



أثر تطبيق نمذجة معلومات المنشأة على تقليل إعادة العمل: دراسة تطبيقية على مشاريع هندسة النفط والغاز في المملكة العربية السعودية.

إعداد الطالب/

علي باسم المعلم

2021201214

المشرف الثاني/

د.فايز جراد

المشرف الرئيسي/

د. الفيصل عبد الحميد

العام الدراسي:

2026 – 1448

المستخلص

هدفت هذه الدراسة إلى الكشف عن أثر تطبيق نمذجة معلومات المنشأة (BIM) بأبعادها الأربعة المتمثلة في كشف التعارضات التصميمية، والتنسيق بين التخصصات الهندسية، والمحاكاة الرقمية وإدارة الجدول الزمني، وإدارة جودة التنفيذ رقمياً، على تقليل إعادة العمل في مشاريع هندسة النفط والغاز. واعتمدت الدراسة المنهج الوصفي التحليلي، مع توظيف الأسلوب الكمي في جمع البيانات وتحليلها. وتكون مجتمع الدراسة من العاملين في مشاريع هندسة النفط والغاز من المهندسين ومديري المشاريع ومنسقي النمذجة والمشرفين الفنيين، وبلغت العينة (٤٠٠) مفردة جرى توزيع الاستبانة عليها، استرد منها واصلح للتحليل (٣٥٧) استبانة. واستخدمت جملة من الأساليب الإحصائية باستخدام برنامج (SPSS v.27)، تضمنت معامل ألفا كرونباخ ومعامل ارتباط بيرسون وتحليل الانحدار الخطي البسيط والمتعدد. وأظهرت النتائج وجود أثر ذي دلالة إحصائية عند مستوى ($\alpha \leq 0.05$) لأبعاد النمذجة مجتمعة على تقليل إعادة العمل، إذ بلغ معامل التحديد (0.718)، وتبين أن بعد كشف التعارضات التصميمية هو الأكثر تأثيراً في النموذج المتعدد، فيما حقق بعد المحاكاة الرقمية أعلى معامل ارتباط بسيط بالمتغير التابع. وأوصت الدراسة بتبني النمذجة بوصفها منظومة متكاملة، وبناء بيئة بيانات مشتركة بين فرق التخصصات، وإنشاء وحدات متخصصة لإدارة الجودة الرقمية، وتطوير الإطار التعاقد للمشاريع بما يتضمن متطلبات صريحة لاعتماد النمذجة، فضلاً عن تكثيف الاستثمار في التقنيات المكملة كالواقع المعزز والذكاء الاصطناعي لرفع كفاءة التحقق والتحليل التنبئي للأخطاء.

الكلمات المفتاحية: نمذجة معلومات المنشأة، كشف التعارضات التصميمية، التنسيق بين التخصصات الهندسية، المحاكاة الرقمية، إدارة الجودة الرقمية، إعادة العمل، مشاريع النفط والغاز.

Abstract

This study aimed to investigate the impact of implementing Building Information Modeling (BIM) — through its four dimensions: clash detection, interdisciplinary coordination, 4D/5D digital simulation, and digital quality management — on rework reduction in oil and gas engineering projects. The study adopted the descriptive-analytical approach, employing a quantitative method for data collection and analysis. The study population consisted of professionals working in oil and gas engineering projects, including engineers, project managers, BIM coordinators, and technical supervisors. A questionnaire was distributed to (400) respondents, of which (357) were valid for analysis. Several statistical methods were applied using SPSS v.27, including Cronbach's Alpha, Pearson correlation, and simple and multiple linear regression analyses. The results revealed a statistically significant impact at the level ($\alpha \leq 0.05$) of the combined BIM dimensions on rework reduction, with a coefficient of determination ($R^2 = 0.718$). Clash detection emerged as the most influential dimension in the multiple regression model, while digital simulation achieved the highest simple correlation coefficient with the dependent variable. The study recommends adopting BIM as an integrated system rather than fragmented tools, establishing a common data environment among disciplinary teams, creating specialized units for digital quality management, and developing the contractual framework of projects to include explicit BIM requirements. It also recommends intensifying investment in complementary technologies such as augmented reality and artificial intelligence to enhance visual verification and predictive analysis of errors.

Keywords: Building Information Modeling, Clash Detection, Interdisciplinary Coordination, Digital Simulation, Digital Quality Management, Rework, Oil and Gas Projects.

المقدمة

تُمثِّل صناعة التشييد ركيزة أساسية في التنمية الاقتصادية والبنية التحتية على المستوى العالمي، إذ تتداخل فيها تخصصات هندسية وإدارية متعددة تتطلب مستوى عالياً من التنسيق والتكامل لضمان تنفيذ المشاريع وفقاً للمواصفات المحددة والجداول الزمنية المعتمدة والميزانيات المرصودة. ويزداد هذا التعقيد بشكل ملحوظ في مشاريع هندسة النفط والغاز التي تتسم بضخامة حجمها وتشعب واجهاتها الهندسية وحساسية معايير السلامة والجودة المطبقة فيها، مما يجعلها من أكثر المشاريع الهندسية احتياجاً إلى أدوات تقنية متطورة تُعزِّز كفاءة الأداء وتحدُّ من الأخطاء التنفيذية. (Waqar et al., 2023)

وفي هذا السياق، برزت تقنية نمذجة معلومات المنشأة (Building Information Modeling – BIM) بوصفها نقلة نوعية في أساليب إدارة المشاريع الهندسية، حيث تُتيح إنشاء نموذج رقمي متكامل يجمع بين الأبعاد الهندسية والزمنية والتكلفة في بيئة تشاركية موحدة تُمكن جميع أطراف المشروع من العمل على منصة واحدة. وقد أثبتت الدراسات أن تطبيق هذه التقنية يُساهم في تحسين مجالات المعرفة لإدارة المشاريع بصورة شاملة، بما في ذلك إدارة التكلفة والجداول الزمنية والمخاطر والاتصالات والجودة، كما أنها تُوفِّر أدوات متقدمة لكشف التعارضات التصميمية والتنسيق بين التخصصات والمحاكاة الرقمية قبل مرحلة التنفيذ الفعلي. (Shaqour, 2022)

ومن جهة أخرى، تُعدُّ مشكلة إعادة العمل (Rework) من أكثر المشكلات المزمنة التي تواجه صناعة التشييد عالمياً، إذ تُشير إلى إعادة تنفيذ أنشطة أو عمليات سبق إنجازها بسبب عدم مطابقتها للمواصفات أو وجود أخطاء تصميمية أو تنفيذية، وهو ما يترتب عليه استنزاف كبير للموارد المالية والبشرية والوقتية. وتتنوع أسباب إعادة العمل بين أسباب تصميمية وتنسيقية وتنفيذية ورقابية، وتتوزع مسؤوليتها بين أطراف العقد المختلفة وفقاً لمراحل المشروع المتعددة من التصميم إلى التوريد إلى التنفيذ. (Asadi et al., 2023)

