

عنوان البحث

استخدام الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بالتأخيرات في مشاريع البنية التحتية في جدة

إعداد الطالب

سلطان هزاع فهد ناصر

إشراف

العام الدراسي

٢٠٢٥/٢٠٢٦ م

قائمة المحتويات

الفصل الأول: الإطار العام للبحث

٧-٦	١.١ المقدمة
٧	١.٢ المراجعة الأدبية
٧	المحور الأول: دراسات تأخيرات المشاريع في البيئة السعودية
٨	المحور الثاني: تحليل مسببات التأخير (إدارية، مالية، فنية)
٨	المحور الثالث: النماذج التنبؤية التقليدية وقصورها
٩-٨	المحور الرابع: الذكاء الاصطناعي في قطاع التشييد
٩	تحليل نقدي ختامي للفجوة البحثية
٩	١.٣ مشكلة البحث
١٠	١.٤ فرضيات البحث
١١- ١٠	١.٥ أهداف البحث
١١	١.٦ أهمية البحث
١٢-١١	أولاً: الأهمية العلمية
١٢	١.٧ منهجية البحث
١٢	١.٧.١ تصميم البحث ومجتمع الدراسة
١٢	١.٧.٢ العينة وأدوات جمع البيانات
١٣-١٢	١.٧.٣ مراحل التحليل والمعالجة الخوارزمية
١٣	١.٨ محددات البحث

الفصل الثاني: الإطار النظري والدراسات السابقة

١٤	٢.١ المنطلقات النظرية للدراسة
١٤	٢.١.١ نظريات إدارة المشاريع والأداء الزمني
١٥-١٤	٢.١.٢ نظريات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي
١٥	٢.٢ مفهوم الذكاء الاصطناعي وتطبيقاته الهندسية

١٥	٢.٢.١ تعريف الذكاء الاصطناعي (AI) والتعلم الآلي
١٥	٢.٢.٢ تطبيقات الذكاء الاصطناعي في إدارة المشاريع
١٦	٢.٣ تحليل ظاهرة التأخير في مشاريع البنية التحتية بمدينة جدة
١٦	٢.٣.١ تعريف وأنواع التأخير
١٧	٢.٤ النمذجة التنبؤية الذكية: الخوارزميات المستخدمة
١٧	٢.٤.١ خوارزمية الغابات العشوائية (Forest Random)
١٨	٢.٦ أداة الدراسة: استبيان استخدام الذكاء الاصطناعي
١٨	القسم الأول: البيانات العامة (الديموغرافية)
٢٠-١٩	القسم الثاني: محاور الاستبيان (مقياس ليكرت الخماسي)
٢٠	٢.٧ حدود الدراسة
٢٢-٢١	المراجع

ملخص البحث

يتناول هذا البحث أهمية مشاريع البنية التحتية بوصفها ركيزة أساسية لتحقيق التنمية المستدامة ودعم النمو الاقتصادي، لما لها من دور في تعزيز حركة التجارة والخدمات وتحسين جودة الحياة. كما يبرز البحث دور كفاءة قطاع التشييد والبناء في عكس قوة الاقتصاد الوطني، خاصة في ظل التعقيدات الهندسية والإدارية التي قد تؤدي إلى تأخير تنفيذ المشاريع. ويركّز البحث على المملكة العربية السعودية في إطار رؤية ٢٠٣٠، التي تولي اهتمامًا كبيرًا بتطوير البنية التحتية وبناء مدن ذكية ومستدامة، مما يجعل الالتزام بالجدول الزمنية للمشاريع ضرورة استراتيجية تسهم في تحقيق مستهدفات التنمية والتنويع الاقتصادي. وتُعدّ مدينة جدة نموذجًا تطبيقيًا للدراسة نظرًا لموقعها الجغرافي وأهميتها الاقتصادية، إضافة إلى التحديات الطبيعية والهندسية التي تواجه مشاريعها، مثل مخاطر السيول والفيضانات، والتي تسهم في حدوث التأخيرات. كما يناقش البحث ظاهرة التأخير في مشاريع التشييد عالميًا وما يترتب عليها من آثار اقتصادية سلبية. ويشير إلى محدودية الأساليب التقليدية في التنبؤ بالتأخيرات، مقابل فاعلية تقنيات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي في تحليل البيانات والتنبؤ بالمشكلات بدقة أعلى، مما يدعم اتخاذ قرارات استباقية. وفي الختام، يهدف البحث إلى تطوير نموذج تحليلي قائم على الذكاء الاصطناعي لدراسة أسباب التأخير في مشاريع البنية التحتية بمدينة جدة، بما يسهم في تحسين كفاءة التنفيذ ودعم متخذي القرار .

Abstract :

This study examines the importance of infrastructure projects as a fundamental pillar for achieving sustainable development and supporting economic growth, given their role in enhancing trade, services, and quality of life. It also highlights how the efficiency of the construction sector reflects the strength of the national economy, particularly in light of the engineering and administrative complexities that may lead to project delays. The research focuses on Saudi Arabia within the framework of Vision 2030, which places strong emphasis on infrastructure development and the creation of smart and sustainable cities, making adherence to project timelines a strategic necessity that contributes to achieving development and economic diversification goals. Jeddah is presented as a case study due to its geographical location and economic importance, in addition to the natural and engineering challenges affecting its projects, such as flood risks that contribute to delays. The study also discusses the global issue of delays in construction projects and their negative economic impacts. Furthermore, it highlights the limitations of traditional delay prediction methods compared to the effectiveness of artificial intelligence and machine learning techniques in analyzing data and predicting issues with higher accuracy, thereby supporting proactive decision-making. Finally, the study aims to develop an AI-based analytical model to investigate the causes of delays in infrastructure projects in Jeddah, contributing to improved execution efficiency and enhanced decision support.

الكلمات المفتاحية:

١. مشاريع البنية التحتية .
٢. التأخير في المشاريع .
٣. الذكاء الاصطناعي .
٤. التعلم الآلي .
٥. إدارة المشاريع .

