في إطار بحث مكتبي يسعى إلى تحليل واقع إدارة صيانة الطرق التقليدية والكشف عن أوجه القصور فيها، لا سيما من حيث التخطيط الاستباقي وترتيب أولويات الصيانة. وقد اعتمد البحث على المنهج الوصفي التحليلي والمنهج التصميمي المفاهيمي، من خلال تحليل الأدبيات العلمية والنماذج النظرية ذات الصلة بإدارة البنية التحتية والذكاء الاصطناعي.
وتوصل البحث إلى أن الأساليب التقليدية في إدارة صيانة الطرق تعتمد بدرجة كبيرة على ردّ الفعل بعد وقوع التلف، مما يؤدي إلى ارتفاع التكاليف وضعف كفاءة استخدام الموارد. كما أظهر البحث أن الذكاء الاصطناعي يشكّل مدخلًا إداريًا حديثًا يمكن توظيفه لدعم اتخاذ القرار، وتحسين التخطيط، والانتقال نحو الصيانة الوقائية. وفي هذا السياق، قدّم البحث نموذجًا ذكيًا تصوريًا يربط بين البيانات والتحليل والقرار ضمن إطار إداري متكامل، دون الدخول في الجوانب التقنية التطبيقية.
ويخلص البحث إلى أن اعتماد النماذج الذكية في إدارة صيانة الطرق يسهم في تحسين كفاءة الإدارة وتحقيق استدامة البنية التحتية .
الكلمات المفتاحية: إدارة صيانة الطرق، الذكاء الاصطناعي، دعم اتخاذ القرار، الصيانة الوقائية، البنية التحتية.

Abstract
This study aims to develop an intelligent model for road maintenance management based on artificial intelligence techniques, within the framework of a desk-based research. The study seeks to analyze the current practices of traditional road maintenance management and identify their shortcomings, particularly in terms of proactive planning and maintenance prioritization. The research adopts a descriptive-analytical approach along with a conceptual design methodology through the review and analysis of relevant literature on infrastructure management and artificial intelligence. The findings indicate that traditional road maintenance management largely relies on reactive interventions after deterioration occurs, leading to increased costs and inefficient use of resources. The study also demonstrates that artificial intelligence represents a modern managerial approach that can effectively support decision-making, enhance planning efficiency, and facilitate the transition toward preventive maintenance. Accordingly, the research proposes a conceptual intelligent model that integrates data, analysis, and decision-making within a comprehensive administrative framework, without addressing technical or implementation aspects. The study concludes that adopting intelligent models in road maintenance management can significantly improve administrative efficiency and contribute to infrastructure sustainability.
Keywords: Road Maintenance Management, Artificial Intelligence, Decision Support, Preventive Maintenance, Infrastructure.

المقدمة:
تُعد شبكات الطرق من أهم مكونات البنية التحتية التي تقوم عليها حركة التنمية الاقتصادية والاجتماعية في أي دولة، إذ ترتبط بشكل مباشر بانسيابية النقل [1]، وسلامة الأفراد، وكفاءة الأنشطة التجارية والخدمية. غير أن الحفاظ على كفاءة هذه الشبكات يظل تحديًا مستمرًا في ظل التوسع العمراني المتسارع، والضغط المتزايد على الطرق،[2] وتغيّر الظروف المناخية، فضلًا

عن محدودية الموارد المالية والبشرية المخصصة لأعمال الصيانة. وقد أدى ذلك في كثير من الحالات إلى تراجع مستوى الخدمات الطرقية، وارتفاع تكاليف الإصلاح الطارئ، وزيادة المخاطر المرورية.[3]
تعتمد إدارة صيانة الطرق في أغلب النظم التقليدية على أساليب تخطيط ثابتة وقرارات تعتمد على الخبرة البشرية أو التدخل بعد وقوع الضرر[4]، وهو ما يجعل هذه النظم عاجزة عن التنبؤ المبكر بتدهور حالة الطرق أو ترتيب أولويات الصيانة بشكل علمي دقيق. كما أن غياب التكامل بين البيانات المتاحة حول حالة الطرق وحركة المرور وسجلات الصيانة السابقة يؤدي إلى قرارات جزئية لا تحقق الاستخدام الأمثل للموارد، وتُكرّس الطابع التفاعلي بدل الوقائي في إدارة الصيانة [5].
في هذا السياق، برز الذكاء الاصطناعي بوصفه أحد أكثر الأدوات التقنية قدرةً على معالجة المشكلات المعقدة التي تتسم بتعدد المتغيرات وتشابك العلاقات، لما يتيحه من إمكانيات تحليل كميات كبيرة من البيانات، واستخلاص أنماط خفية، وبناء نماذج تنبؤية داعمة لاتخاذ القرار [6]. وقد أتاح التطور في تقنيات التعلم الآلي وتحليل البيانات إمكانية الانتقال من إدارة صيانة الطرق بوصفها عملية رد فعل إلى كونها منظومة ذكية استباقية تقوم على التنبؤ، وتحديد المخاطر، وترتيب الأولويات وفق معايير موضوعية [7].وانطلاقًا من ذلك، تبرز الحاجة إلى تطوير نموذج إداري ذكي لإدارة صيانة الطرق، يعتمد على توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في دمج البيانات وتحليلها، ودعم صانعي القرار بنظام متكامل يحقق كفاءة أعلى في التخطيط، ويقلل من الهدر في الموارد، ويعزز مستوى السلامة وجودة البنية التحتية. ولا يهدف هذا البحث إلى استبدال الدور البشري في إدارة الصيانة، بل إلى إعادة صياغته ضمن إطار ذكي يرفع من دقة القرارات ويزيد من فعاليتها .[8]وعليه، يسعى هذا البحث إلى تقديم نموذج تصوري مبتكر لإدارة صيانة الطرق باستخدام الذكاء الاصطناعي، يوضح مكوناته وآليات عمله، ويبرز دوره في تحسين كفاءة الصيانة وتحقيق الاستدامة، بما يواكب التحولات الرقمية المعاصرة ويستجيب لمتطلبات الإدارة الحديثة للبنية التحتية.

مشكلة البحث:

على الرغم من الأهمية الحيوية لشبكات الطرق في دعم التنمية الاقتصادية والاجتماعية، إلا أن إدارة صيانة الطرق ما تزال في كثير من المؤسسات تعتمد على ممارسات تقليدية تتسم بالاعتماد المفرط على التدخل بعد وقوع الضرر، وضعف التخطيط الاستباقي، وغياب آليات دقيقة لترتيب أولويات الصيانة. ويترتب على ذلك ارتفاع تكاليف الإصلاح الطارئ، وتدهور متسارع لحالة الطرق، وتدنّي مستوى السلامة المرورية، فضلًا عن سوء توظيف الموارد المتاحة [9].
وتتمثل المشكلة بشكل أكثر وضوحًا في افتقار نظم إدارة صيانة الطرق إلى نماذج تحليلية قادرة على التعامل مع الكم الكبير من البيانات المرتبطة بحالة الطرق، مثل بيانات التلف السطحي، وحجم المرور، والظروف البيئية، وسجلات الصيانة السابقة، إذ تُستخدم هذه البيانات – إن وُجدت – بشكل مجزأ وغير مترابط، مما يؤدي إلى قرارات إدارية تقوم على التقدير الشخصي أكثر من اعتمادها على أسس علمية موضوعية .كما أن النماذج التقليدية المعتمدة في تخطيط الصيانة لا توفر القدرة على التنبؤ المبكر بتدهور حالة الطرق أو تقدير مستوى المخاطر المستقبلية، الأمر الذي يحول دون الانتقال إلى نمط الصيانة الوقائية، ويُبقي إدارة الصيانة في إطار ردّ الفعل بدل التنبؤ والتحكم. ويُضاف إلى ذلك محدودية استخدام التقنيات الذكية الحديثة، وعلى رأسها تقنيات الذكاء الاصطناعي، في دعم اتخاذ القرار داخل منظومات إدارة صيانة الطرق، رغم ما أثبتته هذه التقنيات من فاعلية في مجالات بنية تحتية أخرى .وعليه، تتحدد مشكلة البحث في غياب نموذج إداري ذكي متكامل لإدارة صيانة الطرق، يوظف تقنيات الذكاء الاصطناعي في تحليل البيانات، والتنبؤ بحالة الطرق، وترتيب أولويات الصيانة، ودعم القرار الإداري بشكل يحقق كفاءة أعلى في استخدام الموارد، ويحد من تدهور البنية التحتية، ويسهم في تحسين مستوى السلامة وجودة خدمات الطرق.