وتتفاقم مشكلة إعادة العمل في مشاريع النفط والغاز بصورة أشد حدة مقارنةً بمشاريع التشييد التقليدية، نظراً لتعدد التخصصات الهندسية المتداخلة وارتفاع تكلفة المواد المتخصصة والقيود الزمنية المشددة المرتبطة بجداول الإنتاج والتشغيل. وتُشير الشواهد الميدانية إلى أن ضعف التنسيق بين فرق التصميم والتغييرات المتكررة ونقص الرقابة على جودة التنفيذ تأتي في مقدمة العوامل المسببة لإعادة العمل في السياق المصري، وهو ما يلقي أعباءً مالية وزمنية إضافية على هذه المشاريع. (Al-Janabi et al., 2020)

وتأسيساً على ما تقدّم، تسعى هذه الدراسة إلى استكشاف أثر تطبيق نمذجة معلومات المنشأة بأبعادها الأربعة — كشف التعارضات التصميمية، والتنسيق بين التخصصات الهندسية، والمحاكاة الرقمية وإدارة الجدول الزمني، وإدارة جودة التنفيذ رقمياً — على تقليل إعادة العمل في مشاريع هندسة النفط والغاز في مصر، سعياً نحو سدِّ الفجوة البحثية القائمة وتقديم إطار تطبيقي يُساهم في تعزيز كفاءة هذه المشاريع الحيوية.

مشكلة الدراسة

تُعدُّ صناعة التشييد في قطاع النفط والغاز من أكثر القطاعات الهندسية تعقيداً وحساسيةً على المستوى العالمي، إذ تتشابك فيها تخصصات هندسية متعددة تشمل الهندسة الإنشائية والميكانيكية والكهربائية وهندسة الأنابيب وهندسة العمليات، وتخضع لمعايير سلامة وجودة صارمة تفرضها طبيعة المنشآت النفطية وما ينطوي عليه تشغيلها من مخاطر بيئية وبشرية جسيمة. وفي ظل هذا التعقيد الهندسي المتشعب، تبرز مشكلة إعادة العمل (Rework) بوصفها واحدة من أخطر التحديات المزمنة التي تُهدِّد أداء مشاريع النفط والغاز وتُلقي بظلالها الثقيلة على مثلث المشروع الذهبي المتمثِّل في التكلفة والوقت والجودة.

وتتجسّد مشكلة إعادة العمل في الاضطرار إلى إعادة تنفيذ أنشطة أو عمليات سبق إنجازها بسبب عدم مطابقتها للمواصفات الفنية أو الرسومات التصميمية أو معايير الجودة المعتمدة، وهو ما يستنزف موارد مالية وبشرية ووقتية كان يُفترض توجيهها نحو أنشطة ذات قيمة مضافة. وتتفاقم هذه المشكلة في مشاريع النفط والغاز بصورة أشد حدة مقارنةً بمشاريع

التشييد التقليدية، نظراً لارتفاع تكلفة المواد المتخصصة وصعوبة إعادة تشكيلها، وتعدد الجهات الهندسية بين التخصصات، والقيود الزمنية المشددة المرتبطة بجدول الإنتاج والتشغيل، فضلاً عن البيانات الجغرافية القاسية التي تُنفَّذ فيها هذه المشاريع كالمناطق الصحراوية والبحرية.

وعلى الرغم من التطور التقني الهائل الذي شهدته صناعة التشييد العالمية خلال العقد الأخير، لا سيما في مجال نمذجة معلومات المنشأة (BIM) وما تُتيح من إمكانيات متقدمة في كشف التعارضات التصميمية والتنسيق الرقمي بين التخصصات والمحاكاة رباعية وخماسية الأبعاد وإدارة الجودة رقمياً، إلا أن قطاع النفط والغاز — وخاصةً في الدول العربية ومصر تحديداً — لا يزال يعاني من تبنٍّ محدود وجزئي لهذه التقنية، مما يُلقي على الأساليب التقليدية في التنسيق والمراجعة ومراقبة الجودة التي أثبتت محدوديتها في التعامل مع التعقيد المتزايد لهذه المشاريع.

وتتبقى مشكلة الدراسة الحالية من الملاحظة الميدانية والمتابعة العملية التي تُشير إلى أن نسبة كبيرة من حالات إعادة العمل في مشاريع النفط والغاز في مصر ترتبط بأسباب كان يمكن تفاديها لو تم توظيف تقنيات نمذجة معلومات المنشأة بأبعادها المتكاملة، إذ تتكرر التعارضات بين الرسومات الهندسية للتخصصات المختلفة التي لا تُكتشف إلا في مرحلة التنفيذ، ويحدث ضعف في التنسيق بين فرق العمل بسبب غياب منصة رقمية مركزية موحدة، ويُعاد تنفيذ أعمال بسبب سوء تسلسل الأنشطة الذي كان يمكن تلافيه عبر المحاكاة الرقمية المسبقة، ونقع انحرافات في الجودة كان يمكن رصدها مبكراً من خلال أنظمة إدارة الجودة الرقمية المدمجة في النموذج.

وبالتوازي مع ذلك، تكشف مراجعة الأدبيات العلمية عن فجوة بحثية واضحة تتمثل في ندرة الدراسات التطبيقية التي تناولت العلاقة بين أبعاد نمذجة معلومات المنشأة وتقليل إعادة العمل في سياق مشاريع النفط والغاز بشكل خاص، حيث تركّزت معظم الدراسات السابقة على مشاريع البناء السكنية والتجارية، أو تناولت نمذجة معلومات المنشأة وإعادة العمل كمتغيرين منفصلين دون الربط التطبيقي بينهما في هذا القطاع الحيوي.

وتأسيساً على ما سبق، تتبلور مشكلة الدراسة في التساؤل الرئيسي التالي: نما أثر تطبيق نمذجة معلومات المنشأة (BIM) بأبعاده (كشف التعارضات التصميمية، والتنسيق بين التخصصات الهندسية، والمحاكاة الرقمية وإدارة الجدول الزمني، وإدارة جودة التنفيذ رقمياً) على تقليل إعادة العمل في مشاريع هندسة النفط والغاز في السعودية؟

أهداف الدراسة:

تهدف هذه الدراسة إلى التعرف على أثر تطبيق نمذجة معلومات المنشأة (BIM) بأبعاده الأربعة (كشف التعارضات التصميمية، والتنسيق بين التخصصات الهندسية، والمحاكاة الرقمية وإدارة الجدول الزمني، وإدارة جودة التنفيذ رقمياً) على تقليل إعادة العمل في مشاريع هندسة النفط والغاز.

ويُفرَّع من هذا الهدف الرئيسي الأهداف الفرعية التالية:

1. التعرف على أثر كشف التعارضات التصميمية (Clash Detection) عبر نمذجة معلومات المنشأة على تقليل إعادة العمل في مشاريع هندسة النفط والغاز.

