

تطبيق إستراتيجيات صيانة الطرق بإستخدام الذكاء الاصطناعي

إعداد الطالب/ محمد فوزى على بدوى

الرقم الأكاديمي / 243001161

إشراف/

د.فايز جراد

د.الفیصل عبد الحمید

العام الدراسي:

٢٠٢٥

مقدمة:

تُعد شبكات الطرق العمود الفقري للبنية التحتية في أي دولة، حيث تمثل الأساس الذي يُبنى عليه النشاط الاقتصادي والاجتماعي واللوجستي. فالتطرق تسهّل حركة الأفراد والبضائع، وتسهم في ربط المناطق الحضرية بالريفية، كما تدعم عمليات الطوارئ والخدمات الأساسية. ومع تزايد معدلات النمو السكاني والتوسع العمراني، ازداد الضغط على شبكات الطرق، مما أدى إلى تسارع وتيرة تدهورها وظهور مشكلات فنية تؤثر بشكل مباشر على كفاءة وسلامة النقل.

في هذا السياق، تبرز أهمية أعمال الصيانة الدورية والتأهيل المستمر كعنصر حاسم في الحفاظ على مستوى الخدمة المطلوب وضمان استدامة البنية التحتية للطرق. إلا أن إدارة عمليات الصيانة التقليدية تعاني من عدة تحديات، أبرزها محدودية الموارد المالية، والاعتماد على التقدير البشري، والتأخر في الاستجابة لتدهور البنية التحتية. كما أن اتخاذ القرار في هذا المجال يتطلب توازناً دقيقاً بين عدة عوامل، منها الكلفة والوقت ومدى التأثير على حركة المرور، الأمر الذي يجعل من الضروري تطوير آليات أكثر ذكاءً وفاعلية لإدارة الصيانة.

في العقود الأخيرة، شهد العالم ثورة تقنية هائلة تمثّلت في تطور الذكاء الاصطناعي، الذي أصبح أحد أبرز التوجهات التقنية الواعدة في جميع المجالات، لاسيما في قطاع البنية التحتية. حيث مكّنت تقنيات الذكاء الاصطناعي من تحليل كميات هائلة من البيانات، واستخلاص أنماط التدهور والتنبؤ بالمشكلات المستقبلية، مما ساعد على تحسين عمليات التخطيط واتخاذ القرار. ويمكن القول إن إدماج الذكاء الاصطناعي في استراتيجيات صيانة الطرق يمثل نقلة نوعية في كفاءة الإدارة الهندسية للطرق.

ينطلق هذا البحث من الحاجة المتزايدة لتوظيف الذكاء الاصطناعي في تطوير استراتيجيات أكثر فاعلية لصيانة وتأهيل الطرق الإسفلتية، من خلال استعراض الأساليب الحديثة مثل الشبكات العصبية الاصطناعية، وخوارزميات التعلم الآلي، ونماذج التنبؤ بالأداء، وذلك بهدف تحسين جودة القرارات المتعلقة بتوقيت ونوع الصيانة، وترشيد الموارد المالية، وتقليل الآثار السلبية على المستخدمين والبيئة.

كما يسعى البحث إلى تسليط الضوء على التطبيقات الواقعية لهذه التقنيات في عدد من الدول، واستكشاف مدى إمكانية تكييفها وتطبيقها في البيئات المحلية، مع تحديد المعوقات والتحديات التي قد تواجه عملية التحول الرقمي في هذا المجال. ويأمل الباحث من خلال هذا العمل أن يساهم في إثراء المعرفة العلمية والتطبيقية حول دمج الذكاء الاصطناعي في إدارة صيانة الطرق، بما يعزز من كفاءة واستدامة شبكات النقل في المستقبل.

مشكلة الدراسة:

تُمثل صيانة الطرق إحدى الركائز الأساسية في منظومة إدارة البنية التحتية للنقل، لما لها من دور محوري في ضمان استمرارية كفاءة وأمان شبكة الطرق، وتقليل التكاليف طويلة الأجل المرتبطة بالإصلاحات الجذرية أو إعادة الإنشاء. إلا أن الممارسة الفعلية لأنظمة الصيانة في معظم إدارات الطرق، خصوصًا في الدول النامية، لا تزال تعتمد بشكل كبير على أساليب تقليدية قد تكون غير فعالة، مثل المعايينات الميدانية اليدوية، والتقديرات الشخصية، والقرارات غير المبنية على تحليل بيانات شامل.