تساؤلات البحث:

ينطلق هذا البحث من التساؤل الرئيس الآتي:

ما مدى إمكانية تطوير نموذج ذكي لإدارة صيانة الطرق باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي بما يسهم في تحسين كفاءة التخطيط وترتيب أولويات الصيانة ودعم اتخاذ القرار؟

ويتفرع عن هذا التساؤل الرئيس مجموعة من التساؤلات الفرعية:

1. ما أوجه القصور في النظم التقليدية المعتمدة حاليًا في إدارة صيانة الطرق من حيث التخطيط واتخاذ القرار؟
2. ما أنواع البيانات اللازمة لبناء نموذج ذكي فعال لإدارة صيانة الطرق، وكيف يمكن دمجها وتحليلها ضمن إطار واحد؟
3. كيف يمكن توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في التنبؤ بتدهور حالة الطرق وتحديد مستويات الخطورة؟
4. إلى أي مدى يسهم النموذج المقترح في تحسين ترتيب أولويات الصيانة مقارنة بالأساليب التقليدية؟
5. ما دور النموذج الذكي المقترح في ترشيد استخدام الموارد المالية والبشرية المخصصة لصيانة الطرق؟
6. ما المتطلبات التنظيمية والتقنية اللازمة لتطبيق نموذج إدارة صيانة الطرق القائم على الذكاء الاصطناعي؟
7. ما أبرز التحديات المحتملة التي قد تواجه تطبيق النموذج المقترح، وكيف يمكن الحد من آثارها؟

أهداف البحث:

يهدف هذا البحث إلى تحقيق مجموعة من الأهداف العلمية والتطبيقية، تتمثل فيما يلي:

1. تحليل واقع إدارة صيانة الطرق والكشف عن أوجه القصور في النماذج التقليدية المعتمدة في التخطيط واتخاذ القرار.

2. تحديد المتغيرات والبيانات الأساسية المؤثرة في حالة الطرق وصيانتها، وبناء إطار تحليلي لدمجها ضمن منظومة واحدة.
3. توضيح كيفية توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في التنبؤ بتدهور حالة الطرق وتقدير مستويات الخطورة المستقبلية.
4. تطوير نموذج تصوري ذكي لإدارة صيانة الطرق يعتمد على التحليل التنبئي وترتيب أولويات الصيانة بشكل علمي.
5. تقييم دور النموذج المقترح في تحسين كفاءة استخدام الموارد المالية والبشرية المخصصة لأعمال الصيانة.
6. دعم صانعي القرار بنموذج إداري يساهم في الانتقال من أسلوب الصيانة التفاعلية إلى الصيانة الوقائية.
7. الإسهام في تقديم إطار علمي يمكن تطويره لاحقًا وتطبيقه في مؤسسات إدارة الطرق وفق السياقات المحلية المختلفة.

أهمية البحث:

1. **الأهمية العلمية:** تنبع الأهمية العلمية لهذا البحث من كونه يسهم في إثراء الأدبيات العلمية المتعلقة بإدارة البنية التحتية، من خلال تقديم نموذج إداري حديث يدمج بين مفاهيم إدارة صيانة الطرق وتقنيات الذكاء الاصطناعي. كما يقدم البحث معالجة تحليلية تتجاوز الطرح الوصفي التقليدي نحو بناء نموذج تصوري قائم على التحليل التنبئي ودعم القرار، بما يعزز الاتجاهات الحديثة في البحث العلمي المرتبطة بالإدارة الذكية للبنى التحتية.
2. **الأهمية التطبيقية:** تتجلى الأهمية التطبيقية للبحث في إمكانية الاستفادة من النموذج المقترح من قبل الجهات المسؤولة عن إدارة وصيانة الطرق، مثل البلديات وهيئات الطرق، لما يوفره من أداة داعمة لاتخاذ القرار تساعد على:
   - تحسين ترتيب أولويات الصيانة وفق معايير موضوعية.
   - تقليل تكاليف الصيانة الطارئة.
   - رفع مستوى السلامة المرورية.
   - ترشيد استخدام الموارد المالية والبشرية.

الأهمية التخطيطية والتنموية: يسهم البحث في دعم التوجه نحو التحول الرقمي في إدارة المرافق العامة، من خلال إبراز دور الذكاء الاصطناعي في تعزيز كفاءة التخطيط الحضري وتحقيق الاستدامة في إدارة البنية التحتية للطرق، بما ينسجم مع متطلبات التنمية الحديثة وتحسين جودة الخدمات العامة.

مصطلحات البحث:

1. **إدارة صيانة الطرق:** هي مجموعة العمليات الإدارية والتخطيطية التي تهدف إلى الحفاظ على كفاءة شبكة الطرق وسلامتها، من خلال مراقبة حالتها، وتحديد احتياجات الصيانة، وتنفيذ أعمال الإصلاح في التوقيت المناسب وبأقل تكلفة ممكنة، بما يضمن استدامة البنية التحتية وتحسين مستوى الخدمة. [10]
2. **صيانة الطرق:** تشمل جميع الأنشطة الوقائية والدورية والطارئة التي تُنفذ لمعالجة تلف الطرق أو الحد من تدهورها، مثل معالجة التشققات والحفر وتحسين سطح الطريق، بهدف إطالة العمر الافتراضي للطريق وضمان السلامة المرورية[11].
3. **الذكاء الاصطناعي(Artificial Intelligence)**: هو مجموعة من التقنيات والأنظمة الحاسوبية التي تُمكّن الحاسوب من محاكاة بعض أنماط التفكير البشري، مثل التعلم والتحليل واتخاذ القرار، اعتمادًا على معالجة البيانات واكتشاف الأنماط دون تدخل بشري مباشر في كل خطوة.[12]
4. **التعلم الآلي**: أحد فروع الذكاء الاصطناعي، ويعتمد على تطوير خوارزميات قادرة على التعلم من البيانات السابقة وتحسين أدائها تلقائيًا، ويُستخدم في هذا البحث للتنبؤ بتدهور حالة الطرق وترتيب أولويات الصيانة. [13]
5. **النموذج الذكي:** إطار تصوري أو تحليلي يعتمد على تقنيات الذكاء الاصطناعي في معالجة البيانات ودعم اتخاذ القرار، ويُستخدم في هذا البحث لوصف نموذج مقترح لإدارة صيانة الطرق بشكل استباقي ومنهجي [15] , [14] .
6. **ترتيب أولويات الصيانة:** عملية تنظيم وتحديد الأعمال الأكثر إلحاحًا في صيانة الطرق وفق معايير محددة، مثل مستوى التلف، درجة الخطورة، حجم المرور، والتكلفة، بهدف تحقيق الاستخدام الأمثل للموارد المتاحة. [16]
7. **الدعم القراري(Decision Support)** : استخدام أدوات تحليلية وتقنية لمساندة متخذي القرار في اختيار البدائل الأنسب، من خلال توفير معلومات دقيقة وتوقعات مستقبلية تساعد على تقليل عدم اليقين في القرارات الإدارية . [17]
8. **الصيانة الوقائية:** نوع من الصيانة يتم تنفيذه قبل حدوث التلف الكبير في الطريق، اعتمادًا على التنبؤ والتحليل المسبق، بهدف تقليل الأعطال المفاجئة وخفض تكاليف الإصلاح الطارئ. [18]
9. **البيانات الطرقية:** المعلومات المرتبطة بحالة الطرق، مثل مستوى التلف، كثافة المرور، العوامل البيئية، وسجلات الصيانة السابقة، والتي تُستخدم كمدخلات أساسية في النموذج الذكي المقترح. [19]

منهجية البحث:

اعتمد البحث على المنهج الوصفي التحليلي ضمن إطار البحث المكتبي، وذلك من خلال تحليل الأدبيات العلمية والدراسات السابقة والنماذج النظرية ذات الصلة بإدارة صيانة الطرق وتقنيات الذكاء الاصطناعي [15] ,[14]. كما تم توظيف المنهج

التصميمي المفاهيمي لتطوير نموذج تصوري ذكي لإدارة صيانة الطرق، دون الاعتماد على بيانات ميدانية أو تطبيقات عملية، وبهدف تقديم إطار نظري داعم لاتخاذ القرار الإداري.