2. التعرف على أثر التنسيق بين التخصصات الهندسية (Interdisciplinary Coordination) عبر نمذجة معلومات المنشأة على تقليل إعادة العمل في مشاريع هندسة النفط والغاز.

3. التعرف على أثر المحاكاة الرقمية وإدارة الجدول الزمني (4D/5D Simulation) عبر نمذجة معلومات المنشأة على تقليل إعادة العمل في مشاريع هندسة النفط والغاز.

4. التعرف على أثر إدارة جودة التنفيذ رقمياً (Digital Quality Management) عبر نمذجة معلومات المنشأة على تقليل إعادة العمل في مشاريع هندسة النفط والغاز.

5. تقديم توصيات علمية وعملية لشركات النفط والغاز العاملة في مصر حول آليات تبني نمذجة معلومات المنشأة بأبعادها المتكاملة بما يُسهم في الحد من إعادة العمل وتحسين الأداء الكلي للمشاريع.

أسئلة الدراسة

السؤال الرئيسي: ما أثر تطبيق نمذجة معلومات المنشأة (BIM) بأبعاده (كشف التعارضات التصميمية، والتنسيق بين التخصصات الهندسية، والمحاكاة الرقمية وإدارة الجدول الزمني، وإدارة جودة التنفيذ رقمياً) على تقليل إعادة العمل في مشاريع هندسة النفط والغاز؟

الأسئلة الفرعية:

1. ما أثر كشف التعارضات التصميمية عبر نمذجة معلومات المنشأة على تقليل إعادة العمل في مشاريع النفط والغاز؟
2. ما أثر التنسيق الرقمي بين التخصصات الهندسية عبر نمذجة معلومات المنشأة على تقليل إعادة العمل في مشاريع النفط والغاز؟
3. ما أثر المحاكاة الرقمية رباعية وخماسية الأبعاد (4D/5D) عبر نمذجة معلومات المنشأة على تقليل إعادة العمل في مشاريع النفط والغاز؟

أهمية الدراسة

الأهمية العلمية (النظرية):

تكتسب هذه الدراسة أهميتها العلمية من عدة جوانب جوهرية تسهم في إثراء المعرفة الأكاديمية في مجالي نمذجة معلومات المنشأة وإدارة مشاريع التشييد:

- تُعالج الدراسة فجوة بحثية واضحة تتمثل في ندرة الدراسات التي تربط بين أبعاد نمذجة معلومات المنشأة وتقليل إعادة العمل بشكل مباشر في قطاع النفط والغاز تحديداً، إذ إن غالبية الأدبيات المتاحة تناولت هذه العلاقة في مشاريع البناء العامة والسكنية دون التعمق في خصوصية المشاريع النفطية التي تتسم بتعقيد هندسي ومتطلبات سلامة وجودة استثنائية.
- تُقدّم الدراسة إطاراً نظرياً متكاملًا يجمع أربعة أبعاد لنمذجة معلومات المنشأة في نموذج بحثي واحد قابل للاختبار الإحصائي، وهو ما يُمثّل إضافة منهجية تتجاوز الدراسات السابقة التي تناولت كل بُعد بمعزل عن غيره، مما يُتيح فهماً أعمق للتأثير التراكمي والتفاعلي لهذه الأبعاد مجتمعة على تقليل إعادة العمل.
- تُسهم الدراسة في تطوير الأدبيات العربية المتخصصة في نمذجة معلومات المنشأة، حيث لا تزال المكتبة العربية تفتقر إلى دراسات تطبيقية كافية تتناول هذا الموضوع في سياق مشاريع النفط والغاز، مما يجعل هذه الدراسة مرجعاً علمياً يمكن أن يُبنى عليه في أبحاث مستقبلية.

الأهمية العملية (التطبيقية):

تتجلى الأهمية العملية لهذه الدراسة في تقديمها إسهامات ملموسة وقابلة للتطبيق المباشر لمختلف الأطراف المعنية بمشاريع النفط والغاز:

- تُزوّد الدراسة شركات المقاولات والاستشارات الهندسية العاملة في قطاع النفط والغاز بأدلة تطبيقية تُساعد على تبرير الاستثمار في تقنيات نمذجة معلومات المنشأة أمام الإدارة العليا وأصحاب المصلحة، من خلال تقديم بيانات واقعية حول حجم توفير المتوقع في التكلفة والوقت نتيجة تقليل إعادة العمل.
- تُرشّد الدراسة مديري المشاريع إلى أولويات التطبيق التقني، فمن خلال الكشف عن البُعد الأكثر تأثيراً من بين الأبعاد الأربعة، يمكن توجيه الموارد المحدودة نحو الأبعاد ذات العائد الأعلى أولاً ثم التوسّع تدريجياً في تبني الأبعاد الأخرى، وهو ما يضمن كفاءة أعلى في إدارة ميزانية التحول الرقمي.
- تُساعد الدراسة الشركات المشغلة في صياغة سياسات وإجراءات تشغيل قياسية تدمج أبعاد نمذجة معلومات المنشأة الأربعة في دورة حياة المشروع بدءاً من مرحلة التصميم المفاهيمي مروراً بالتصميم التفصيلي والتوريد والتنفيذ وصولاً إلى التسليم والتشغيل، مما يُؤسّس لمنهجية عمل موحدة تحدّ من إعادة العمل في كل مرحلة.

- تُبرز الدراسة المهارات الرقمية المطلوبة لتطبيق كل بُعد من أبعاد نمذجة معلومات المنشأة بفاعلية، مما يساعد أقسام الموارد البشرية والتطوير المهني في شركات النفط والغاز على تصميم برامج تدريبية مستهدفة ومتدرجة تسد الفجوة في الكفاءات الرقمية لدى المهندسين والفنيين.
- تُقدّم الدراسة توصيات عملية للجهات التنظيمية والحكومية المعنية بقطاع التشييد والنفط حول ضرورة تضمين مستوى معين من نمذجة معلومات المنشأة كمتطلب تعاقدى إلزامي في المشاريع الكبرى، مما يسهم في رفع معايير الجودة على مستوى القطاع ككل.
- تُفيد نتائج الدراسة شركات التأمين العاملة في قطاع مشاريع النفط والغاز في تقييم المخاطر بشكل أكثر دقة، حيث يمكن ربط مستوى نضج تبني نمذجة معلومات المنشأة في المشروع بانخفاض احتمالية حدوث إعادة العمل، وبالتالي إمكانية تعديل أقساط التأمين وفقاً لذلك.