الفصل الأول: الإطار العام للبحث

١.١ المقدمة

تُعدّ مشاريع البنية التحتية الركيزة الأساسية لتحقيق التنمية المستدامة، إذ لا تقتصر أهميتها على كونها منشآت مادية كشبكات الطرق والجسور والمياه، بل تمثل المحرك الرئيس للنشاط الاقتصادي وحركة التجارة والخدمات الحضرية. ومن هذا المنطلق، فإن كفاءة قطاع التشييد والبناء تعكس بصورة مباشرة قوة الاقتصاد الوطني وقدرته على مواكبة التحولات الديموغرافية المتسارعة. كما تتسم هذه المشاريع بدرجة عالية من التعقيد الهندسي والإداري، نتيجة تداخل العوامل الفنية مع القيود المالية والالتزامات الزمنية الصارمة، مما يجعلها عرضة لمخاطر التعثر والتأخير.

وفي سياق المملكة العربية السعودية، اكتسبت مشاريع البنية التحتية أهمية استراتيجية متزايدة في ظل رؤية المملكة ٢٠٣٠، التي تستهدف تطوير مدن ذكية ومستدامة. ويستدعي حجم الاستثمارات الضخمة الموجهة لهذا القطاع، والتي تجاوزت مليارات الدولارات، تبني ممارسات إدارية دقيقة تضمن تنفيذ المشاريع وفق الجداول الزمنية المحددة. وعليه، فإن الالتزام الزمني في تنفيذ هذه المشاريع لا يعد مجرد هدف تشغيلي، بل يمثل التزامًا وطنيًا يسهم في تحقيق مستهدفات جودة الحياة والتنويع الاقتصادي.

وتبرز مدينة جدة كنموذج تطبيقي يعكس حجم التحديات المرتبطة بمشاريع البنية التحتية، نظرًا لموقعها الجغرافي الساحلي وأهميتها الاقتصادية والدينية، إلى جانب احتضانها لعدد من المشاريع العملاقة. إلا أن هذه البيئة تواجه تحديات طبيعية وهندسية معقدة، مثل مخاطر السيول والفيضانات، والتي تؤثر بشكل مباشر على سير تنفيذ المشاريع وتؤدي في كثير من الأحيان إلى تأخيرها. ومن ثم، فإن دراسة ظاهرة التأخير في هذا السياق تمثل ضرورة ملحة لحماية الاستثمارات وتعزيز كفاءة التنمية العمرانية.

وعلى صعيد آخر، تُعدّ ظاهرة التأخير في مشاريع التشييد من المشكلات الهيكلية التي تعاني منها العديد من الدول، حيث تشير الدراسات إلى ارتفاع معدلات تجاوز الجداول الزمنية للمشاريع، الأمر الذي يترتب عليه آثار اقتصادية سلبية، تشمل زيادة التكاليف وتعطيل الاستفادة من المشاريع وفقدان الثقة في كفاءة التنفيذ. وفي ظل هذه المعطيات، أصبح من الواضح أن الاعتماد على الأساليب التقليدية لم يعد كافيًا لمعالجة هذه الظاهرة.

وفي هذا الإطار، أظهرت الأساليب التقليدية في التنبؤ بالتأخيرات، والتي تعتمد غالبًا على الخبرة الشخصية أو النماذج الإحصائية البسيطة، محدودية واضحة في التعامل مع البيانات المعقدة والمتغيرات غير الخطية. ومن هنا تبرز الحاجة إلى تبني أساليب حديثة تعتمد على التقنيات المتقدمة، وفي مقدمتها الذكاء الاصطناعي، لتحقيق تحول نحو إدارة مشاريع أكثر كفاءة وفاعلية.

وقد أسهمت تقنيات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي في إحداث نقلة نوعية في تحليل البيانات الضخمة واستخلاص الأنماط المعقدة، مما أتاح إمكانية التنبؤ بالتأخيرات بدرجة عالية من الدقة. كما توفر هذه التقنيات أدوات تنبؤية تساعد متخذي القرار على اتخاذ إجراءات استباقية، مثل إعادة توزيع الموارد وتعديل الخطط التنفيذية، قبل تفاقم المشكلات. وعلى الرغم من هذه التطورات، لا تزال هناك فجوة بحثية واضحة تتمثل في قلة الدراسات التي تناولت تطبيقات الذكاء الاصطناعي في بيئة المشاريع الإنشائية بمدينة جدة بشكل خاص، مع مراعاة خصائصها المحلية. ومن هذا المنطلق، تهدف هذه الدراسة إلى سد هذه الفجوة من خلال تطوير نموذج تحليلي متكامل يجمع بين الأساليب التقنية الحديثة والمعطيات الميدانية، بما يسهم في دعم متخذي القرار وتحسين كفاءة تنفيذ مشاريع البنية التحتية.

١.٢ المراجعة الأدبية

تتطلب معالجة موضوع التنبؤ بالتأخيرات دراسة تحليلية مقارنة للأدبيات التي تناولت هذا المجال، وذلك عبر المحاور التالية:

المحور الأول: دراسات تأخيرات المشاريع في البيئة السعودية

تناولت دراسة (العتيبي، ٢٠٢٣) واقع المشاريع في البلديات السعودية، حيث هدفت إلى تحديد العوامل الجوهرية للتعثر باستخدام المنهج الوصفي التحليلي، وتوصلت إلى أن ضعف التنسيق بين الجهات الخدمية يمثل ٤٠% من أسباب التوقف. وعلى الجانب الآخر، ركزت دراسة (القحطاني، ٢٠٢١) على مشاريع المنطقة الغربية، مشيرة إلى أن نقص الكفاءات الفنية لدى المقاولين يؤدي إلى إعادة العمل (Rework)، مما يطيل زمن التنفيذ. وفي ضوء ما تقدم، نجد اتفاقاً بين دراسة (الحربي، ٢٠٢١) ودراسة (الشمري، ٢٠٢١) على أن التغييرات المستمرة في نطاق العمل أثناء التنفيذ هي "المحرك الصامت" للتأخيرات الكبرى. وبناءً على تحليل هذه الدراسات، يتضح أنها نجحت في تشخيص الداء، لكنها ظلت أسيرة الحلول الوصفية دون تقديم نماذج رقمية قادرة على التنبؤ الاستباقي (الزهراني، ٢٠٢٣).