حدود البحث:

الحدود الموضوعية:

اقتصر البحث على دراسة إدارة صيانة الطرق وتطوير نموذج تصوري قائم على الذكاء الاصطناعي، دون التطرق إلى الجوانب البرمجية أو التنفيذية للنظام.

الحدود المنهجية:

اعتمد البحث على المصادر المكتبية فقط، من كتب، ودراسات علمية، وتقارير متخصصة، دون استخدام أدوات جمع بيانات ميدانية.

الحدود المكانية:

لم يُقيَّد البحث بنطاق جغرافي محدد، بل طُرح كنموذج عام قابل للتكييف وفق خصوصية البيئات المختلفة.

الحدود الزمنية:

تناول البحث المفاهيم والنماذج الحديثة المرتبطة بإدارة صيانة الطرق في ضوء التطورات المعاصرة في تقنيات الذكاء الاصطناعي.

الدراسات السابقة

تناولت دراسة Chen وآخرين [4] تطوير وتطبيق نظام ذكي للتعرف الآلي على عيوب الطرق الريفية وإدارة صيانتها، في ظل التوسع المستمر لشبكات الطرق الريفية وصعوبة إدارتها بالأساليب التقليدية. اعتمدت الدراسة على تقنيات الرؤية الحاسوبية، واستخدمت خوارزمية U-Net لتدريب نموذج قادر على التعرف على عيوب سطح الطريق بدقة عالية. كما طوّر الباحثون منصة إدارية تتيح إدارة ديناميكية لبيانات العيوب وأعمال الصيانة. وأظهرت النتائج تحسنًا ملحوظًا في سرعة ودقة تشخيص تلف الطرق، مما يعكس فعالية الأنظمة الذكية في دعم قرارات الصيانة. وتنسجم هذه الدراسة مع توجه البحث الحالي في إبراز دور الذكاء الاصطناعي في الانتقال من المعالجة التقليدية إلى الإدارة الذكية لصيانة الطرق.

ناقشت دراسة Philip وAlJassmi [16] منهجية قائمة على الذكاء الاصطناعي لتحسين جدولة برامج صيانة الطرق في ظل محدودية ميزانيات الجهات المسؤولة عن البنية التحتية. اعتمدت الدراسة على نماذج الشبكات البايزية لتحليل مؤشرات أداء الطرق، مثل التشققات والتموجات ومؤشر الوعورة الدولية والانحرافات الهيكلية. وقورنت نتائج النموذج الذكي بأسلوب التحليل الإحصائي التقليدي، حيث أظهرت النتائج تقارب الاستنتاجات مع تفوق النماذج الذكية في تحليل العلاقات المعقدة بين مؤشرات التلف. وتبرز أهمية هذه الدراسة في دعم القرارات الاستراتيجية الخاصة بترتيب أولويات الصيانة، بما ينسجم مع أهداف البحث الحالي في تطوير نموذج ذكي لإدارة صيانة الطرق.

قدّم Mukherjee وآخرون (2021) [9] دراسة ركزت على توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي ورؤية الحاسوب في أتمتة أعمال فحص وصيانة البنية التحتية للطرق، باعتبار أن عمليات التفتيش التقليدية تتسم بكثافة العمل البشري وارتفاع التكلفة. اعتمدت الدراسة على خوارزميات متقدمة في الكشف عن الأجسام والتجزئة الدلالية لتحليل عناصر الطريق الأساسية، مثل سطح الطريق، والعلامات المرورية، والحواجز، وإشارات المرور. وأظهرت النتائج قدرة النماذج الذكية المقترحة على تحسين كفاءة عمليات التفتيش ورفع مستوى الدقة مقارنة بالفحص اليدوي، فضلًا عن إمكانية توسيع نطاق عمليات الصيانة وتقليل الاعتماد على الجهد البشري. وتبرز أهمية هذه الدراسة في تأكيد الدور المحوري للذكاء الاصطناعي في دعم عمليات صيانة الطرق من خلال التحليل الآلي للبيانات البصرية.

إلى تطوير نظام ذكي لإدارة وصيانة الطرق، يركز على أتمتة عملية مسح الطرق وتحديد العيوب واقتراح نوع الصيانة المناسبة. اعتمد النظام على تقنيات الذكاء الاصطناعي للكشف عن العيوب باستخدام خوارزميات التعرف على الأجسام، إلى جانب قياس أبعاد العيوب بدقة عبر أدوات الرؤية الحاسوبية. كما عالجت الدراسة إشكالية التبليغ عن مشاكل الطرق من خلال تصميم واجهة إلكترونية تتيح للمستخدمين إرسال البلاغات مدعومة بالصور. وأسهمت الدراسة في دمج الجوانب التقنية والإدارية لإدارة الصيانة، إلا أنها ركزت على التطبيق البرمجي أكثر من تقديم نموذج إداري شامل، وهو ما يسعى البحث الحالي إلى معالجته من خلال طرح نموذج تصوري داعم لاتخاذ القرار.[19] ,[18]

تعقيب على الدراسات السابقة

يتضح من استعراض الدراسات السابقة، المرتبة زمنيًا من الأحدث إلى الأقدم، أن الاهتمام بتوظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في مجال صيانة الطرق شهد تطورًا ملحوظًا خلال السنوات الأخيرة، حيث ركزت الدراسات الحديثة على استخدام الرؤية الحاسوبية والتعلم الآلي في الكشف الآلي عن عيوب الطرق وتحسين دقة الفحص وجدولة أعمال الصيانة. وقد أسهمت هذه الدراسات في إثبات فعالية الحلول الذكية مقارنة بالأساليب التقليدية، خاصة من حيث تقليل الجهد البشري ورفع كفاءة تحليل البيانات .ومع ذلك، تُظهر معظم الدراسات السابقة تركيزًا واضحًا على الجوانب التقنية والتطبيقية للنظم الذكية، مثل خوارزميات الكشف، ونسب الدقة، وبناء الأنظمة البرمجية، في حين لم تحظَ الجوانب الإدارية المتكاملة لإدارة صيانة الطرق بالقدر الكافي من المعالجة، لا سيما ما يتعلق بدعم اتخاذ القرار وترتيب أولويات الصيانة ضمن إطار إداري شامل .ومن هنا، تبرز الفجوة البحثية التي يسعى هذا البحث إلى معالجتها، والمتمثلة في تطوير نموذج إداري ذكي لإدارة صيانة الطرق،

يوظف تقنيات الذكاء الاصطناعي بوصفها أداة داعمة للقرار، لا مجرد حل تقني مستقل، بما يحقق تكاملًا بين التحليل الذكي والتخطيط الإداري، ويسهم في تحسين كفاءة إدارة البنية التحتية للطرق واستدامتها.

المبحث الأول: الإطار النظري لإدارة صيانة الطرق والذكاء الاصطناعي

المطلب الأول: مفهوم إدارة صيانة الطرق وأهميتها

تُعد إدارة صيانة الطرق أحد الركائز الأساسية في إدارة البنية التحتية، إذ تهدف إلى الحفاظ على كفاءة شبكة الطرق وضمان استمرارية أدائها الوظيفي من حيث السلامة والجودة. وتشمل هذه الإدارة مجموعة متكاملة من الأنشطة، تبدأ بمراقبة حالة الطريق وتقييم مستوى التلف، مرورًا بالتخطيط والتنفيذ، وانتهاءً بمتابعة الأداء وتحسينه بصورة مستمرة، بما يحقق الاستدامة ويحد من التدهور المبكر لشبكات الطرق(PIARC, 2019) .