تعاني هذه الأنظمة التقليدية من قصور واضح في التعامل مع التغيرات السريعة في حالة الطرق، وعدم القدرة على التنبؤ الدقيق بمناطق التدهور قبل وقوعها، مما يؤدي إلى قرارات غير دقيقة فيما يخص توقيت ونوع الصيانة المطلوبة. هذا القصور لا ينعكس فقط على الأداء العام للطريق، وإنما يمتد ليشمل ارتفاع تكاليف الصيانة، وتأخر التدخل في الوقت المناسب، وتزايد الشكاوى من مستخدمي الطرق، وتفاقم الأضرار البيئية نتيجة الاستخدام غير الفعال للموارد.

وفي الوقت نفسه، توفر التطورات الحديثة في تقنيات الذكاء الاصطناعي – مثل تعلم الآلة، والشبكات العصبية، وخوارزميات التصنيف والتنبؤ – فرصًا غير مسبوقة لإحداث نقلة نوعية في كيفية جمع وتحليل بيانات الطرق، والتنبؤ بالحالة المستقبلية للرصف، واقتراح أنسب الحلول الصيانية بناءً على نماذج محوسبة دقيقة وذات موثوقية عالية. إلا أن التحدي يكمن في أن هذه التقنيات لم تُدمج بعد بشكل فعال ضمن أنظمة إدارة صيانة الطرق في العديد من الجهات والمؤسسات، إما بسبب نقص الوعي بقدراتها، أو محدودية الكوادر الفنية المدربة على استخدامها، أو غياب البنية التحتية الرقمية اللازمة لدعم تطبيقها.

ومن هنا تبرز مشكلة الدراسة بوضوح، حيث يُلاحظ وجود فجوة كبيرة بين الإمكانيات التي توفرها تقنيات الذكاء

الاصطناعي وبين واقع الممارسات الحالية في إدارة صيانة الطرق. ويُطرح التساؤل الجوهرى التالي:

“كيف يمكن توظيف الذكاء الاصطناعي بشكل فعال في دعم اتخاذ القرار وتحسين كفاءة استراتيجيات صيانة الطرق،

بما يحقق الأداء الأمثل للبنية التحتية ويقلل من التكاليف ويزيد من عمر الخدمة للطريق؟”

وعليه، تتمثل مشكلة الدراسة في:

“القصور في كفاءة استراتيجيات صيانة الطرق التقليدية، نتيجة غياب الاعتماد على تقنيات الذكاء الاصطناعي في

تحليل البيانات واتخاذ القرار، مما يؤدي إلى ضعف في إدارة الموارد وزيادة في التكاليف وارتفاع مستوى التدهور في

شبكة الطرق.”

أهمية الدراسة:

تنبع أهمية هذه الدراسة من الحاجة المتزايدة لتطوير أساليب صيانة الطرق بما يتماشى مع التحديات التقنية والاقتصادية والبيئية التي تواجه قطاع النقل والبنية التحتية. ففي الوقت الذي تزداد فيه الضغوط على شبكات الطرق نتيجة الكثافة المرورية والظروف البيئية القاسية، تبرز ضرورة التحول من الأساليب التقليدية في الصيانة إلى نماذج أكثر ذكاءً ومرونة، تعتمد على التحليل الرقمي واتخاذ القرار التنبؤي المدعوم بالبيانات.