المحور الثاني: تحليل مسببات التأخير (إدارية، مالية، فنية)

أشارت دراسة (باسويد، ٢٠٢٣) إلى أن العوامل الإدارية، وعلى رأسها بطء اعتماد التصميم من الجهات الحكومية، تُسهم بشكل مباشر في انحراف الجداول الزمنية للمشاريع بنسبة قد تصل إلى ٣٥%. في المقابل، ركزت دراسة (حسن، ٢٠٢٢) على العوامل المالية، مبيّنةً أن تأخر صرف المستخلصات للمقاولين يؤدي إلى أزمات سيولة حادة، تنعكس سلباً على استمرارية توريد المواد الأساسية. ويتضح من ذلك وجود ترابط وثيق بين مختلف العوامل المؤثرة، حيث يؤثر العامل المالي على الجوانب الفنية، مثل توفر المعدات والمواد، وهو ما ينعكس بدوره على الأداء الإداري، خاصة فيما يتعلق بالالتزام بالمسار الحرج للمشروع (الشهري، ٢٠٢٤).

وبناءً على ما سبق، فإن معالجة هذه العوامل بشكل منفصل يُعد قصوراً منهجياً، الأمر الذي تسعى هذه الدراسة إلى تجاوزه من خلال تبني منهجية تحليلية شمولية قائمة على النمذجة المتكاملة (غروي، ٢٠٢٥).

المحور الثالث: النماذج التنبؤية التقليدية وقصورها

اعتمدت إدارة المشاريع لعقود على "طريقة المسار الحرج" ونماذج الانحدار الإحصائي. وبناءً على نقد (محمود وآخرون، ٢٠٢١)، فإن هذه النماذج تفترض وجود علاقات خطية بسيطة بين المتغيرات، بينما الواقع الإنشائي في جدة يتسم بـ "الفوضى المنظمة" والارتباطات المتشابكة. يتضح مما سبق أن النماذج التقليدية تعاني من "فرط التفاؤل"، حيث تضع جداول زمنية لا تأخذ في الحسبان احتمالات المخاطر المتغيرة، مما يجعلها تنبؤات "ساكنة" تنهار عند أول عائق ميداني (الشمري، ٢٠٢٠). وفي ضوء ما تقدم، فإن الحاجة لنماذج "ديناميكية" تستند إلى الذكاء الاصطناعي أصبحت مطلباً تقنياً ملحاً (عبد الله، ٢٠٢٢).

المحور الرابع: الذكاء الاصطناعي في قطاع التشييد

استعرضت دراسة (الشهري، ٢٠٢٤) تطبيقات التعلم الآلي في المشاريع الحكومية، مؤكدة أن خوارزميات مثل الشبكات العصبية (ANN) تتفوق في التعامل مع البيانات غير المهيكلة. وبناءً على دراسة (الزهراني، ٢٠٢٣)، فإن استخدام خوارزمية "الغابات العشوائية" أثبت كفاءة عالية في تحديد "أهمية الميزات"، مما يسمح للمهندسين بمعرفة أي

عامل سيسبب التأخير الأكبر. يتضح مما سبق أن التوجه العالمي، الذي بدأت تتبناه المملكة، يسير نحو دمج الذكاء الاصطناعي في كافة مراحل دورة حياة المشروع لضمان الدقة والشفافية (باسويد، ٢٠٢٣).

تحليل نقدي ختامي للفجوة البحثية

من خلال الاستقراء الجماعي للدراسات السابقة، يظهر جلياً أن هناك ثراءً في تحليل "أسباب" التأخير، مقابل فقر شديد في "أدوات التنبؤ" الذكية باللغة العربية (العتيبي، ٢٠٢٣). معظم الدراسات وقفت عند حدود الاستيانات الوصفية، ولم تنتقل لمرحلة بناء خوارزميات تدريبية تعتمد على بيانات المشاريع الفعلية في جدة (الشمري، ٢٠٢١). وبناءً على ذلك، فإن البحث الحالي يمثل قفزة نوعية من "التشخيص" إلى "الاستشراف"، موفراً نموذجاً تطبيقياً يردم الفجوة بين البحث الأكاديمي والتطبيق الهندسي (الزهراني، ٢٠٢٣).

١.٣ مشكلة البحث

تكمن مشكلة البحث في الفجوة المتسعة بين التخطيط الزمني النظري والواقع التنفيذي لمشاريع البنية التحتية في مدينة جدة، حيث تعاني المدينة من معدلات تعثر مرتفعة تؤدي إلى استنزاف الميزانيات وتعطيل الخدمات العامة. يتضح مما سبق أن الاعتماد على الأساليب التقليدية في تقدير مدد المشاريع لم يعد يتناسب مع حجم وضخامة المشاريع المرتبطة برؤية ٢٠٣٠ (الحربي، ٢٠٢١). وبناءً على ذلك، فإن مشكلة البحث تتبلور في غياب "نظام تنبؤي ذكي" قادر على تحليل المخاطر الكامنة في بيانات المشاريع وتقديم تحذيرات مبكرة تحول دون وقوع التأخير (الشمري، ٢٠٢١).