تكمن أهمية إدارة صيانة الطرق في دورها المباشر في إطالة العمر الافتراضي للطريق وتقليل التكاليف الاقتصادية على المدى الطويل، حيث تؤكد الأدبيات أن الاعتماد على الصيانة الوقائية يساهم في خفض النفقات مقارنة بالصيانة الطارئة التي تُنفذ بعد تفاقم الضرر. كما ترتبط الصيانة الفعالة بتحسين مستوى السلامة المرورية وتقليل الحوادث وتعزيز كفاءة النقل والخدمات اللوجستية.(World Bank, 2020)

المطلب الثاني: أنماط صيانة الطرق وأساليب إدارتها التقليدية

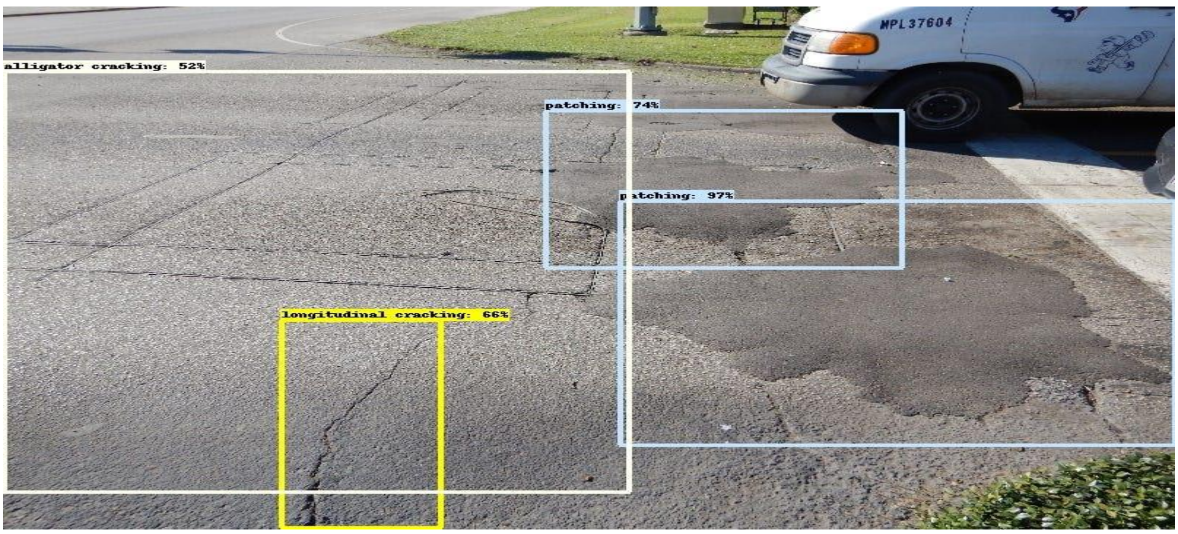
تنقسم صيانة الطرق إلى أنماط رئيسية تشمل الصيانة الوقائية، والصيانة الدورية، والصيانة الطارئة، ويُحدد اختيار النمط المناسب وفق حالة الطريق ومستوى التلف والموارد المتاحة. وتهدف الصيانة الوقائية إلى الحد من تطور العيوب قبل تفاقمها، في حين تركز الصيانة الدورية على معالجة الأضرار المتوسطة بشكل منتظم، بينما تُنفذ الصيانة الطارئة لمعالجة الأعطال المفاجئة التي تهدد سلامة مستخدمي الطريق(Haas, Hudson & Zaniewski, 2015) .

تعتمد الأساليب التقليدية في إدارة صيانة الطرق غالبًا على الفحص اليدوي والخبرة الشخصية في اتخاذ القرار، مع محدودية الاعتماد على البيانات التحليلية أو النماذج التنبؤية. ويؤدي هذا الأسلوب إلى ضعف دقة تشخيص حالة الطريق، وتأخر التدخلات اللازمة، وسوء ترتيب أولويات الصيانة، مما ينعكس سلبًا على كفاءة استخدام الموارد ويزيد من الأعباء المالية على الجهات المسؤولة.
(FHW, 2018)

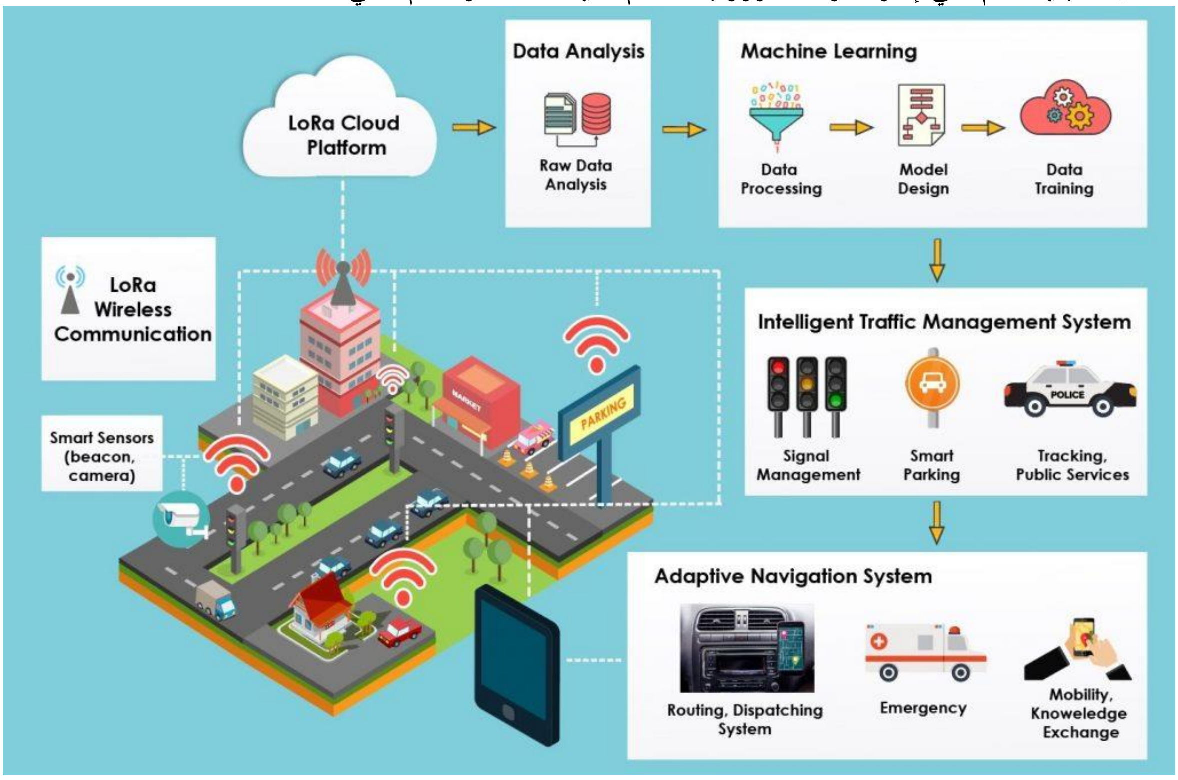
المطلب الثالث: الذكاء الاصطناعي ودوره في تطوير إدارة صيانة الطرق

يمثل الذكاء الاصطناعي أحد أبرز مخرجات التحول الرقمي في إدارة البنية التحتية، لما يوفره من قدرات متقدمة في تحليل البيانات الضخمة واكتشاف الأنماط المعقدة. وقد أتاح هذا التطور إمكانية معالجة بيانات متعددة المصادر، مثل صور الطرق، وحركة المرور، والظروف البيئية، بما يدعم بناء نماذج تنبؤية دقيقة لحالة الطرق [12].يسهم توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في إدارة صيانة الطرق في دعم الانتقال من الإدارة التفاعلية إلى الإدارة الاستباقية، من خلال التنبؤ بمستويات التدهور المستقبلية وترتيب أولويات الصيانة وفق معايير موضوعية قائمة على مستوى الخطورة والتكلفة. كما يعزز الذكاء الاصطناعي من جودة القرار الإداري عبر تقليل الاعتماد على التقدير الشخصي، وتحسين كفاءة التخطيط واستخدام الموارد [4].