وتكمن أهمية هذه الدراسة في عدة جوانب رئيسية، أبرزها:

١. الجانب العلمي: تقدم الدراسة إثراءً معرفيًا في مجال تطبيقات الذكاء الاصطناعي في البنية التحتية، وتساهم في سد الفجوة البحثية المتعلقة بكيفية استخدام هذه التقنيات في قطاع صيانة الطرق.
٢. الجانب العملي: توضح الدراسة كيف يمكن تحويل البيانات المستخلصة من الطرق إلى معلومات قابلة للتحليل والتنبؤ بالحالات الحرجة، مما يساعد الجهات المختصة على اتخاذ قرارات صيانة أكثر فعالية وكفاءة.
٣. الجانب الاقتصادي: من خلال استخدام الذكاء الاصطناعي، يمكن تحقيق وفورات مالية كبيرة عبر تقليل أعمال الصيانة الطارئة، وإطالة العمر الافتراضي للطرق، وتقليل الانقطاعات المرورية الناتجة عن الصيانة غير المخططة.
٤. الجانب البيئي والمجتمعي: تؤدي صيانة الطرق المدعومة بالذكاء الاصطناعي إلى تقليل الانبعاثات الناتجة عن ازدحام المرور وسوء حالة الطرق، مما يساهم في تحسين جودة الهواء، وتعزيز السلامة العامة، ورفع مستوى رضا المستخدمين.

وبناءً على ذلك، تسعى هذه الدراسة إلى دعم صناع القرار والمهندسين والمخططين في تبني تقنيات الذكاء الاصطناعي ضمن استراتيجيات صيانة الطرق، بما يواكب متطلبات التحول الرقمي ويعزز من كفاءة واستدامة البنية التحتية.

أهداف الدراسة:

تهدف هذه الدراسة إلى تسليط الضوء على الإمكانيات الكبيرة التي يوفرها الذكاء الاصطناعي في مجال صيانة وتأهيل الطرق، من خلال تحليل الطرق التي يمكن بها توظيف هذه التقنيات لتعزيز كفاءة عمليات الصيانة، وتقليل التكاليف، وتحسين جودة الخدمات. وتتمثل الأهداف الرئيسية للدراسة فيما يلي:

١. تحليل واقع استراتيجيات صيانة الطرق الحالية، وتحديد نقاط الضعف في الأساليب التقليدية المعتمدة في إدارة وصيانة الطرق الإسفلتية.
٢. استعراض أبرز تقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في صيانة الطرق، مثل التعلم الآلي، والرؤية الحاسوبية، والتحليل التنبؤي، وتوضيح كيفية عملها ومجالات تطبيقها.
٣. تقييم فعالية استخدام الذكاء الاصطناعي في تحسين أداء الصيانة من حيث الجودة، التكاليف، والوقت، بالمقارنة مع الطرق التقليدية.
٤. رصد وتحليل التحديات والمعوقات التي تحول دون تطبيق الذكاء الاصطناعي في مشاريع صيانة الطرق، سواء كانت تقنية، إدارية، مالية، أو بشرية.
٥. اقتراح إطار عملي أو نموذج تطبيقي لتوظيف الذكاء الاصطناعي في استراتيجيات صيانة الطرق، يمكن اعتماده من قبل الجهات المختصة لتحسين إدارة البنية التحتية.
٦. تعزيز الوعي بأهمية التحول الرقمي في قطاع البنية التحتية، وبيان دور الذكاء الاصطناعي في دعم اتخاذ القرار وتحقيق الاستدامة.

تساؤلات الدراسة

انطلاقاً من مشكلة الدراسة وأهدافها، تسعى هذه الدراسة للإجابة عن مجموعة من التساؤلات البحثية التي توضح أبعاد الظاهرة المدروسة، وهي على النحو التالي:

١. ما واقع استراتيجيات صيانة الطرق المتبعة حالياً، وما أبرز أوجه القصور في هذه الاستراتيجيات التقليدية؟

٢. ما أهم تقنيات الذكاء الاصطناعي التي يمكن توظيفها في مجال صيانة وتأهيل الطرق؟

٣. كيف يمكن لتقنيات الذكاء الاصطناعي أن تسهم في تحسين كفاءة عمليات صيانة الطرق من حيث الجودة والتكلفة والسرعة؟

٤. ما أبرز التحديات والمعوقات التي تواجه تطبيق الذكاء الاصطناعي في صيانة الطرق الإسفلتية؟

٥. ما مدى استعداد الجهات المعنية بالبنية التحتية لتبني حلول الذكاء الاصطناعي في خطط الصيانة المستقبلية؟