المنطلقات النظرية للدراسة:

أولاً: الإطار المفاهيمي لنمذجة معلومات المنشأة (BIM) — المتغير المستقل

تُعرّف نمذجة معلومات المنشأة (Building Information Modeling – BIM) بأنها عملية رقمية متكاملة تقوم على إنشاء نموذج ثلاثي الأبعاد غني بالمعلومات يُمثّل الخصائص الفيزيائية والوظيفية للمنشأة طوال دورة حياتها، بدءاً من مرحلة التصميم المفاهيمي مروراً بالتصميم التفصيلي والتنفيذ وصولاً إلى التشغيل والصيانة. ولا تقتصر هذه التقنية على كونها برنامجاً حاسوبياً لإنتاج الرسومات الهندسية، بل تُمثّل منهجية عمل تشاركية تُتيح لجميع أطراف المشروع — مالك ومصمم ومقاول ومشرف — الوصول إلى قاعدة بيانات مركزية موحدة تُحدّث آنياً، مما يضمن اتساق المعلومات ودقتها عبر جميع مراحل المشروع وتخصصاته الهندسية المختلفة.

وقد تطوّر مفهوم نمذجة معلومات المنشأة عبر عدة مستويات نضج تبدأ من المستوى الصفري الذي يعتمد على الرسومات ثنائية الأبعاد غير المترابطة، ثم المستوى الأول الذي يجمع بين الرسومات ثنائية وثلاثية الأبعاد مع بعض التنسيق، ثم المستوى الثاني الذي يُوجب العمل التشاركي على نماذج منفصلة تُدمج دورياً، وصولاً إلى المستوى الثالث الذي يُمثّل التكامل الكامل عبر نموذج موحّد مشترك في بيئة سحابية. وتزايد أهمية هذه التقنية في مشاريع النفط والغاز التي تتسم بتعدد التخصصات الهندسية المتداخلة — كهندسة الأنابيب والمعدات الدوّارة والأوعية الضاغطة والأنظمة الكهربائية وأنظمة التحكم والأجهزة الدقيقة — وهو ما يجعل التنسيق البدوي التقليدي بينها عرضة للأخطاء والتعارضات التي تُفسي حتماً إلى إعادة العمل.

وفي إطار هذه الدراسة، سيتم تناول نمذجة معلومات المنشأة من خلال أربعة أبعاد رئيسية تُمثّل القدرات الجوهرية لهذه التقنية ذات الصلة المباشرة بتقليل إعادة العمل:

البعد الأول — كشف التعارضات التصميمية: (Clash Detection) ويُقصد به العملية الآلية التي يتم من خلالها فحص النموذج الرقمي المتكامل للكشف عن أي تداخلات أو تعارضات بين العناصر الهندسية التابعة لتخصصات مختلفة قبل البدء في التنفيذ الفعلي. وتشمل هذه التعارضات التعارضات الصلبة (Hard Clashes) التي تحدث عند تقاطع عنصرين مادياً كتقاطع أنبوب مع عنصر إنشائي، والتعارضات اللينة (Soft Clashes) التي تتعلّق بعدم توفر مسافات كافية للتشغيل أو الصيانة، وتعارضات سير العمل (Workflow Clashes) المرتبطة بالتضارب في الجدول الزمني للتنفيذ. ويسهم هذا البعد في منع وصول الأخطاء التصميمية إلى مرحلة التنفيذ حيث تكون تكلفة معالجتها أضعافاً مضاعفة.

البعد الثاني — التنسيق بين التخصصات الهندسية: (Interdisciplinary Coordination) ويُشير إلى استخدام منصة نمذجة معلومات المنشأة كبيئة عمل تشاركية مركزية تُمكن فرق التصميم والتنفيذ من مختلف التخصصات الهندسية من العمل المتزامن على نموذج موحّد، مما يضمن تدفّق المعلومات بشفافية وآنية بين جميع الأطراف. ويتضمّن ذلك توحيد

معايير الرسم والتسمية وأنظمة الإحداثيات، وإدارة الإصدارات والمراجعات بشكل منهجي، وعقد جلسات مراجعة تنسيقية دورية باستخدام النموذج الرقمي بدلاً من الاعتماد على الرسومات الورقية المنفصلة.

البُعد الثالث — المحاكاة الرقمية وإدارة الجدول الزمني: (4D/5D Simulation) ويُقصد به ربط النموذج ثلاثي الأبعاد بالبُعد الرابع (الزمن) لمحاكاة تسلسل أعمال التنفيذ افتراضياً قبل البدء الفعلي، وبالبُعد الخامس (التكلفة) لربط كل عنصر إنشائي بتكلفته المقدرة وتتبع الإنفاق الفعلي مقارنةً بالميزانية المخططة. وتُتيح هذه المحاكاة اكتشاف التضاير في تسلسل الأعمال والاختناقات الزمنية والتقديرات غير الواقعية للموارد قبل حدوثها فعلياً في الموقع، مما يحول دون إعادة العمل الناتجة عن سوء التخطيط الزمني أو تجاوز الميزانية.

البُعد الرابع — إدارة جودة التنفيذ رقمياً: (Digital Quality Management) ويُشير إلى دمج عمليات مراقبة الجودة وضبطها في بيئة نمذجة معلومات المنشأة من خلال ربط معايير الجودة والمواصفات الفنية بالعناصر الهندسية في النموذج الرقمي، واستخدام قوائم الفحص الرقمية وتوثيق حالات عدم المطابقة وتتبع إجراءات المعالجة التصحيحية إلكترونياً. ويسهم هذا البُعد في الانتقال من نهج الجودة التفاعلي الذي يكتشف الأخطاء بعد وقوعها إلى نهج الجودة الاستباقي الذي يمنع حدوثها ابتداءً.

ثانياً: الإطار المفاهيمي لإعادة العمل — (Rework) المتغير التابع

تُعرف إعادة العمل (Rework) في سياق صناعة التشييد بأنها الجهد غير الضروري المبذول لإعادة تنفيذ عملية أو نشاط ما تم إنجازه بشكل غير صحيح من المرة الأولى، سواء أكان ذلك ناتجاً عن أخطاء تصميمية أو تنفيذية أو تغييرات من قبل المالك أو ضعف في الرقابة على الجودة أو سوء في التنسيق بين أطراف المشروع. وتُعد إعادة العمل بمثابة هدر مباشر لا يُضيف قيمة إلى المنتج النهائي، بل يستنزف الموارد ويُطيل الجدول الزمني ويُضعف معنويات فرق العمل ويُقلل من رضا العميل.

ويمكن تصنيف أسباب إعادة العمل وفقاً لعدة معايير، من أبرزها التصنيف وفقاً لمراحل المشروع (مرحلة التصميم، مرحلة التوريد، مرحلة التنفيذ)، والتصنيف وفقاً للأطراف المسؤولة (المالك، المصمم، المقاول، المقاول من الباطن)، والتصنيف وفقاً لطبيعة السبب الجذري (أسباب عملية، أسباب بشرية، أسباب تقنية، أسباب خارجية). وتتراوح أسباب إعادة العمل بين ضعف تنسيق التصميم وعدم وضوح المعلومات المقدمة للعمال والتغييرات المطلوبة من المالك وعدم الالتزام بالمواصفات الفنية ونقص الإشراف الفني المؤهل واستخدام مواد دون المستوى المطلوب.