الشكل 1: الكشف عن عيوب متعددة في رصف الطرق الإسفلتية باستخدام التعلم العميق



الشكل 2: بنية نظام ذكي لإدارة حركة المرور باستخدام تقنية LoRa والتعلم الآلي

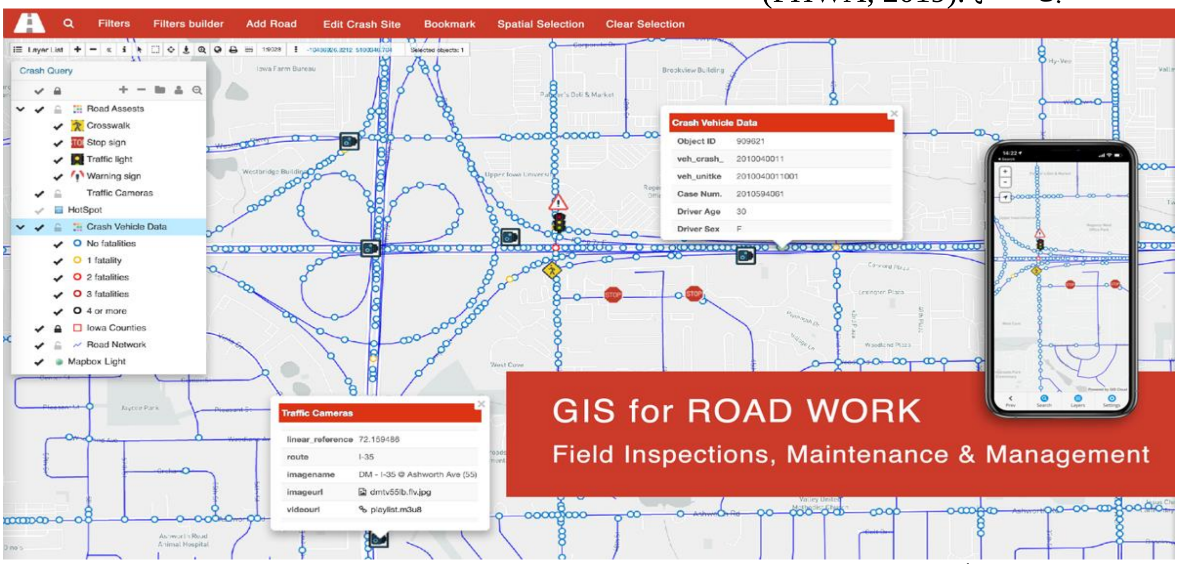


المبحث الثاني: توظيف الذكاء الاصطناعي في تطوير إدارة صيانة الطرق

المطلب الأول: البيانات ودورها في إدارة صيانة الطرق الذكية

تُعد البيانات الأساس الذي تقوم عليه نظم إدارة صيانة الطرق الحديثة، إذ تعتمد فعالية أي نموذج ذكي على جودة البيانات ودقتها وتنوع مصادرها. وتشمل هذه البيانات معلومات تتعلق بحالة سطح الطريق، وأنواع العيوب، وكثافة المرور، والعوامل البيئية، وسجلات الصيانة السابقة، ويسهم دمج هذه البيانات في تكوين رؤية شاملة لحالة شبكة الطرق بما يدعم التخطيط السليم واتخاذ القرار المبني على أسس علمية.(World Bank, 2020)

وتعاني النظم التقليدية لإدارة صيانة الطرق من صعوبات واضحة في التعامل مع البيانات، حيث غالبًا ما تكون هذه البيانات غير محدثة أو مجزأة أو غير مستثمرة بالشكل الأمثل. وقد أتاح التطور في تقنيات الذكاء الاصطناعي إمكانية معالجة كميات كبيرة من البيانات المتنوعة وتحليلها بكفاءة عالية، الأمر الذي يساعد في التنبؤ بتدهور حالة الطرق وتحسين دقة تشخيص المشكلات قبل تفاقمها.(FHWA, 2019)

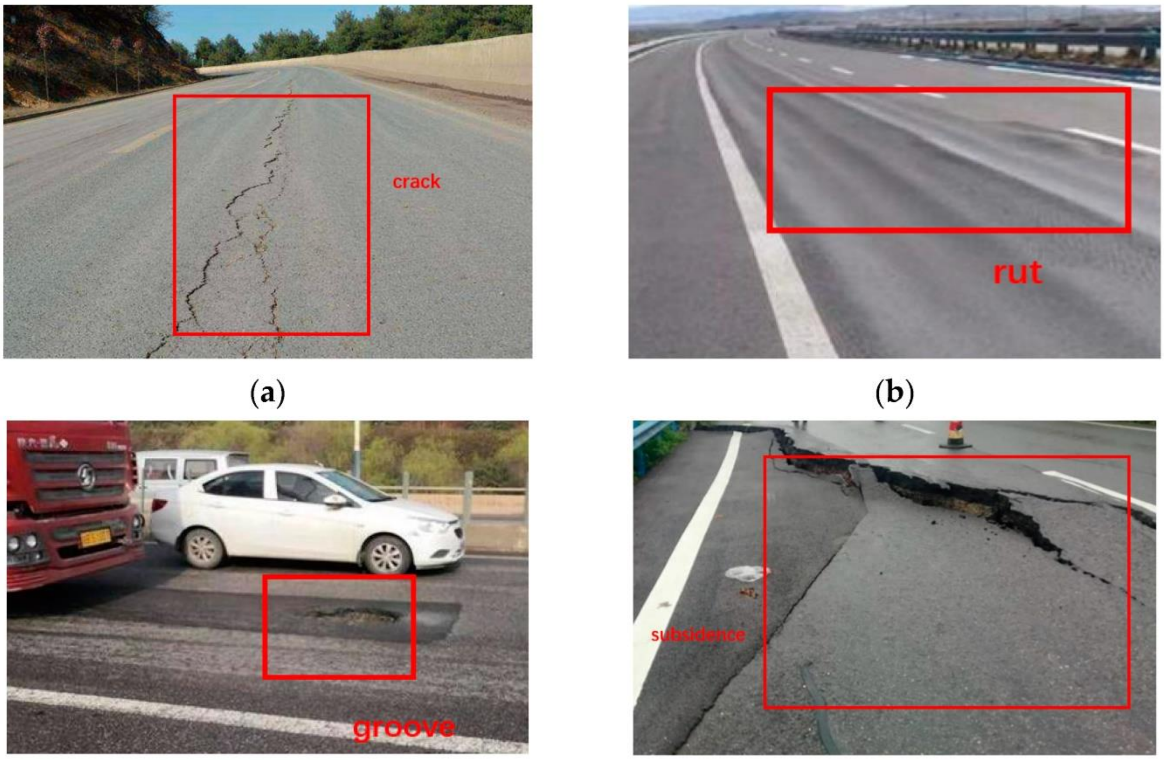


الشكل 3: نظام إدارة أصول الطرق القائم على نظم المعلومات الجغرافية لصيانة الطرق، والتفتيش الميداني، ومراقبة السلامة المرورية

المطلب الثاني: تقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في صيانة الطرق

تتنوع تقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في مجال صيانة الطرق، ويُعد التعلم الآلي من أبرز هذه التقنيات، حيث يُستخدم في تحليل البيانات التاريخية لحالة الطرق والتنبؤ بالحالة المستقبلية لسطح الطريق. كما تسهم خوارزميات التصنيف والتنبؤ في تحديد مستويات الخطورة وترتيب أولويات الصيانة، بما يعزز كفاءة التخطيط ويقلل من القرارات العشوائية [12].