٦. ما النموذج أو الإطار المقترح الذي يمكن من خلاله توظيف الذكاء الاصطناعي بشكل فعال في استراتيجيات صيانة الطرق؟

فروض الدراسة:

بناءً على مشكلة الدراسة وتساؤلاتها، تفترض هذه الدراسة ما يلي:

١. يوجد قصور في استراتيجيات صيانة الطرق التقليدية يؤثر سلبًا على جودة وكفاءة البنية التحتية للطرق.
٢. يمكن لتقنيات الذكاء الاصطناعي أن تقدم حلولًا فعالة لصيانة الطرق من خلال التنبؤ بالأعطال وتحليل البيانات بكفاءة عالية.
٣. تطبيق الذكاء الاصطناعي في صيانة الطرق يُسهم في تقليل التكاليف، وتسريع إجراءات الصيانة، وتحسين جودة الأداء.
٤. هناك تحديات متعددة (تقنية، تنظيمية، مالية، وبشرية) تعيق تبني الذكاء الاصطناعي في مشاريع صيانة الطرق.
٥. تمتلك الجهات المختصة مستوى متفاوتًا من الجاهزية لاعتماد الذكاء الاصطناعي في إدارة وصيانة البنية التحتية.
٦. يمكن بناء نموذج تطبيقي فعال لتوظيف الذكاء الاصطناعي في صيانة الطرق اعتمادًا على التجارب الدولية وتحليل البيانات المحلية.

الدراسات السابقة:

شهدت السنوات الأخيرة تزايدًا ملحوظًا في الدراسات التي تناولت تطبيقات الذكاء الاصطناعي في مجال صيانة الطرق والبنية التحتية عمومًا. وقد ركزت هذه الدراسات على استخدام تقنيات مختلفة مثل تعلم الآلة، والرؤية الحاسوبية، والخوارزميات التنبؤية، بهدف تحسين فعالية إدارة الصيانة وتخفيض التكاليف التشغيلية. وفيما يلي عرض لأبرز هذه الدراسات:

١. دراسة (Wang et al (2021).

هدفت إلى تطوير نموذج تنبؤي باستخدام خوارزميات تعلم الآلة لرصد حالة سطح الطرق الإسفلتية. وقد أظهرت النتائج دقة عالية في التنبؤ بمستوى التدهور اعتمادًا على بيانات المرور والمناخ، وأوصت باستخدام النموذج في تخطيط الصيانة الوقائية.

١. دراسة (Alavi & Butt (2020).

تناولت تطبيق الذكاء الاصطناعي في نظام إدارة الرصف (PMS) من خلال دمج تقنيات التعلم العميق في تحليل صور الشقوق. وقد خلصت الدراسة إلى أن استخدام الرؤية الحاسوبية يساعد على تسريع عمليات الكشف التلقائي وتقليل الخطأ البشري في تقييم الأعطال.

٢. دراسة (Zhang et al (2019).

استعرضت تجارب عدد من الدول المتقدمة في دمج الذكاء الاصطناعي ضمن استراتيجيات صيانة الطرق، وناقشت فوائد هذا التحول على مستوى السياسات العامة. وأشارت الدراسة إلى ضرورة توفير بنية تحتية رقمية وكوادر مدربة لضمان نجاح تطبيق الذكاء الاصطناعي.

٣. دراسة عربية – دراسة العتيبي (٢٠٢٢)

بحثت واقع تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي في مشاريع صيانة الطرق في دول الخليج العربي. وتوصلت إلى أن هناك اهتمامًا متزايدًا بالتقنيات الحديثة، إلا أن التحديات التنظيمية والمالية ما زالت تعيق التطبيق الواسع.

٤. دراسة منظمة النقل العالمية (ITF 2020)

أشارت إلى أن استخدام الذكاء الاصطناعي في صيانة الطرق يمكن أن يخفض التكاليف بنسبة تصل

إلى ٣٠٪، كما يساعد على تحسين السلامة المرورية عبر الصيانة الاستباقية.