ويمكن صياغة تساؤلات البحث في الأسئلة التحليلية التالية:

١. ما هي الأوزان النسبية للعوامل المؤثرة في تأخير مشاريع جدة؟
٢. إلى أي مدى يمكن لنماذج التعلم الآلي أن توفر تنبؤات دقيقة بالتأخير؟
٣. كيف تختلف كفاءة التنبؤ بين خوارزميات الشبكات العصبية (ANN) والغابات العشوائية (RF)؟
٤. ما هو أثر دمج البيانات البيئية المحلية في دقة النموذج التنبؤي؟
٥. كيف يمكن صياغة إطار عمل إداري لتبني التنبؤ الذكي في أمانة مدينة جدة؟

١.٤ فرضيات البحث

بناءً على الإطار النظري والتحليل النقدي للدراسات السابقة، تمت صياغة الفرضيات التالية:

- الفرضية الأولى: "توجد علاقة طردية ذات دلالة إحصائية بين جودة أرشفة البيانات التاريخية للمشاريع وبين دقة النموذج التنبؤي المقترح". وبناءً على ذلك، فإن المؤسسات التي تمتلك سجلات رقمية دقيقة ستكون أكثر قدرة على الاستفادة من الذكاء الاصطناعي (غروي، ٢٠٢٥).
- الفرضية الثانية: "تتفوق خوارزمية الغابات العشوائية على الشبكات العصبية في التنبؤ بتأخيرات المشاريع عند التعامل مع متغيرات نوعية متعددة". يتضح مما سبق أن قدرة RF على تصنيف الميزات تجعلها أكثر ملاءمة للبيانات الهندسية المختلطة (الزهراني، ٢٠٢٣).
- الفرضية الثالثة: "تعتبر العوامل الإدارية والمالية هي المتنبئات الأكثر تأثيراً على انحراف الجدول الزمني في مشاريع جدة مقارنة بالعوامل الفنية". وفي ضوء ما تقدم، فإن الحل التقني يجب أن يركز على رصد "البيروقراطية الرقمية" والتدفقات النقدية (العتيبي، ٢٠٢٣).
- الفرضية الرابعة: "يؤدي دمج متغير 'مخاطر السيول' كمتغير مستقل في النموذج إلى خفض نسبة الخطأ في التنبؤ بالتأخير في جدة بنسبة لا تقل عن ١٥%". وبناءً على ذلك، فإن الخصوصية الجغرافية هي مفتاح دقة النموذج (الشمري، ٢٠٢٠).
- الفرضية الخامسة: "يساهم استخدام التنبؤ الذكي في مرحلة التخطيط في تقليل 'الهدر الزمني' بنسبة ملحوظة من خلال تحديد المسارات الحرجة المحتملة بشكل استباقي" (باسويد، ٢٠٢٣).

١.٥ أهداف البحث

يهدف البحث الحالي إلى تحقيق الغايات التالية:

- وضع دليل إرشادي للتطبيق: تقديم توصيات عملية لكيفية دمج هذه النماذج في الممارسات اليومية لمديري المشاريع لتعزيز كفاءة الإنفاق الحكومي (باسويد، ٢٠٢٣).

- المفاضلة الفنية بين الخوارزميات: إجراء دراسة مقارنة بين عدة خوارزميات (ANN, RF, XGBoost) لتحديد النموذج "الأكثر صلابة" في مواجهة تقلبات بيانات التشييد (الزهراني، ٢٠٢٣).
- تقييم الأثر البيئي على الجدولة: قياس مدى تأثير المتغيرات الجوية والبيئية الخاصة بجدة على أداء المشاريع ودمجها في الخوارزمية (الشمري، ٢٠٢٠).
- تصميم وتطوير نموذج تنبؤي ذكي: بناء أداة برمجية تعتمد على تقنيات التعلم الآلي تكون قادرة على استقبال مدخلات المشروع وتقديم "نسبة مئوية" لاحتمالية التأخير (غروي، ٢٠٢٥).
- تحليل وتصنيف جذور التأخير: بناء قاعدة معرفية شاملة تحدد مسببات التأخير في مشاريع البنية التحتية بجدة وترتيبها حسب خطورتها (العتيبي، ٢٠٢٣).

١.٦ أهمية البحث

أولاً: الأهمية العلمية

تكمن الأهمية العلمية في تقديم "مساهمة معرفية أصيلة" في المكتبة العربية في مجال دمج الذكاء الاصطناعي مع الهندسة المدنية. وبناءً على ذلك، فإن البحث يفتح آفاقاً جديدة للانتقال من "الهندسة الوصفية" إلى "الهندسة التنبؤية" (الشمري، ٢٠٢١). يتضح مما سبق أن الدراسة تؤسس لمنهجية بحثية يمكن تعميمها على مدن سعودية أخرى، مما يثري الحوار الأكاديمي حول التحول الرقمي في قطاع البناء (الزهراني، ٢٠٢٣).

ثانياً: الأهمية التطبيقية

على الصعيد التطبيقي، يوفر البحث أداة "دعم قرار" حقيقية للمهندسين في جدة، تسمح لهم بالانتقال من إدارة الأزمات إلى إدارة التوقعات. يتضح مما سبق أن التنبؤ الدقيق يقلل من النزاعات العقدية بين الملاك والمقاولين، ويحفظ الأموال العامة من الهدر الناتج عن أوامر التغيير العشوائية (الشهري، ٢٠٢٤). وبناءً عليه، فإن تبني هذا النموذج يعزز من سمعة قطاع التشييد السعودي ويجذب الاستثمارات الأجنبية (العتيبي، ٢٠٢٣).

ثالثاً: الأهمية الوطنية

يتوافق هذا البحث بشكل كامل مع "رؤية المملكة ٢٠٣٠" في محورها الخاص بـ "التحول الرقمي" و"رفع كفاءة الأداء الحكومي". وفي ضوء ما تقدم، فإن تقليل التأخير في مشاريع جدة يسرع من وتيرة إنجاز مستهدفات جودة الحياة، ويضمن أن تكون جدة مدينة عالمية ذكية تواكب أرقى المعايير الدولية (الحري، ٢٠٢١).

١.٧ منهجية البحث

تعتمد الدراسة على المنهج الكمي التطبيقي، مستخدمة إطار عمل "علم البيانات" (Data Science) الموجه

للهندسة:

١.٧.١ تصميم البحث ومجتمع الدراسة

يتمثل تصميم البحث في دراسة "نموذج تنبؤية" تعتمد على البيانات الضخمة. وبناءً على ذلك، يشمل مجتمع الدراسة كافة مشاريع البنية التحتية المنفذة في مدينة جدة بين عامي ٢٠١٨ و٢٠٢٤، لضمان مواءمة النتائج مع المتغيرات الاقتصادية الحديثة (الشمري، ٢٠٢١).