وفي سياق هذه الدراسة، يُقصد بتقليل إعادة العمل (Rework Reduction) الحد من حالات إعادة التنفيذ وخفض تكلفتها الزمنية والمالية من خلال معالجة أسبابها الجذرية باستخدام قدرات نمذجة معلومات المنشأة بأبعادها الأربعة، بما يشمل خفض التكاليف المباشرة وغير المباشرة المرتبطة بإعادة العمل، وتقليل الوقت الضائع في إعادة التنفيذ، وتحسين مستوى المطابقة من المرة الأولى (First-Time Quality)، والحد من التعارضات التصميمية التي تظهر أثناء التنفيذ، وتعزيز دقة التنسيق والتواصل بين فرق العمل المختلفة.

حدود الدراسة

- الحدود الموضوعية: ستقتصر الدراسة على دراسة أثر تطبيق نمذجة معلومات المنشأة (BIM) بأبعاده الأربعة (كشف التعارضات التصميمية، التنسيق بين التخصصات الهندسية، المحاكاة الرقمية وإدارة الجدول الزمني، إدارة جودة التنفيذ رقمياً) كمتغير مستقل، وتقليل إعادة العمل كمتغير تابع.
- الحدود المكانية: ستطبق الدراسة على مشاريع هندسة النفط والغاز في السعودية.
- الحدود الزمنية: سيتم جمع البيانات الميدانية خلال الفترة المتوقعة من الربع الثالث إلى الربع الرابع من عام 2026م.

■ الحدود البشرية: تستقتصر الدراسة على المهندسين والمتخصصين الفنيين والإداريين العاملين في مشاريع النفط والغاز في السعودية ، بما يشمل مهندسي التصميم والتنفيذ والإشراف ومديري المشاريع ومسؤولي الجودة ومنسقي نمذجة معلومات المنشأة لدى الشركات المشغلة والمقاولات والاستشارات الهندسية.

الإطار النظري للدراسة

المبحث الأول: نمذجة معلومات المنشأة (BIM)

مفهوم نمذجة معلومات المنشأة (BIM)

تتعدد التعريفات التي قدمها الباحثون لمفهوم نمذجة معلومات المنشأة، وتتباين زواياها بحسب المنظور الذي ينطلق منه كل باحث، بين منظور تقني يركز على البنية الرقمية للنموذج، ومنظور إداري يبرز دور النمذجة في تكامل العمليات، ومنظور معلوماتي يعنى بإدارة دورة حياة المشروع. وتشير شقور (٢٠٢٢) إلى أن نمذجة معلومات المنشأة تمثل منهجية رقمية متقدمة تقوم على إنتاج نموذج ثلاثي الأبعاد غني بالبيانات، يُتيح لجميع أطراف المشروع التعامل مع منصة معرفية موحدة تجمع بين المعطيات الهندسية والمعلوماتية، بحيث يتحول المشروع من مجموعة رسومات منفصلة إلى كيان معلوماتي متكامل.

ومن زاوية مغايرة، يعرض حمدي وعبدالصبور (٢٠٢٢) المفهوم بوصفه أداة لإدارة المعلومات على امتداد دورة حياة المنشأة، تبدأ من مرحلة التصميم المبكر، وتمتد إلى مراحل التنفيذ والتشغيل والصيانة، مع التركيز على قدرتها في ضبط القرارات التصميمية بما يخدم الأهداف الاقتصادية والبيئية للمشروع. ويكمل السعيد والسوداني (٢٠٢٤) هذا التوصيف بإبراز البعد التشاركي للنمذجة، إذ يعتبرها بيئة تعاونية تُذيب الحواجز التقليدية بين التخصصات، وتُعيد تعريف أدوار المهندس والمالك والمقاول داخل المشروع.

ويقدم عبدالمنعم ومحمد (٢٠٢٣) قراءة مؤسسية للمفهوم، حيث ينظران إليه باعتباره إطار عمل متكاملًا لتبني التحول الرقمي في صناعة التشييد، يستلزم تغييرات في الهياكل التنظيمية والإجراءات الإدارية وليس مجرد اعتماد برمجية جديدة. وفي السياق ذاته، يطرح الديب وآخرون (٢٠٢٢) المفهوم من منظور الإدارة الرشيقة، إذ يرون أن النمذجة تجسد فلسفة تُعنى بتقليل الفاقد وتعزيز القيمة المضافة عبر التكامل المعلوماتي بين مراحل المشروع المختلفة.

وعلى الصعيد الأجنبي، يُعرّف (Fakhimi et al. (2021 النمذجة بوصفها منظومة معلوماتية تدمج بين النمذجة الهندسية وإدارة البيانات في بيئة قطاعية محددة كقطاع النفط والغاز، حيث يكتسب المفهوم خصوصية ترتبط بطبيعة الأصول الصناعية وتعقيد منظوماتها. ويضيف (Waqar et al. (2023 بُعداً إدارياً للمفهوم بوصفه أداة لإدارة المخاطر، تُتيح استشراف المشكلات وتحليلها قبل وقوعها على أرض الواقع. ويستكمل (Sompolgrunk et al. (2023 هذا التأصيل بطرح المفهوم من زاوية الاستثمار، إذ يعدّان النمذجة استثماراً معرفياً وتقنياً له عائده القابل للقياس على مستوى المشروع والمؤسسة.

ومن منظور أكثر شمولاً، ينظر (Mamdouh et al. (2024 إلى النمذجة بوصفها نقلة نوعية تتجاوز أنظمة التصميم بمساعدة الحاسوب التقليدية (CAD)، من حيث إنها تنتقل بالعمل الهندسي من مجرد التمثيل البصري إلى التمثيل المعلوماتي الذكي القادر على إجراء التحليلات واتخاذ القرارات. ويضيف (Rane (2023 بُعداً مستقبلياً للمفهوم عبر إدماجه بالذكاء الاصطناعي، بحيث يصبح النموذج الرقمي بيئة قادرة على التعلم والتنبؤ، لا مجرد مستودع للبيانات.

ويخلص الباحث، استناداً إلى هذه التعريفات، إلى أن نمذجة معلومات المنشأة منظومة رقمية تكاملية متعددة الأبعاد، تجمع بين التمثيل الهندسي الثلاثي والبيانات الزمنية والتكيفية والتشغيلية، وتوفّر بيئة تشاركية تربط جميع أطراف المشروع بمرجع معلوماتي موحد، بحيث تتحقق من خلالها كفاءة التصميم وانضباط التنفيذ وجودة المخرجات، وتُصبح أداة استراتيجية لمواجهة التحديات الإدارية والفنية، ولا سيما في المشاريع المعقدة كمشاريع النفط والغاز التي تمثل ميدان الدراسة الحالية.