وتُعد تقنيات الرؤية الحاسوبية من أكثر التطبيقات انتشارًا في فحص الطرق، إذ تعتمد على تحليل الصور والفيديوهات لاكتشاف التشققات والحفر والعيوب السطحية بدقة عالية. وقد أثبتت الدراسات أن دمج الرؤية الحاسوبية مع خوارزميات التعلم العميق يحقق نتائج أكثر دقة وسرعة مقارنة بأساليب الفحص اليدوي التقليدية، مع تقليل الوقت والتكلفة التشغيلية[9]

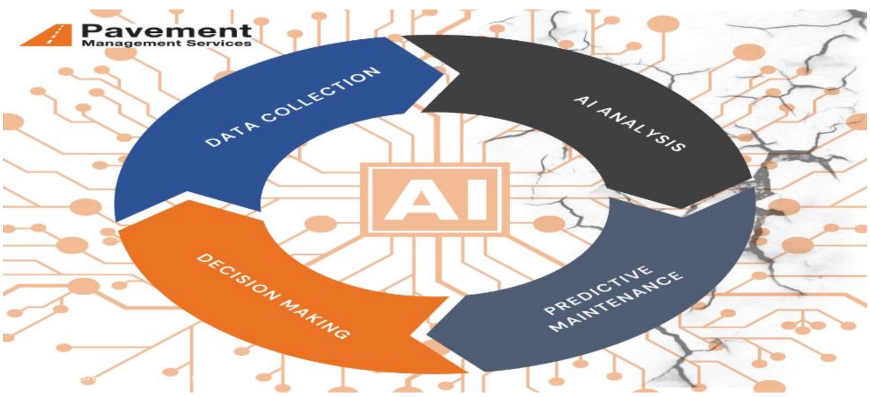


الشكل 4. أنواع نموذجية من عيوب رصف الطرق المستخدمة في الكشف الآلي وتقييم الحالة

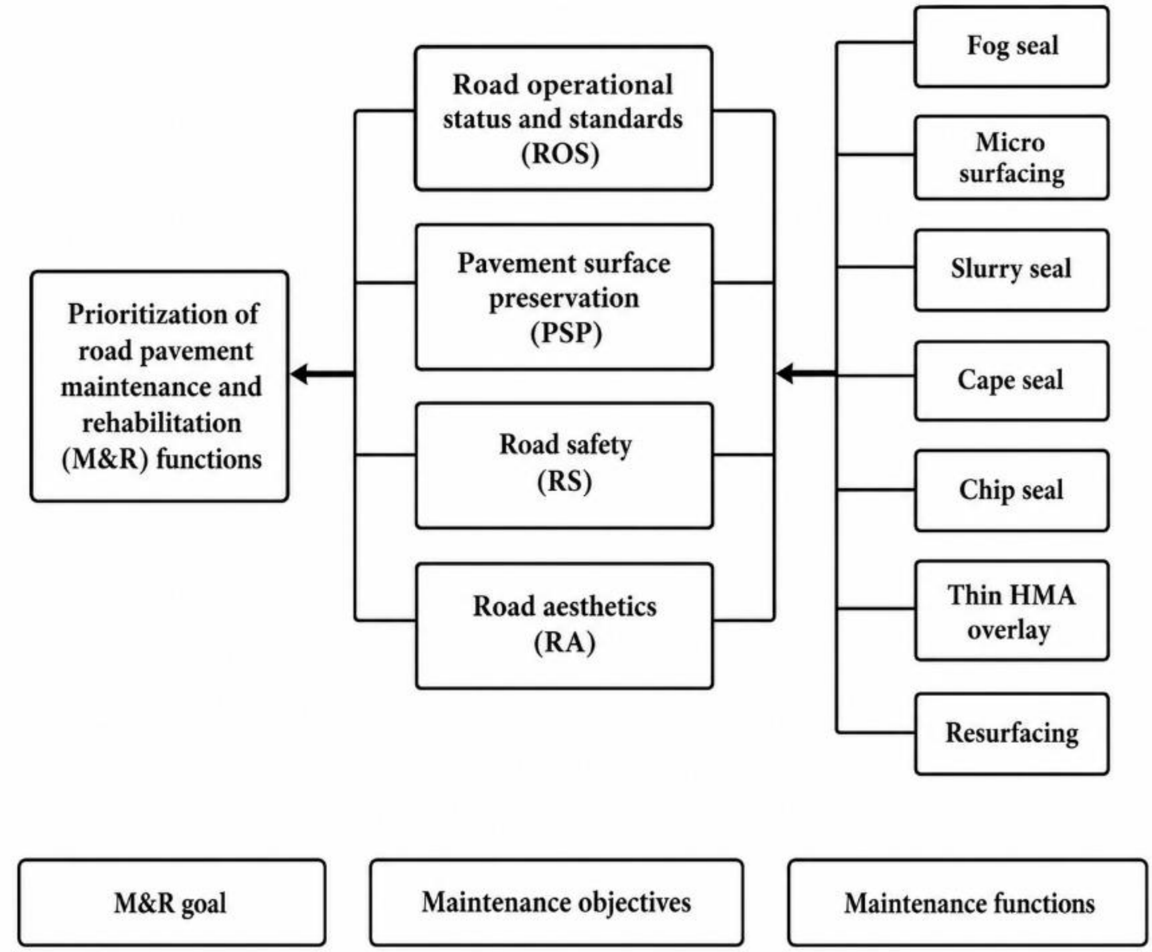
المطلب الثالث: دور الذكاء الاصطناعي في دعم اتخاذ القرار وترتيب أولويات الصيانة

يسهم الذكاء الاصطناعي في تطوير إدارة صيانة الطرق من خلال توفير نظم داعمة لاتخاذ القرار تعتمد على التحليل التنبئي بدلاً من الاستجابة المتأخرة للأعطال. وتساعد هذه النظم في تقدير احتمالات تدهور حالة الطريق خلال فترات زمنية مستقبلية، وتحديد المقاطع الأكثر عرضة للمخاطر، مما يعزز التحول نحو الصيانة الوقائية المخططة [8].

كما يتيح الذكاء الاصطناعي إمكانية ترتيب أولويات الصيانة وفق معايير موضوعية تشمل درجة الخطورة، وحجم المرور، والتكلفة الاقتصادية، بدلًا من الاعتماد على التقدير الشخصي أو الاعتبارات غير الفنية. ويسهم هذا التوجه في تحسين توزيع الموارد المالية والبشرية ورفع كفاءة الأداء العام لإدارة صيانة الطرق، بما يدعم استدامة البنية التحتية [4], [19], [20], [21], [22].



الشكل 5: إطار عمل لإدارة رصف الطرق باستخدام الذكاء الاصطناعي لجمع البيانات وتحليلها والصيانة التنبؤية واتخاذ القرارات



الشكل 6: الإطار الهرمي لأهداف وغايات ووظائف صيانة رصف الطرق وإعادة تأهيلها

المبحث الثالث: النموذج الذكي المقترح لإدارة صيانة الطرق

المطلب الأول: الإطار العام للنموذج الذكي المقترح

يقوم النموذج الذكي المقترح لإدارة صيانة الطرق على دمج المبادئ الإدارية الحديثة مع قدرات الذكاء الاصطناعي [26] ,[25] , [19],[24]،[32] ,[31] [33] , بهدف دعم اتخاذ القرار وتحسين كفاءة التخطيط والصيانة. ويُنظر إلى هذا النموذج بوصفه إطارًا إداريًا تحليليًا يعتمد على جمع البيانات ومعالجتها وتحويلها إلى مؤشرات تساعد الجهات المسؤولة على فهم حالة شبكة الطرق واتخاذ القرارات المناسبة في الوقت المناسب، بعيدًا عن الأساليب التقديرية التقليدية [7], [23].

ويرتكز النموذج على فكرة الانتقال من الصيانة التفاعلية إلى الصيانة الاستباقية، من خلال التنبؤ بمستويات التدهور المحتملة قبل حدوثها فعليًا. ويتيح هذا التوجه للإدارة إمكانية التخطيط المسبق وتحديد التدخلات المثلى، بما يحقق الاستخدام الأمثل للموارد ويقلل من التكاليف طويلة المدى، وهو ما يتوافق مع التوجهات الحديثة في إدارة الأصول والبنية التحتية ,[24]. [27], [28], [29], [30], [31]

المطلب الثاني: مكونات النموذج الذكي المقترح

يتكون النموذج الذكي المقترح من مجموعة من المكونات المتكاملة، تبدأ بمرحلة جمع البيانات التي تشمل بيانات حالة الطرق، وحركة المرور، والعوامل البيئية، وسجلات الصيانة السابقة. وتُعد هذه البيانات المدخل الأساسي للنموذج، حيث يتم تنظيمها ومعالجتها بما يضمن دقتها وقابليتها للتحليل، وهو ما يشكل أساسًا لأي قرار إداري فعال في مجال صيانة الطرق.[2].