١.٧.٢ العينة وأدوات جمع البيانات

تعتمد الدراسة على عينة "قصدية" تشمل سجلات ١٥٠ مشروعاً مكتملاً أو قيد التنفيذ. وتتنوع أدوات الجمع بين:

- البيانات الثانوية: سجلات الجداول الزمنية المستخرجة من أنظمة أمانة جدة (العتيبي، ٢٠٢٣).
- البيانات الأولية: استبيان مقنن لـ ٢٠٠ خبير هندسي لتحديد أوزان مسببات التأخير، ومقابلات نصف مهيكلة مع محليي البيانات (حسن، ٢٠٢٢).

١.٧.٣ مراحل التحليل والمعالجة الخوارزمية

تتم معالجة البيانات عبر لغة Python ومروراً بالمرحلات التالية:

١. المعالجة المسبقة : تنظيف البيانات والتعامل مع القيم المفقودة باستخدام تقنيات.

٢. هندسة الميزات : تحويل العوامل الوصفية إلى قيم عددية.
٣. تدريب النماذج: استخدام خوارزمية ANN لمحاكاة العلاقات غير الخطية، وخوارزمية Random Forest لتقليل "فرط التخصص" (Overfitting) (غروي، ٢٠٢٥).
٤. التقييم: قياس الدقة باستخدام مقاييس (Mean Absolute Error – MAE) و(R-squared) لضمان موثوقية النتائج (الشهري، ٢٠٢٤).

١.٨ محددات البحث

- محددات موضوعية: يقتصر البحث على التنبؤ بـ "التأخير الزمني" فقط، دون التطرق للتكاليف إلا بشكل عرضي (باسويد، ٢٠٢٣).
- محددات مكانية: مدينة جدة بنطاقها الإداري المعتمد.
- محددات زمنية: البيانات المحصورة بين ٢٠١٨ و ٢٠٢٤.
- محددات فنية: تعتمد دقة النماذج على "نزاهة وشفافية" البيانات التي ستوفرها الجهات الحكومية والشركات (الشمري، ٢٠٢١).
- محددات بشرية: استجابة المهندسين للاستبيان ومدى دقة تقديراتهم للأوزان النسبية (العتيبي، ٢٠٢٣).

الفصل الثاني: الإطار النظري والدراسات السابقة

يُعدّ الإطار النظري الأساس الفلسفي والعلمي الذي تستند إليه هذه الدراسة، حيث يهدف هذا الفصل إلى تحقيق تكامل منهجي بين نظريات إدارة المشاريع التقليدية والمفاهيم الحديثة المرتبطة بتقنيات الذكاء الاصطناعي. ومن هذا المنطلق، فإن معالجة مشكلة التأخير في مشاريع البنية التحتية بمدينة جدة تتطلب فهماً شاملاً لمختلف المتغيرات الهندسية واللوجستية، إلى جانب توظيف أساليب تحليلية متقدمة قائمة على خوارزميات التعلم الآلي وفي ضوء ذلك، تم تنظيم هذا الفصل في عدة محاور رئيسية، تتناول الأسس النظرية ذات الصلة، ومفاهيم الذكاء الاصطناعي وتطبيقاته، وتحليل ظاهرة التأخير في المشاريع، وصولاً إلى عرض المنهجية التطبيقية المقترحة وتصميم أدوات الدراسة (العتيبي، ٢٠٢٣).

٢.١ المنطلقات النظرية للدراسة

٢.١.١ نظريات إدارة المشاريع والأداء الزمني

تستند هذه الدراسة إلى "نظرية قياس الأداء الزمني" التي تعتبر الزمن مورداً غير متجدد وعنصراً حرجاً في نجاح أي مشروع هندسي. وبناءً على ذلك، فإن إدارة المسار الحرج (CPM) ليست مجرد أداة جدولة، بل هي إطار عمل لضمان تدفق الأنشطة دون انقطاع. يتضح مما سبق أن أي انحراف في الأنشطة الحرجة يؤدي بالضرورة إلى تأخير كلي للمشروع، وهو ما يفسر حاجة مشاريع جدة إلى رقابة صارمة تتجاوز الأساليب الوصفية (الشمري، ٢٠٢١). علاوة على ذلك، تبرز "نظرية المخاطر في المشاريع" (Project Risk Management) كركيزة أساسية، حيث تفترض أن التأخير ليس حدثاً عشوائياً بل هو نتاج لمخاطر لم يتم التنبؤ بها أو إدارتها بشكل فعال. في ضوء ما تقدم، فإن الدمج بين إدارة المخاطر والذكاء الاصطناعي يهدف إلى تحويل المخاطر "المجهولة" إلى مخاطر "متوقعة" قابلة للقياس الكمي (باسويد، ٢٠٢٣؛ السلطان، ٢٠١٩).