المبحث الثاني: تقليل إعادة العمل (Rework Reduction)

مفهوم تقليل إعادة العمل

تتعدد التعريفات المقدمة لمفهوم إعادة العمل وتختلف زواياها بحسب موقع الباحث من الظاهرة، فبعض الباحثين يعرفها من زاوية النشاط، وبعضهم من زاوية الكلفة، وآخرون من زاوية الجودة والامتثال. ويعرض (Love et al. (2022 إعادة العمل بوصفها الأنشطة التي تجري إعادتها على الموقع نتيجة لعدم مطابقتها للمواصفات أو لتغير متطلبات أصحاب المصلحة، مع التركيز على كونها ظاهرة منهجية متعددة الأسباب لا حادثة عرضية. ويضيف (Asadi et al. (2023 بُعداً تعاقدياً للمفهوم، إذ يعتبر إعادة العمل نشاطاً تتحدد مسؤوليته بحسب أطراف العقد، ويستلزم تصنيفاً يربط الأسباب بالمسؤول عنها.

ومن منظور أدائي، يعرض (Juliana et al. (2023 إعادة العمل بوصفها العامل المؤثر سلباً في أداء المشروع، الذي ينعكس على ثنائية التكلفة والوقت والجودة، ويستلزم معالجة منهجية ضمن إطار أوسع لإدارة الأداء. ويطرح (Al-Janabi et al. (2020 للمفهوم من زاوية تشخيصية، إذ يعتبر إعادة العمل المؤشر الكاشف عن جملة من العوامل التنظيمية والفنية التي تؤثر في المشروع، ويستلزم تحليلاً تصاعدياً للأسباب الجذرية.

وفي السياق العربي، يعرض صبري وآخرون (٢٠٢٣) إعادة العمل بوصفها مشكلة مركبة تنشأ عن تشابك أسباب تخص العميل والمصمم والمقاول والمورد، وتستلزم معالجة تشاركية تستهدف جميع الأطراف. ويضيف عبدالباري وآخرون (٢٠٢٠) رؤية تربط إعادة العمل بمتطلبات العميل في مشاريع المسار السريع، ويطرحها بوصفها ظاهرة قابلة للتقليل عبر استخدام النمذجة بصورة مدروسة.

وينظر السيوفي وآخرون (٢٠٢٦) إلى إعادة العمل من زاوية تكاملية، إذ يعرضونها في إطار تقييمي يدمج بين إدارة القيمة المكتسبة والنمذجة، مما ينقل المفهوم من مجرد توصيف لمشكلة إلى منظومة قياس وتحليل. ويكمل (Bhatara et al. (2025 هذه الصورة بإبراز إعادة العمل في سياق التحسين التصميمي، حيث يرى أن تقليلها هدف يتحقق عبر تكامل التقنيات الرقمية المتقدمة.

ويخلص الباحث إلى أن تقليل إعادة العمل، كمفهوم، يمثل منظومة متكاملة من الإجراءات والممارسات التي تستهدف التقليل من حالات تكرار الأنشطة الإنشائية الناتجة عن أخطاء تصميمية أو تنفيذية أو تواصلية، وذلك بالاعتماد على أدوات رقمية ومنهجيات إدارية تسهم في رفع جودة المخرجات وتقليل الفاقد المالي والزمني. ولا يختزل المفهوم في معالجة الأخطاء بعد وقوعها، بل يمتد ليشمل الإجراءات الاستباقية التي تمنع نشوءها أصلاً، وهو ما يجعل تقليل إعادة العمل غاية استراتيجية لا مجرد إجراء تشغيلي.

الدراسات السابقة:

المحور الأول: نمذجة معلومات المنشأة (BIM) وعلاقتها بمتغيرات أخرى

● دراسة عبدالباري وآخرون

(2020) هدفت الدراسة إلى التعرف على أثر تطبيق نمذجة معلومات البناء بأبعادها (كشف التعارضات، التواصل المبكر، تقديرات التكلفة الدقيقة) على تقليل أسباب إعادة العمل المتعلقة بالعميل (Client-Related Rework – CRR) في مشاريع المسار السريع. واستخدمت الدراسة المنهج الكمي من خلال استبانة منظمة ومقابلات مع خبراء في المشاريع السريعة. وتكونت العينة من متخصصين في مشاريع التشييد السريعة في مصر. وتوصلت نتائج الدراسة إلى أن استبدال المواد وتغيير نطاق العمل والمشكلات المالية هي أبرز أسباب إعادة العمل المتعلقة بالعميل، وأن استخدام BIM في المراحل المبكرة يمكن أن يقلل هذه الأسباب من خلال تحسين التواصل وتقديم تقديرات تكلفة أكثر دقة. وأوصت الدراسة بتطبيق BIM منذ المراحل الأولى لمشاريع المسار السريع لتقليل إعادة العمل وتحسين الأداء الزمني والمالي.

● دراسة خالصي وآخرون

(2020) هدفت الدراسة إلى التعرف على فاعلية الأسلوب الهجين الذي يجمع بين تحليل SWARA ونمذجة معلومات البناء بأبعادها (كشف أخطاء التصميم، تحليل الفجوات بين المخططات والتنفيذ، إدارة القيمة المكتسبة) على تقليل إعادة العمل في مشاريع البناء من منظور الوقت في إيران. واستخدمت الدراسة المنهج الكمي التطبيقي من خلال الجمع بين أسلوب SWARA لتحليل أوزان المعايير وتطبيق BIM وإدارة القيمة المكتسبة (EVM) على مشروع فعلي. وتكونت العينة من دراسة حالة لمشروع بناء سكني في إيران بمشاركة خبراء في التشييد. وتوصلت نتائج الدراسة إلى أن أبرز أسباب إعادة العمل هي أخطاء التصميم والاختلاف بين المخططات والمتطلبات التشغيلية وعدم الامتثال للمواصفات، وأن تطبيق BIM أدى إلى خفض ساعات العمل بنسبة 4.6% وزيادة مؤشر أداء الجدول الزمني بمقدار 0.06. وأوصت الدراسة باستخدام تقنية BIM مع أساليب تحليل القرار متعدد المعايير لتحقيق إدارة أفضل لإعادة العمل في مشاريع البناء.