الاستفادة من الدراسات السابقة:

- وفرت هذه الدراسات أساسًا علميًا لفهم إمكانيات الذكاء الاصطناعي في مجال صيانة الطرق.
- ساعدت على تحديد الأساليب الأكثر فاعلية، مثل استخدام الشبكات العصبية والرؤية الحاسوبية.
- بينت التحديات الشائعة، مثل ضعف البنية التحتية الرقمية ونقص الكفاءات.
- شكلت مرجعًا مهمًا لتوجيه الدراسة الحالية نحو تقديم نموذج عملي قابل للتطبيق.

المنطلقات النظرية للدراسة:

ترتكز هذه الدراسة على عدد من المنطلقات النظرية التي تُشكل القاعدة العلمية لفهم العلاقة بين الذكاء الاصطناعي واستراتيجيات صيانة الطرق، وتساعد على توجيه البحث نحو أهدافه. وتتمثل أبرز هذه المنطلقات فيما يلي:

١. نظرية نظم إدارة الصيانة (Maintenance Management Systems):
٢. تفترض هذه النظرية أن صيانة البنية التحتية يجب أن تتم ضمن إطار منظم يعتمد على تقييم الحالة الفعلية، وتحديد أولويات الصيانة، والربط بين الموارد المتاحة ومستوى الخدمة المطلوب. وتعزز هذه النظرية أهمية التنبؤ، والتحليل الكمي، والتخطيط طويل الأمد، وهي مبادئ يمكن تحسينها باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي.
٣. نظرية الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة (Artificial Intelligence & Machine Learning Theory):
٤. تؤكد هذه النظرية على قدرة الأنظمة الذكية على "التعلم" من البيانات، والتكيف مع المتغيرات، واتخاذ قرارات دون تدخل بشري مباشر. وبناءً على ذلك، يمكن استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحليل البيانات الضخمة المتعلقة بحالة الطرق، والتنبؤ بالأعطال، واقتراح توقيتات مثلى للصيانة.
٥. نظرية اتخاذ القرار المعزز بالبيانات (Data-Driven Decision Making):
٦. تنص على أن القرارات المثلى لا تُبنى على الحدس أو الخبرة فقط، بل على تحليل علمي للبيانات الفعلية. وتُعتبر هذه النظرية من الدعامات الرئيسية لتطبيق الذكاء الاصطناعي، حيث يمكن لنماذج الذكاء الاصطناعي تحسين قرارات الصيانة بناءً على أنماط التدهور والظروف التشغيلية.
٧. نظرية دورة حياة البنية التحتية (Infrastructure Lifecycle Theory):
٨. تؤكد هذه النظرية أن كل عنصر من عناصر البنية التحتية يمر بمراحل تشمل التصميم، التشغيل، التدهور، والصيانة، مما يستدعي تخطيطاً دقيقاً للصيانة الوقائية والطارئة. ويدعم الذكاء الاصطناعي هذه النظرية من خلال تمكين التنبؤ بالتدهور في المراحل المبكرة وتحديد الإجراءات الأنسب في كل مرحلة.

٩. نظرية التحول الرقمي في البنية التحتية (Digital Transformation Theory):

١٠. توضح هذه النظرية كيف يمكن للأنظمة التقليدية في إدارة الأصول والبنية التحتية أن تتحول

باستخدام التقنيات الرقمية، مثل الذكاء الاصطناعي، إلى نظم أكثر فاعلية وكفاءة واستدامة.

وتوفر هذه النظرية الإطار العام لفهم أهمية التحول الرقمي في قطاع صيانة الطرق.

خلاصة:

تشكل هذه المنطلقات النظرية الإطار المرجعي للدراسة، وتساهم في تفسير العلاقة بين مفاهيم البحث، وتبرير

اختيار الذكاء الاصطناعي كوسيلة علمية وعملية لتحسين كفاءة صيانة الطرق. كما تمكن الباحث من تحليل الظاهرة

المدرسة وفق منظور علمي حديث يجمع بين الهندسة وتقنيات الحوسبة الذكية.