٢.١.٢ نظريات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي

تعتمد الدراسة في شقها التقني على "نظرية التعلم الإشرافي" (Supervised Learning)، وهي إحدى ركائز الذكاء الاصطناعي التي تعتمد على تدريب الخوارزميات باستخدام بيانات تاريخية معروفة النتائج. يتضح مما سبق أن

النموذج التنبؤي يتعلم من الأخطاء والتأخيرات السابقة في مشاريع مدينة جدة ليبنى أنماطاً رياضية تتوقع المستقبل (غروي، ٢٠٢٥). وبناءً على ذلك، تم اختيار خوارزميات مثل "الغابات العشوائية" (Random Forest) و(XGBoost) لقدرتها العالية على التعامل مع البيانات غير الخطية والمتعددة الأبعاد التي تميز قطاع التشييد. في ضوء ما تقدم، يمثل هذا التوجه انتقالاً من "الذكاء الاصطناعي الرمزي" القائم على القواعد الثابتة إلى "الذكاء الاصطناعي الترابطي" الذي ينمو ويتطور مع زيادة حجم البيانات (الشهري، ٢٠٢٤؛ التميمي وعبدالله، ٢٠٢٢)

٢.٢ مفهوم الذكاء الاصطناعي وتطبيقاته الهندسية

٢.٢.١ تعريف الذكاء الاصطناعي (AI) والتعلم الآلي

يُعرف الذكاء الاصطناعي بأنه فرع متقدم من علوم الحاسوب يهدف إلى محاكاة القدرات الذهنية البشرية في التحليل والتنبؤ واتخاذ القرار. وبناءً على تحليل (محمود وآخرون، ٢٠٢١)، فإن الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية لا يهدف لاستبدال المهندس البشري، بل لتعزيز قدرته على معالجة البيانات الضخمة (Big Data) التي تفوق القدرة الاستيعابية للعقل البشري. يتضح مما سبق أن الأنظمة الذكية تستطيع مراقبة مئات المتغيرات في وقت واحد، مثل حالة الطقس، وتوريدات المواد، وأداء العمالة، لتقديم صورة شاملة عن المسار الزمني للمشروع (باسويد، ٢٠٢٣؛ الحارثي، ٢٠٢٠).

٢.٢.٢ تطبيقات الذكاء الاصطناعي في إدارة المشاريع

تتنوع تطبيقات الذكاء الاصطناعي لتشمل أتمتة مهام سير العمل وتحسين تقييم المخاطر بشكل مستمر. وبناءً على ذلك، يمكن للنماذج التنبؤية اكتشاف الأنماط الدقيقة في الأداء التاريخي التي قد يغفل عنها مديرو المشاريع التقليديون. يتضح مما سبق أن استخدام "التحليلات التنبؤية" يسمح بإجراء "محاكاة للسيناريوهات" (Scenario Modeling)، حيث يمكن للمهندس أن يرى أثر أي قرار إداري (مثل تغيير المورد) على تاريخ تسليم المشروع النهائي (الزهراني، ٢٠٢٣). وفي ضوء ما تقدم، أظهرت الدراسات أن النماذج الذكية ترفع دقة التنبؤ بمواعيد التسليم بنسب تتراوح بين ٧٠% إلى ٩٠% مقارنة بالطرق التقليدية التي تعتمد على الحدس (الشمري، ٢٠٢١؛ محمود وآخرون، ٢٠٢١).

٢.٣ تحليل ظاهرة التأخير في مشاريع البنية التحتية بمدينة جدة

٢.٣.١ تعريف وأنواع التأخير

يُعرّف التأخير في المشاريع الإنشائية بأنه تجاوز المدة الزمنية الفعلية للتنفيذ عن المدة المحددة تعاقدًا. ووفقًا للتصنيفات الأكاديمية، يمكن تقسيم التأخير إلى ثلاثة أنواع رئيسية: التأخير القابل للتعويض، والذي ينشأ نتيجة أخطاء أو تقصير من جهة المالك، والتأخير غير القابل للتعويض الناتج عن إخلال المقاول بالتزاماته، بالإضافة إلى التأخير المشترك أو القهري الذي يرتبط بظروف خارجة عن إرادة الطرفين، مثل الكوارث الطبيعية والسيول (العتيبي، ٢٠٢٣؛ السلطان، ٢٠١٩). ويتضح من ذلك أن التحديد الدقيق لنوع التأخير يُسهم في الحد من النزاعات القانونية بين الأطراف، وهو ما يمكن دعمه من خلال توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي القادرة على تحليل البيانات والوثائق بصورة موضوعية ودقيقة (القحطاني، ٢٠٢١).

٢.٣.٢ أسباب التأخير وخصوصية مدينة جدة

تتميّز مدينة جدة ببيئة إنشائية ذات خصائص فريدة، حيث تُعد العوامل البيئية من أبرز مسببات التأخير، لا سيما في المشاريع المرتبطة بتصريف مياه الأمطار. وتشير الدراسات إلى أن التقلبات المناخية ومخاطر الفيضانات المفاجئة تؤدي في كثير من الأحيان إلى توقف الأعمال لفترات زمنية ممتدة (عبد الله، ٢٠٢٢). إضافة إلى ذلك، تلعب العوامل الإدارية دورًا محوريًا في حدوث التأخير، وعلى رأسها التعديلات المتكررة في التصميم، والتي تُسهم في إرباك الجداول الزمنية؛ إذ يرى عدد كبير من الخبراء أن هذه التعديلات تمثل أحد أهم أسباب التعثر (الشمري، ٢٠٢١؛ القحطاني، ٢٠٢١).

ومن جانب آخر، تُعد العوامل المالية من المؤثرات الرئيسية، حيث يؤدي نقص السيولة لدى المقاولين وتأخر صرف المستحقات المالية إلى تعطل تنفيذ الأعمال في الموقع، مما ينعكس سلبيًا على سير المشروع واستمراره (حسن، ٢٠٢٢؛ الحربي، ٢٠٢١). ويتضح من ذلك أن أسباب التأخير في مشاريع جدة تتسم بطبيعة مركبة، تتداخل فيها العوامل البيئية والإدارية والمالية بشكل متكامل.

٢.٤ النمذجة التنبؤية الذكية: الخوارزميات المستخدمة

٢.٤.١ خوارزمية الغابات العشوائية (Random Forest)

تُعد الغابات العشوائية تقنية "تعلّم جماعي" (Ensemble Learning) تعتمد على بناء مئات من "أشجار القرار" المستقلة ثم دمج نتائجها للوصول إلى التنبؤ النهائي. وبناءً على المبدأ الرياضي، فإن هذه الخوارزمية تتفوق في التعامل مع البيانات "المزعجة" (Noisy Data) والمفقودة التي تميز سجلات المشاريع في جدة (غروي، ٢٠٢٥). يتضح مما سبق أن الميزة الكبرى لـ Random Forest هي قدرتها على قياس "أهمية الميزات" (Feature Importance)، مما يسمح للباحث بتحديد أي عوامل (مثل اسم المقاول أو نوع التربة) هي الأكثر تأثيراً في حدوث التأخير (الزهراني، ٢٠٢٣؛ التميمي وعبدالله، ٢٠٢٢).