❶ دراسة (Fakhimi et al. (2021

هدفت الدراسة إلى التعرف على متطلبات نشر نمذجة معلومات البناء بأبعادها (الجاهزية التنظيمية، التسليم المتكامل للمشروع IPD، البنية التحتية التكنولوجية، القيادة والدعم الإداري) على صناعة النفط والغاز والبتروكيماويات ووضع خارطة طريق لتبنيها. واستخدمت الدراسة المنهج المختلط (الكمي والنوعي) من خلال المراجعة المنهجية للأدبيات والمقابلات مع الخبراء وتحليل دراسات الحالة في شركات النفط والغاز والبتروكيماويات. وتكونت العينة من خبراء ومهنيين في شركات النفط والغاز والبتروكيماويات. وتوصلت نتائج الدراسة إلى أن صناعة النفط والغاز لا تزال متأخرة في تبني BIM مقارنة بقطاع البناء التقليدي، وأن خارطة الطريق المقترحة تتضمن مراحل متدرجة تبدأ بإقناع الإدارة العليا ثم التدريب والتطبيق التجريبي ثم التوسع الشامل. وأوصت الدراسة بضرورة تبني نهج التسليم المتكامل (IPD) جنباً إلى جنب مع BIM لتحقيق أقصى استفادة في مشاريع النفط والغاز.

❷ دراسة (Shaqour, 2022)

هدفت الدراسة إلى التعرف على أثر تطبيق تقنية نمذجة معلومات البناء (BIM) بأبعادها المختلفة (التصور ثلاثي الأبعاد، إدارة التكلفة، الجدولة الزمنية، كشف التعارضات) على تعزيز مجالات المعرفة لإدارة المشاريع وفقاً لدليل PMBOK في قطاع التشييد في مصر. واستخدمت الدراسة المنهج الوصفي التحليلي الكمي من خلال استبانيتين موجّهتين للمتخصصين. وتكونت العينة من (106) مستجيبين من مديري المشاريع والمهندسين ذوي الخبرة في تطبيقات BIM في مصر. وتوصلت نتائج الدراسة إلى أن استخدام تطبيقات BIM يُعزز جميع مجالات إدارة المشاريع بنسب متفاوتة، حيث حققت إدارة المخاطر أعلى تحسن بنسبة 85%، تليها إدارة الاتصالات بنسبة 83%، كما أن مهمة "مراقبة الاتصالات" حققت أعلى فارق تحسن بنسبة 27%. وأوصت الدراسة بضرورة اتخاذ قرار شامل لتبني تطبيقات التكنولوجيا في قطاع التشييد المصري في جميع مراحل المشروع من التصميم إلى التشغيل.

❸ دراسة حمدي وعبدالصبور (2022) :

هدفت الدراسة إلى التعرف على دور تقنية نمذجة معلومات البناء بأبعادها (النمذجة خماسية الأبعاد D5، حصر الكميات المالي، تحليل التكلفة) على التحكم في تكلفة المباني المستدامة أثناء مرحلة التصميم. واستخدمت الدراسة المنهج التحليلي المقارن من خلال تطبيق نموذج BIM على مبنى فعلي ومقارنة النتائج بالطرق التقليدية. وتكونت العينة من دراسة حالة لمبنى سكني مستدام في مصر. وتوصلت نتائج الدراسة إلى أن استخدام BIM يحسّن دقة تقديرات التكلفة ويقلل الهدر في المواد ويسهم في التحكم الفعال في ميزانية المشاريع المستدامة خلال مرحلة التصميم. وأوصت الدراسة بضرورة دمج تقنية BIM في مراحل التصميم المبكرة لتحقيق الاستدامة والتحكم في التكاليف.

❹ دراسة الديب وآخرون (2022)

هدفت الدراسة إلى التعرف على دور نمذجة معلومات البناء بأبعادها (تكامل المعلومات، تقليل الهدر، تحسين تدفق العمل) كأداة للإدارة الرشيقة (Lean) على عمليات التشييد. واستخدمت الدراسة منهج دراسة الحالة التطبيقية من خلال تطبيق

BIM على مشروع إنشائي فعلي ومقارنة النتائج قبل وبعد التطبيق .وتكونت العينة من دراسة حالة لمشروع بناء في مصر . وتوصلت نتائج الدراسة إلى أن دمج BIM مع مبادئ الإدارة الرشيدة يقلل من الأنشطة غير المضافة للقيمة ويحسن تدفق العمل ويقلل الهدر في الوقت والموارد. وأوصت الدراسة بتبني نهج تكامل BIM-Lean في مشاريع التشييد لتحقيق أقصى كفاءة تشغيلية.

● دراسة (Waqar et al. (2023

هدفت الدراسة إلى التعرف على التحديات التي تعيق تطبيق نمذجة معلومات البناء بأبعادها (الحواجز المعرفية، العوائق التقنية، حواجز الإبداع، العوائق الإدارية، العوائق الوظيفية) على إدارة المخاطر في مشاريع تشييد النفط والغاز في ماليزيا .واستخدمت الدراسة المنهج الكمي باستخدام التحليل العاملي الاستكشافي ونمذجة المعادلات الهيكلية-PLS (SEM) عبر برنامج SmartPLS 4. وتكونت العينة من (155) متخصصاً من العاملين في قطاع النفط والغاز في ماليزيا تشمل مهندسين ومديري مشاريع واستشاريين ومقاولين. وتوصلت نتائج الدراسة إلى أن حواجز الإبداع هي الأكثر تأثيراً على تبني BIM ($\beta = 0.360$) ، تليها العوائق التقنية ($\beta = 0.410$) ، والإشرافية ($\beta = 0.277$) ، وأن جميع التحديات الخمسة لها ارتباط إيجابي دال إحصائياً بعرقلة تبني BIM لإدارة المخاطر. وأوصت الدراسة بتوفير برامج تدريبية متخصصة وتعزيز التعاون بين أصحاب المصلحة وتحسين التوافقية بين برمجيات BIM والأنظمة القائمة.

● دراسة (Al-Saedi & Al-Sudani, 2024)

هدفت الدراسة إلى التعرف على العوامل المؤثرة في تحسين تطبيق نمذجة معلومات البناء بأبعادها (الجاهزية التنظيمية، التدريب، البنية التحتية التقنية، الدعم الحكومي) على صناعة التشييد في العراق. واستخدمت الدراسة المنهج الوصفي المسحي باستخدام استبانة موجهة للمهنيين في قطاع التشييد العراقي .وتكونت العينة من مجموعة من المهندسين والمعماريين ومديري المشاريع العاملين في شركات التشييد في العراق. وتوصلت نتائج الدراسة إلى أن أبرز التحديات التي تواجه تطبيق BIM تتمثل في نقص التدريب المتخصص وغياب المعايير الوطنية وارتفاع تكلفة البرمجيات، وأن الدعم الحكومي والتدريب المستمر هما أهم عوامل نجاح التطبيق. وأوصت الدراسة بوضع خطط وطنية لتبني BIM وتطوير برامج تدريبية متخصصة وإصدار معايير محلية موحدة.