وتتمثل المرحلة الثانية في المعالجة الذكية للبيانات، حيث تُستخدم تقنيات التحليل التنبئي لاستخلاص الأنماط والعلاقات بين المتغيرات المختلفة، وتقدير احتمالات تدهور حالة الطرق. وتُعد هذه المرحلة جوهر النموذج المقترح، إذ تسهم في تحويل البيانات الخام إلى معرفة تحليلية يمكن الاعتماد عليها في دعم القرار الإداري [13].

أما المرحلة الأخيرة فتتمثل في مخرجات النموذج، والتي تشمل تقارير تحليلية، ومؤشرات أداء، وقوائم ترتيب أولويات الصيانة، تُقدَّم للإدارة العليا بصيغة مبسطة تساعد على اتخاذ قرارات دقيقة وموضوعية. ويُراعى في هذه المرحلة ربط المخرجات بالأهداف الاستراتيجية للجهة المسؤولة عن إدارة الطرق، بما يعزز فاعلية النموذج وقابليته للتطبيق [1]

المطلب الثالث: آلية عمل النموذج ودوره في دعم اتخاذ القرار

تعتمد آلية عمل النموذج الذكي المقترح على الربط المنهجي بين البيانات والتحليل والقرار، حيث يتم تحديث البيانات بشكل دوري، وإعادة تحليلها في ضوء المتغيرات الجديدة، بما يضمن استمرارية دقة النتائج. ويسهم هذا الأسلوب في توفير قاعدة معرفية متجددة تساعد متخذي القرار على متابعة حالة الطرق بصورة مستمرة بدلًا من الاعتماد على تقارير متقطعة أو غير محدثة [10].

كما يدعم النموذج عملية ترتيب أولويات الصيانة من خلال استخدام معايير موضوعية، مثل درجة الخطورة، وتأثير التلف على السلامة المرورية، والكلفة الاقتصادية، مما يقلل من التدخلات العشوائية ويعزز الشفافية في اتخاذ القرار. ويُعد هذا الجانب من أبرز مزايا النموذج، حيث يحقق التوازن بين المتطلبات الفنية والإدارية في إدارة صيانة الطرق[3].

المطلب الرابع: مزايا النموذج المقترح وإمكانات تطويره

يتميز النموذج الذكي المقترح بعدة مزايا، من أبرزها تحسين كفاءة التخطيط، وترشيد الموارد، ودعم التحول نحو الإدارة الذكية للبنية التحتية. كما يتيح النموذج مرونة عالية في التكيّف مع اختلاف البيئات الجغرافية والإدارية، مما يجعله قابلًا للتطوير والتطبيق وفق خصوصية كل جهة مسؤولة عن إدارة الطرق [18] , [19].

ويمكن تطوير النموذج مستقبلًا من خلال دمجه مع نظم المعلومات الجغرافية أو توسيع نطاق البيانات المستخدمة، بما يعزز قدرته التحليلية ودقته التنبؤية. إلا أن البحث الحالي يقتصر على تقديم نموذج تصوري إداري، دون الدخول في الجوانب التقنية أو البرمجية التفصيلية، حفاظًا على طبيعته كبحث مكتبي موجه لدعم القرار الإداري. [7] , [6] , [5]

النتائج:

توصل البحث إلى أن أساليب إدارة صيانة الطرق التقليدية تعاني من قصور واضح في التخطيط المسبق، حيث تعتمد في الغالب على التدخل بعد حدوث التلف بدلًا من العمل الوقائي، الأمر الذي يؤدي إلى ارتفاع تكاليف الصيانة وتراجع كفاءة استخدام الموارد المتاحة. كما أظهر التحليل أن هذا الأسلوب يحد من قدرة الجهات المسؤولة على ترتيب أولويات الصيانة بصورة موضوعية.

وبيّن البحث أن توظيف الذكاء الاصطناعي في إدارة صيانة الطرق يتيح إمكانات واسعة لتحليل البيانات المتنوعة المرتبطة بحالة الطرق، والتنبؤ بمستويات التدهور المستقبلية، بما يسهم في تحسين دقة القرار الإداري ودعم الانتقال من الإدارة التفاعلية إلى الإدارة الاستباقية.

كما أظهرت نتائج البحث أن النموذج الذكي المقترح يمثّل إطارًا إداريًا متكاملًا يمكن الاعتماد عليه في دعم متخذي القرار في مجال صيانة الطرق، دون الحاجة إلى تطبيق تقني مباشر، حيث يركّز على تحسين التخطيط وترتيب الأولويات وترشيد الموارد في إطار منهجي منظم.

الاستنتاج:

يستنتج البحث أن الاعتماد المستمر على الأساليب التقليدية في إدارة صيانة الطرق لم يعد كافيًا لمواجهة التحديات المتزايدة المرتبطة بتوسع شبكات الطرق وتعقيد متطلبات إدارتها. كما يتضح أن الذكاء الاصطناعي لا يقتصر دوره على الجانب التقني فقط، بل يُعد مدخلًا إداريًا حديثًا يسهم في إعادة صياغة عملية اتخاذ القرار على أسس تحليلية وتنبؤية أكثر كفاءة.

ويخلص البحث إلى أن تطوير نموذج ذكي لإدارة صيانة الطرق يسد فجوة واضحة في الطرح الإداري، من خلال تقديم إطار تصوري يربط بين البيانات والتحليل والقرار، ويعزز من موضوعية التخطيط دون إلغاء الدور البشري، بل بدعمه ورفع كفاءته.

التوصيات:

في ضوء ما توصل إليه البحث من نتائج واستنتاجات، يوصي الباحث بما يلي:

1. اعتماد نماذج إدارية حديثة في إدارة صيانة الطرق تقوم على التحليل الذكي بدلًا من الأساليب التقديرية التقليدية.
2. تعزيز الاعتماد على البيانات في تخطيط أعمال الصيانة من خلال تنظيمها وتحديثها بصورة مستمرة.
3. التوجه نحو الصيانة الوقائية بوصفها خيارًا استراتيجيًا يسهم في تقليل التكاليف وتحسين كفاءة الأداء على المدى الطويل.
4. الاستفادة من النموذج الذكي المقترح بوصفه أداة داعمة لاتخاذ القرار الإداري في الجهات المسؤولة عن صيانة الطرق.
5. تشجيع الدراسات المستقبلية على تطوير النموذج المقترح وتطبيقه عمليًا أو دمجه مع أنظمة وتقنيات رقمية أخرى.

الخاتمة:

تناول هذا البحث موضوع تطوير نموذج ذكي لإدارة صيانة الطرق باستخدام الذكاء الاصطناعي، في إطار بحث مكتبي يهدف إلى تحليل الواقع القائم واستشراف آفاق التطوير الإداري في هذا المجال. وقد بيّن البحث أن الأساليب التقليدية المعتمدة

في إدارة صيانة الطرق لم تعد قادرة على الاستجابة بكفاءة للتحديات المتزايدة المرتبطة بتوسع شبكات الطرق وتعقيد متطلبات إدارتها، لما تعانيه من ضعف في التخطيط الاستباقي وترتيب الأولويات.

كما أظهر البحث أن الذكاء الاصطناعي يمثّل مدخلًا إداريًا حديثًا يمكن توظيفه لدعم اتخاذ القرار وتحسين كفاءة التخطيط وترشيد الموارد، من خلال الاعتماد على تحليل البيانات والتنبؤ بدلًا من ردّ الفعل المتأخر. وفي هذا السياق، تم تقديم نموذج ذكي تصوري لإدارة صيانة الطرق يربط بين البيانات والتحليل والقرار ضمن إطار إداري متكامل، دون الدخول في الجوانب التقنية أو التطبيقية التفصيلية.

ويخلص البحث إلى أن اعتماد النماذج الذكية في إدارة صيانة الطرق لا يعني إلغاء الدور البشري، بل يعزز من كفاءته ويزيد من موضوعية القرارات الإدارية، بما يسهم في تحسين جودة البنية التحتية وتحقيق الاستدامة. وبذلك، يشكّل هذا البحث إضافة علمية في مجال الإدارة الذكية للبنية التحتية، ويمهّد لدراسات مستقبلية يمكن أن تبني عليه وتطوّره في سياقات تطبيقية مختلفة.