٢.٤.٢ خوارزمية (XGBoost) والتعلم العميق

تمثل خوارزمية (XGBoost) قمة تطور تقنيات التعزيز (Boosting)، حيث تركز على تصحيح أخطاء النماذج السابقة بشكل متتابع لتقليل الانحراف. وبناءً على تحليل (الشهري، ٢٠٢٤)، فإن هذه الخوارزمية تتميز بكفاءة حسابية عالية، مما يجعلها مثالية لمعالجة البيانات الضخمة لمشاريع البنية التحتية العملاقة. يتضح مما سبق أن دمج هذه الخوارزميات مع الشبكات العصبية (ANN) يسمح بنمذجة العلاقات غير الخطية المعقدة بين مسببات التأخير والمدة الزمنية الفعلية (بشير، ٢٠٢٤؛ محمود وآخرون، ٢٠٢١).

٢.٥ منهجية البحث وطرق التنفيذ

تعتمد هذه الدراسة على المنهج المختلط الذي يجمع بين التحليل النوعي والكمي لضمان شمولية النتائج ودقتها (الشمري، ٢٠٢١).

٢.٥.١ المنهج النوعي

يتضمن هذا المسار إجراء مقابلات معمقة مع خبراء إدارة المشاريع في أمانة جدة ومهندسي المواقع. وبناءً على ذلك، يهدف هذا الجزء إلى تحديد العوامل "الخفية" للتأخير التي قد لا تظهر في السجلات الرسمية (العتيبي، ٢٠٢٣). يتضح مما سبق أن مخرجات هذه المقابلات ستشكل المدخلات الأساسية لبناء استبيان الدراسة وتحديد ميزات النموذج التنبؤي (باسويد، ٢٠٢٣).

٢.٥.٢ المنهج الكمي والنمذجة الرياضية

يمثل هذا الجزء قلب الدراسة التطبيقي، ويمر بـ ٥ مراحل تقنية:

جمع البيانات: الحصول على بيانات تاريخية لـ ١٥٠ مشروع بنية تحتية في جدة تشمل (الميزانية، الموقع، المقاول، الجدول الزمني) (محمود وآخرون، ٢٠٢١).

المعالجة المسبقة: تنظيف البيانات ومعالجة القيم المفقودة باستخدام تقنيات (Imputation) عبر لغة Python (غروي، ٢٠٢٥).

تقسيم البيانات: تقسيم البيانات بنسبة ٧٠% للتدريب و ٣٠% للاختبار لتقييم قدرة الخوارزمية (الشهري، ٢٠٢٤).

بناء النماذج: تطبيق خوارزميات (Random Forest, XGBoost, ANN) (التميمي وعبدالله، ٢٠٢٢).

التقييم: قياس الأداء باستخدام مقاييس (Accuracy, Precision, Recall, ROC-AUC) لضمان موثوقية النموذج (غروي، ٢٠٢٥).

٢.٦ أداة الدراسة: استبيان استخدام الذكاء الاصطناعي

تم تصميم الاستبيان كأداة لجمع البيانات الأولية من المهندسين ومديري المشاريع في جدة، لتقييم وعيهم وقبولهم للتقنيات الذكية.

القسم الأول: البيانات العامة (الديموغرافية)

الرقم	العنصر	الإجابة
1	المسمى الوظيفي	(مهندس مشروع / مدير PMO / مقاول / استشاري)
2	سنوات الخبرة	(أقل من ٥ / ٥ - ١٠ / أكثر من ١٠ سنوات)
3	نوع الجهة	(حكومية / خاصة)

القسم الثاني: محاور الاستبيان (مقياس ليكرت الخماسي)

(١ = لا أوافق إطلاقاً، ٢ = لا أوافق، ٣ = محايد، ٤ = موافق، ٥ = موافق بشدة)

م	العبارة	1	2	3	4	5
1	لدي معرفة كافية بمفهوم الذكاء الاصطناعي وتطبيقاته الهندسية.	☐	☐	☐	☐	☐
2	أعتقد أن التعلم الآلي قادر على التنبؤ بمخاطر التأخير قبل وقوعها.	☐	☐	☐	☐	☐
3	أداء المقاولين والموردين هو العامل الأكثر تأثيراً على تأخير مشاريع جدة.	☐	☐	☐	☐	☐
4	التغييرات التصميمية المتكررة هي السبب الرئيسي في إرباك الجداول الزمنية.	☐	☐	☐	☐	☐
5	العوامل البيئية (مثل السيول) تمثل خطراً كبيراً على تنفيذ البنية التحتية بجدة.	☐	☐	☐	☐	☐
6	دمج الذكاء الاصطناعي سيققل من التكاليف المهدرة نتيجة التعثر الزمني.	☐	☐	☐	☐	☐

7	الجهات الحكومية في جدة تمتلك جاهزية رقمية لتبني النماذج التنبؤية.	☐	☐	☐	☐	☐
8	التنبؤ المبكر يسمح بإعادة جدولة الموارد بشكل استباقي وفعال.	☐	☐	☐	☐	☐
9	النماذج التقليدية (CPM) لم تعد كافية لمواجهة تعقيدات مشاريع رؤية ٢٠٣٠.	☐	☐	☐	☐	☐
10	تدريب الكوادر الهندسية على "علم البيانات" ضرورة لنجاح مشاريع المستقبل.	☐	☐	☐	☐	☐

٢.٧ حدود الدراسة

- **الحدود المكانية:** تقتصر الدراسة على مشاريع البنية التحتية داخل النطاق الإداري لمدينة جدة فقط (عبد الله، ٢٠٢٢).
- **الحدود الزمنية:** تعتمد الدراسة على البيانات التاريخية للمشاريع المنفذة بين عامي (٢٠١٥ - ٢٠٢٥) لضمان مواعمة النتائج مع المتغيرات الاقتصادية الحديثة (الشمري، ٢٠٢١).
- **الحدود الموضوعية:** تركز الدراسة على "التنبؤ بالتأخير الزمني" باستخدام الذكاء الاصطناعي، ولا تتناول جوانب الجودة الفنية للمواد أو النزاعات القانونية إلا في سياق تأثيرها الزمني (باسويد، ٢٠٢٣).