المنهجية وطرق البحث:

يعتمد هذا البحث على منهجية علمية منهجية تهدف إلى دراسة تطبيقات الذكاء الاصطناعي في صيانة الطرق من منظور عملي وتحليلي، من خلال استخدام مزيج من المناهج الكمية والكيفية للحصول على صورة شاملة حول إمكانيات وتحديات هذا التطبيق.

أولاً: المنهج المستخدم

يعتمد البحث على المنهج الوصفي التحليلي، حيث يتم:

- وصف الواقع الحالي لاستراتيجيات صيانة الطرق، سواء من خلال الأدبيات أو من خلال استبيانات ميدانية.
 - تحليل بيانات تتعلق بتجارب سابقة محلية ودولية في تطبيق الذكاء الاصطناعي في الصيانة.
 - استخلاص أنماط وتوجهات حول فاعلية هذه التطبيقات والتحديات المرتبطة بها.
- كما سيتم الاستعانة بالمنهج التطبيقي (العملي) في حال تنفيذ دراسة حالة (Case Study) أو نموذج مقترح لتطبيق الذكاء الاصطناعي في إدارة الصيانة.

ثانياً: أدوات جمع البيانات

لتحقيق أهداف البحث والإجابة عن تساؤلاته، سيتم استخدام الأدوات التالية:

١. الاستبيان (Questionnaire):

سيتم تصميم استبيان موجه إلى المهندسين، وخبراء صيانة الطرق، والمختصين في الذكاء الاصطناعي، بهدف جمع بيانات كمية عن مدى استخدام الذكاء الاصطناعي، وأنواع التقنيات المستخدمة، ومعوقات التطبيق.

٢. المقابلات شبه المهيكلية (Semi-structured Interviews):

سُتجرى مقابلات مع عدد من المتخصصين في مجالات الطرق والذكاء الاصطناعي لفهم التحديات والفرص من منظورهم المهني.

٣. تحليل المحتوى والدراسات السابقة:

يُستخدم لتحليل الأطر النظرية والتطبيقية للدراسات ذات العلاقة، واستنتاج الاتجاهات العالمية في هذا المجال.

ثالثاً: مجتمع الدراسة وعينتها

- مجتمع الدراسة: يشمل المهندسين والفنيين في إدارات الطرق والنقل، إضافة إلى المتخصصين في تقنيات الذكاء الاصطناعي.
- عينة الدراسة: سيتم اختيار عينة عشوائية أو قصدية (حسب حجم المجتمع) من عدد من الجهات الحكومية والخاصة المعنية بصيانة الطرق.

رابعاً: طرق تحليل البيانات

- البيانات الكمية من الاستبيانات سيتم تحليلها باستخدام برامج إحصائية مثل SPSS لاستخراج المتوسطات، والانحرافات المعيارية، ومعاملات الارتباط.
- البيانات النوعية من المقابلات سيتم تحليلها باستخدام التحليل الموضوعي (Thematic Analysis) لاستخلاص الأنماط والتوجهات العامة.

أدوات الدراسة :

لتحقيق أهداف الدراسة والإجابة عن تساؤلاتها، تم الاعتماد على مجموعة من الأدوات البحثية التي تُمكن الباحث من جمع بيانات كمية ونوعية من مصادرها الأصلية. وقد تم اختيار الأدوات بما يتلاءم مع طبيعة المشكلة، والمنهج المستخدم، ومجتمع الدراسة. وتتمثل أدوات البحث فيما يلي:

١. الاستبيان (Questionnaire)

أداة رئيسية لجمع البيانات الكمية من المهندسين والفنيين العاملين في مجال صيانة الطرق، والمهتمين بتقنيات الذكاء الاصطناعي. يتكون الاستبيان من عدة محاور تشمل:

- واقع الصيانة الحالية للطرق.
 - مدى معرفة وتطبيق الذكاء الاصطناعي.
 - الفوائد المتوقعة من دمج الذكاء الاصطناعي في الصيانة.
 - المعوقات والتحديات أمام التطبيق.
 - مدى استعداد الجهات لاعتماد التكنولوجيا الحديثة.
- تم تصميم الاستبيان وفق مقياس ليكرت الخماسي لتحديد اتجاهات وآراء العينة بدقة.