المراجع:

1. AASHTO. (2020). Asset Management Guide: A Focus on Implementation. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
2. Asset Management Council. (2018). Asset Management Body of Knowledge. AMCouncil, Australia.
3. Bryce, J., Brodie, S., & Parlikad, A. (2022). Intelligent infrastructure asset management: Decision support and prioritization approaches. Infrastructure Asset Management, 9(2), 45–58.
4. Chen, L., Zhang, H., Li, D., Li, Y., Lou, J., & Fu, K. (2025). Development and application of an AI-based automatic identification system for rural road distress and maintenance management. Buildings, 15(23), 4222.
5. Farahani, R. Z., Rezapour, S., & Kardar, L. (2020). Logistics operations and management using artificial intelligence. Transportation Research Part E, 137, 101–118.
6. Fwa, T. F. (2017). Highway pavement maintenance and rehabilitation. World Scientific Publishing, Singapore.
7. Gharaibeh, N., & Lindholm, M. (2022). Data-driven approaches in infrastructure maintenance management. Journal of Infrastructure Systems, 28(3), 1–12.
8. Haas, R., Hudson, W. R., & Zaniewski, J. (2015). Modern pavement management. Krieger Publishing Company, Florida.
9. Mukherjee, R., Iqbal, H., Marzban, S., Zonooz, B., et al. (2021). AI driven road maintenance inspection. arXiv preprint, arXiv:2106.02567.
10. Neves, L. C., Frangopol, D. M., & Cruz, P. J. S. (2019). Risk-based decision support for infrastructure asset management. Structure and Infrastructure Engineering, 15(4), 483–499.
11. OECD. (2021). The role of artificial intelligence in public sector decision-making. OECD Publishing, Paris.
12. Russell, S., & Norvig, P. (2021). Artificial Intelligence: A Modern Approach (4th ed.). Pearson Education, New York.
13. Zhang, Z., & El-Diraby, T. (2021). Machine learning for infrastructure asset management: Frameworks and challenges. Automation in *Construction*, 125, 103–114.
14. Ben Dalla, L, O, F. (2021).Literature review (LR) on the powerful of Research methodology processes life cycle. In 2021 The Powerful of Research Methodology Processes Life Cycle Conference (TPRMPLCC) (pp. 1-10). IEEE. https://doi.org/10.16543/TPRMPLCC 50717.2020.92876580
15. Ben Dalla, L, O, F. (2021). Literature review (LR) on the dominant of Research methodology. Conference (LRDRMC) (pp. 1-14). IEEE. https://doi.org/10.6754/LRDRMC56412.2020.45987623
16. Philip, B., & AlJassmi, H. (2025). A methodology utilizing artificial intelligence to optimize road maintenance scheduling programs. In A. Akhnoukh, K. Kaloush, M. Souliman, & C. Chang (Eds.), Highway of the Future: Transforming Mobility and Road

Infrastructure (Sustainable Civil Infrastructures, pp. 235–251). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-032-03154-9_19

17. Dalla, L. O. F. B. (2020). Modeling by using Generic Modeling Environment (GME) Domain specific modeling language (DSL) for agile software development (ASD) types.
18. Maeda, H., Sekimoto, Y., Seto, T., Kashiyama, T., & Omata, H. (2018). Road damage detection and classification using deep neural networks with smartphone images. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 33(12), 1127–1141. https://doi.org/10.1111/mice.12387
19. Dalla, L. O. F. B. (2020). Lean Software Development Practices and Principles in Terms of Observations and Evolution Methods to increase work environment productivity. *International Journal of Engineering and Modern Technology*, *6*(1), 23-45.
20. Dalla, L. B., Karal, Ö., Essgaer, M., Swissi, Y., & El-Sseid, M. (2026, April). Minority-Class Internet of Things Anomaly Detection via Deep Learning Models Using CESNET-TimeSeries24 Dataset. In *2026 IEEE 5th International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA)* (pp. 385-392). IEEE.
21. Apaydın, M., Yumuş, M., Değirmenci, A., & Karal, Ö. (2022). Evaluation of air temperature with machine learning regression methods using Seoul City meteorological data. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *28*(5), 737-747.
22. Al Feki, E., & Neji, J. (2024). Statistical modelling to assessing and enhancing road traffic safety in Tripoli, Libya: A systematic approach. *Journal of Engineering Research*, *12*(4), 659-669.
23. فادية كارة. (2024). تقييم دقة نماذج الارتفاعات الرقمية العالمية & ,إيناس الفقي, عبد القادر الزوى, مني عيد لمدينة SRTM1 نوعDEM من بيانات المساحة الجوية (دراسة مقارنة بين مناسيب خريطة طبوغرافية وملفات الكفرة. *Arraid Journal of Science and Technology (AJST)*, *1*(1), 12-26.
24. Degirmenci, A., & Karal, O. (2018). Evaluation of kernel effects on svm classification in the success of wart treatment methods. *Am. J. Eng. Res*, *7*, 238-244.
25. Aisam Mohamed Albndag Hamza Ali.k. Krebish, Amir Ali Ali Algalal, Enass Mohamed. Al Feki. (2023). AN INVESTIGATION OF THE PROPERTIES, EFFECTS, AND HOW OF USING SAND IN CONSTRUCTION. SANDS OF WADI KAAM (ZLITEN, LIBYA) AND EASTERN SAND DUNES.International Science and Technology Journal
26. Muslu, E., & KARAL, Ö. Mathematical modeling of threats in electronic warfare systems Elektronik harp sistemleri'nde tehditlerin matematiksel modellenmesi.29th IEEE Conference on Signal Processing and Communications Applications, SIU 2021, Virtual, Istanbul, Turkey, 9 - 11 June 2021, (Full Text) 10.1109/siu53274.2021.9477995
27. Alquraidi, A., Awad, M., & Alzaatreh, A. (2026). Improving Utility Asset Management Performance Through an Integrated Lifecycle Approach. *IEEE Access*.
28. Osman, M., Elghaffi, F., Dalla, L. B., Karal, Ö., & Rashid, T. (2026). A New Approach for Low-Latency, High-Accuracy Anomaly Detection at the Edge: Benchmarking Quantized Autoencoders, LSTMs, and Lightweight Transformers on RT-IoT2022 Time-Series Traffic. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, 110-121.
29. Dalla, L. O. F. B., & AHMAD, T. M. A. (2024). THE DYNAMIC DELIVERY SERVICES BY USING ANT COLONY OPTIMIZATION ALGORITHM IN THE MODERN CITY BY USING PYTHON RAY SYSTEM..

30. Albaraesi, M. J. S., Ali, M. A. M. A., Dalla, L. O. B., EL-sseid, M. A. M., Medeni, T. D., Medeni, İ. T., & Alnnale, T. (2025). Random construction in the city of Al-Bayda during the period 2011-2022 and its irregular expansion and its impact on the urban landscape. Comprehensive Science Journal, 10 (Supplement 38), 2590-2614.
31. Ben Dalla et al., (2026). Resource-Efficient Dorsal Hand Vein Authentication: An Edge-Optimized Blockchain Framework for Sustainable Smart Cities.8th International Conference on Frontiers in Academic Research. July 16-17, 2026: Konya, Turkey. https://www.icfarconf.com/
32. Dalla, L. O. B., Karal, Ö., Degirmenci, A., EL-Sseid, M. A. M., Essgaer, M., & Alsharif, A. (2025). Edge Intelligence for Real-Time Image Recognition: A Lightweight Neural Scheduler Via Using Execution-Time Signatures on Heterogeneous Edge Devices. *Scientific Journal for Publishing in Health Research and Technology*, 74-85.
33. Alnnale, T. (2026). Predictive Governance in Digital Enterprises: An LSTM-Enhanced Deep Learning Framework for Economic Optimization of IT Incident Management Using Enriched Process Logs. *Al-Farooq Journal of Sciences*, *2*(3), 86-113.
34. Abdelalim, A. M., Essawy, A., Sherif, A., Salem, M., Al-Adwani, M., & Abdullah, M. S. (2025). Optimizing facilities management through artificial intelligence and digital twin technology in mega-facilities. *Sustainability*, *17*(5), 1826.