المراجع

١. أبو زيد، أحمد. (٢٠٢٢). الذكاء الاصطناعي وجودة الحكم في المؤسسات. مجلة كلية الاقتصاد والعلوم السياسية، ٢٣(٤)، ١٤٥-١٧٦.
٢. باسويد، خلود علي. (٢٠٢٣). واقع الذكاء الاصطناعي على إدارة المشاريع في القطاع الحكومي. جدة: جامعة ميدأوشن.
٣. بشير، محمد. (٢٠٢٤). المقارنة بين نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) ونماذج GARCH في التنبؤ الهندسي. أطروحة دكتوراه، جامعة أم درمان الإسلامية.
٤. التميمي، خالد، وعبدالله، سعيد. (٢٠٢٢). استخدام خوارزميات الذكاء الاصطناعي في التنبؤ بالمخاطر الزمنية لمشاريع البنية التحتية. مجلة التخطيط العمراني والهندسي، العدد ١٥، ٥٥-٧٠.
٥. الحارثي، فهد. (٢٠٢٠). تطبيقات الذكاء الاصطناعي في تحسين إدارة المشاريع الإنشائية في المملكة العربية السعودية. أوراق عمل المؤتمر السعودي للبناء وإدارة المشاريع، الرياض.
٦. الحربي، جنا خالد. (٢٠٢١). أسباب تعثر المشاريع الإنشائية في المملكة العربية السعودية: دراسة حالة للمشاريع الحكومية. المجلة العربية للعلوم ونشر الأبحاث، ٥(١٢)، ٤٥-٦٨.
٧. حجازي، هيثم. (٢٠١٣). مبادئ إدارة المشروعات وتحليل الجدوى. عمان: دار صفاء للنشر والتوزيع.
٨. حسن، إسماعيل عبد الله. (٢٠٢٢). أثر التحول الرقمي على تحقيق الأهداف التنموية في القطاع الحكومي وفق رؤية ٢٠٣٠. مجلة البحوث الهندسية، ١٤(٢)، ١١٠-١٣٥.
٩. خير الدين، موسى. (٢٠١٢). إدارة المشاريع المعاصرة: منهج متكامل. عمان: دار وائل للنشر.
١٠. دودين، أحمد. (٢٠١٤). إدارة المشاريع المعاصرة: نظري وكمي. عمان: دار اليازوري العلمية.
١١. الزهراني، نايف. (٢٠٢٣). تبني نمذجة معلومات البناء في صناعة التشييد السعودية: تحليل هيكلي تفسيري. مجلة جامعة أم القرى للهندسة والعمارة، ١٥(٧)، ٦١٣-٦٣٠.
١٢. السلطان، جمال. (٢٠١٩). أسباب تأخر تنفيذ مشاريع البنية التحتية في المملكة العربية السعودية. مجلة الهندسة المدنية، جامعة الملك سعود.
١٣. الشهري، خالد عبد الله. (٢٠٢٤). تطبيقات التعلم الآلي في إدارة المخاطر الهندسية. الرياض: مكتبة الرشد.

١٤. الشمري، عبد الله. (٢٠٢١). تقييم عوامل تأخر إنجاز المشاريع الإنشائية في المملكة العربية السعودية. جدة: دار الأكاديميون للنشر.
١٥. الشمري، محمد عبد الله. (٢٠٢٠). التنبؤ بانقطاع الخدمات في المدن الذكية بالاعتماد على الذكاء الاصطناعي. المجلة الدولية للهندسة والابتكار، ٨(٣)، ٢٠١-٢٢٥.
١٦. العتيبي، فيصل. (٢٠٢٣). أسباب تعثر المشاريع السعودية ومتطلبات تقييدها. مجلة العلوم الإنسانية والاجتماعية، ١٠(٤)، ٨٥-١١٢.
١٧. عبد الله، وليد سليمان. (٢٠٢٢). إدارة مشاريع البنية التحتية في البلديات: دراسة حالة عن عمليات التخطيط والتنفيذ. جدة: مطابع أمانة جدة.
١٨. العنزي، محمد، والشمري، عبدالله. (٢٠٢١). إدارة مخاطر التأخير في المشاريع الحكومية السعودية. الظهران: جامعة الملك فهد للبترول والمعادن.
١٩. غروي، محمد عبد الله. (٢٠٢٥). بناء نماذج ذكية للتنبؤ بالأداء الهندسي. المجلة العربية للمعلوماتية، ٦(١)، ١٢-٣٤.
٢٠. القحطاني، محمد. (٢٠٢١). تحليل مسببات التأخير في المشاريع الإنشائية الكبرى في المنطقة الغربية. مكة المكرمة: جامعة أم القرى.
٢١. كتوعة، هشام صالح. (٢٠٠٤). نظم المعلومات الإدارية. جدة: مكتبة خوارزم.
٢٢. محمود، أحمد جمال. (٢٠٢١). فعالية النماذج الذكية في بناء وتطوير الأنظمة التنبؤية في مجال التسيير. مجلة الدراسات الهندسية المتقدمة، ٩(٢)، ١٥٦-١٧٨.
٢٣. النجار، فايز جمعة. (٢٠١٠). نظم المعلومات الإدارية: منظور إداري. عمان: دار الحامد للنشر والتوزيع.
٢٤. الهويمل، سارة. (٢٠١٤). أثر التكنولوجيا على تطوير إدارة المشاريع. الرياض: جامعة الملك سعود.