٢. المقابلات شبه المهيكلية (Semi-structured Interviews)

استُخدمت للحصول على بيانات نوعية من خبراء مختصين في مجالي الطرق والذكاء الاصطناعي، بهدف:

- التعرف على تجارب واقعية في توظيف الذكاء الاصطناعي.
- فهم التحديات التقنية والإدارية التي تواجه التنفيذ.
- استكشاف الرؤى المستقبلية لتطوير استراتيجيات الصيانة.

تتميز هذه الأداة بالمرونة، وتُساعد في تعميق الفهم حول الظاهرة المدروسة.

٣. تحليل الوثائق والمحتوى (Document & Content Analysis)

تم تحليل دراسات سابقة، وتقارير فنية، ومعايير عالمية في صيانة الطرق، بهدف:

- مقارنة الممارسات الحالية بالممارسات المدعومة بالذكاء الاصطناعي.
- استخلاص الدروس المستفادة من تجارب دولية متقدمة.
- دعم بناء الإطار النظري والنموذج المقترح في الدراسة.

حدود الدراسة :

تم تحديد هذه الدراسة ضمن حدود معينة لضمان دقتها وتركيزها، وذلك على النحو التالي:

١. الحدود الموضوعية:

تقتصر الدراسة على تطبيق استراتيجيات صيانة الطرق باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي، ولا تتناول الجوانب الأخرى المتعلقة بتصميم الطرق أو تخطيطها أو تنفيذها، إلا في ما يرتبط مباشرة بالصيانة وإدارتها.

٢. الحدود المكانية:

تُركز الدراسة على واقع صيانة الطرق في (يُذكر اسم الدولة أو المدينة أو الهيئة المختصة – مثل وزارة النقل، أو أمانة العاصمة... إلخ)، مما يعني أن نتائجها قد لا تنطبق كليًا على مناطق جغرافية تختلف في البنية التحتية أو القدرات التقنية.

٣. الحدود الزمانية:

تتناول الدراسة البيانات والتجارب المتاحة خلال الفترة الزمنية ما بين (٢٠٢٠ – ٢٠٢٥)، وهي الفترة التي شهدت نموًا في تبني تقنيات الذكاء الاصطناعي في مجالات البنية التحتية عالميًا ومحليًا.

٤. الحدود البشرية:

تقتصر عينة الدراسة على المهندسين، والمخططين، والمتخصصين في الذكاء الاصطناعي، والعاملين في قطاع صيانة الطرق، سواء في القطاعين الحكومي أو الخاص، دون التطرق إلى آراء مستخدمي الطرق أو المواطنين العاديين.

المراجع:

Alavi, A. H., & Butt, A. A. (2020). Application of deep learning in pavement management systems: Crack detection and classification. *Automation in Construction*, 113, 103102.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103102>

International Transport Forum (ITF). (2020). Artificial Intelligence in Transport: Current and Emerging Applications. OECD Publishing. <https://www.itf-oecd.org/artificial-intelligence-transport>

Wang, Y., Liu, J., & Chen, Z. (2021). Predictive modeling of asphalt pavement deterioration using machine learning algorithms. *Journal of Infrastructure Systems*, 27(2), 04021015.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000604](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000604)

Zhang, L., Wang, F., & Li, X. (2019). Integrating artificial intelligence into road maintenance policy: A global perspective. *Transportation Research Procedia*, 40, 201–210.

<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.029>

العتيبي، س. م. (٢٠٢٢). واقع استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي في صيانة الطرق بدول الخليج العربي. *المجلة العربية للبحث العلمي في الهندسة والتقنية*، ٨(١)، ٤٥–٦٨.

علي، م. ع. (٢٠٢٠). إدارة صيانة الطرق الحضرية باستخدام تقنيات نظم المعلومات الجغرافية. *مجلة البحوث الهندسية*، ٣٥(٢)، ١١٧–١٣٥.

عوض، ن. س. (٢٠٢١). فاعلية التحول الرقمي في تحسين إدارة البنية التحتية للطرق. *المجلة العربية للتنمية المستدامة*، ٩(٤)، ٢٢–٤٠.