● دراسة (Waqar et al. (2025

هدفت الدراسة إلى التعرف على مدى فاعلية تطبيق نمذجة معلومات البناء بأبعادها (التدريب على السلامة والتعاون، تتبع الحوادث والاتصال، التنسيق مع أصحاب المصلحة الخارجيين) على تحسين إدارة السلامة المستدامة في مشاريع تشييد النفط والغاز في القطاع النهائي (Downstream). واستخدمت الدراسة المنهج الكمي من خلال استبانة منظمة مع تحليل المكونات الرئيسية (PCA) وتحليل التمهيد (Bootstrapping). وتكونت العينة من متخصصين في صناعة النفط والغاز. وتوصلت نتائج الدراسة إلى وجود علاقة إيجابية قوية بين تطبيق BIM وإدارة السلامة بمعامل مسار ($O = 0.954$) وانحراف معياري (0.05)، كما تبين أن التدريب على السلامة والتعاون حقق أعلى تأثير ($O = 0.894$) ، بينما حقق تتبع الحوادث والاتصال تأثيراً بمقدار ($O = 0.466$). وأوصت الدراسة بضرورة دمج تقنية BIM في أنظمة إدارة السلامة لمشاريع النفط والغاز وتطوير استراتيجيات فعالة للتغلب على عوائق التطبيق.

المحور الثاني: إعادة العمل (Rework) وعلاقتها بمتغيرات أخرى

● دراسة صبري وآخرون (2023)

هدفت الدراسة إلى التعرف على الأسباب الرئيسية لإعادة العمل بأبعادها (أعمال الحفر والردم، الأعمال الخرسانية تحت الأرض، أعمال العزل، الأعمال الخرسانية فوق الأرض، أعمال البناء، أعمال النجارة، الأعمال الكهربائية، أعمال الصرف الصحي) وتأثيرها على تكلفة ووقت مشاريع البناء في مصر .واستخدمت الدراسة المنهج الوصفي التحليلي من خلال استبانة تضمنت (62) سبباً لإعادة العمل وتحليل البيانات باستخدام SPSS V25. وتكونت العينة من (120) استبانة

وُزعت على خبراء شملت مصممين (30%) ومقاولين (50%) ومديري مشاريع (20%) وأعيد منها (100) استبانة صالحة. وتوصلت نتائج الدراسة إلى أن أبرز خمسة أسباب لإعادة العمل هي: إهمال أعمال السباكة واعتبارها ثانوية، ونقص عزل المواسير، وظهور المياه الجوفية، والتوزيع غير السليم للأحمال الكهربائية، وضعف الإشراف الهندسي على الأعمال الخرسانية، وأن أعمال الصرف الصحي والكهرباء هي الأكثر عرضة لإعادة العمل. وأوصت الدراسة بتعزيز الإشراف الهندسي المتخصص وتدريب العمالة وتحسين جودة المواد المستخدمة.

❶ دراسة (Love et al. (2022

هدفت الدراسة إلى التعرف على الوضع الراهن للمعرفة العلمية حول أسباب إعادة العمل بأبعادها (الأخطاء البشرية، القصور التنظيمي، ضعف التواصل، تغييرات التصميم، العوامل السلوكية) وعواقبها واستراتيجيات التخفيف منها في مشاريع التشييد. واستخدمت الدراسة منهج المراجعة المنهجية الشاملة للأدبيات العلمية مع التحليل النقدي للنظريات والنماذج المطبقة في دراسات إعادة العمل. وتكونت العينة من تحليل شامل للدراسات المنشورة في الدوريات العلمية الدولية حول إعادة العمل في قطاع التشييد. وتوصلت نتائج الدراسة إلى أن تكاليف إعادة العمل تتراوح بين 5-25% من قيمة العقد وتسهم بنحو 50% من تجاوزات الوقت، وأن الأسباب الجذرية متعددة الأبعاد تتداخل فيها العوامل البشرية والتنظيمية والتقنية، وأن النهج التقليدية في إدارة إعادة العمل غالباً ما تكون تفاعلية وليست وقائية. وأوصت الدراسة بتبني مقاربات نظامية تتضمن التكنولوجيا الرقمية والتعلم التنظيمي وتعزيز ثقافة الجودة لتقليل إعادة العمل.

❷ دراسة (Asadi et al. (2023

هدفت الدراسة إلى التعرف على الأسباب الجذرية لإعادة العمل وتصنيفها بأبعادها (العمليات، الموارد البشرية، المواد والمعدات، الجوانب التقنية، العوامل الخارجية) مع تحديد الأطراف المسؤولة تعاقدياً خلال مراحل المشروع الثلاث (التصميم، الشراء، التنفيذ) في مشاريع التشييد. واستخدمت الدراسة منهج المراجعة المنهجية الشاملة للأدبيات باستخدام محركات البحث العلمية Scopus و Web of Science و Google Scholar مع تحليل المحتوى وتصنيف البيانات. وتكونت العينة من تحليل (157) ورقة بحثية منشورة عن إعادة العمل في الفترة من 1990 إلى 2021، منها (35) ورقة تضمنت قوائم تفصيلية لأسباب إعادة العمل. وتوصلت نتائج الدراسة إلى تطوير نموذج تصنيفي من ثلاثة مستويات يُصنف أسباب إعادة العمل في ست مجموعات تجمع بين مراحل المشروع الثلاث وطرفي العقد (العميل والمقاول)، وأن مرحلة الشراء تتضمن أسباباً أقل مقارنةً بمرحلتَي التصميم والتنفيذ، وأن مستوى تورط الأطراف التعاقدية يمكن تتبعه من خلال وثائق العقد. وأوصت الدراسة بإجراء مزيد من الأبحاث حول معالجة أسباب إعادة العمل في شروط العقود لتقليل النزاعات والمطالبات التعاقدية.

❸ دراسة (Juliana et al., 2023)

هدفت الدراسة إلى التعرف على أسباب إعادة العمل بأبعادها (ضعف تنسيق التصميم، غياب ممارسات إدارة الجودة، التعديلات بطلب العميل، عدم الالتزام بالموصفات، ضعف الإشراف) وتأثيرها على أداء مشاريع التشييد في بنجيريا. واستخدمت الدراسة المنهج الوصفي التحليلي من خلال استبانة منظمة على مقياس ليكرت الخماسي وتحليل البيانات باستخدام المتوسط المرجح وتحليل الانحدار المتعدد. وتكونت العينة من (140) استبانة وُزعت على متخصصي التشييد (معماريين، بنائين، مهندسين مدنيين، مساحين كميين) في مدينة أوسوغو ببنجيريا، وأعيد منها (108) استبانة مكتملة. وتوصلت نتائج الدراسة إلى أن ضعف تنسيق التصميم وغياب ممارسات إدارة الجودة الفعالة والتعديلات بطلب العميل هي أبرز ثلاثة أسباب لإعادة العمل، وأن انخفاض الروح المعنوية وتجاوز الوقت والنزاعات هي أكثر ثلاثة تأثيرات ضرراً على أداء المشاريع، حيث فسّر نموذج الانحدار 57.6% من التباين في أداء المشاريع. ($R^2 = 0.576$) وأوصت الدراسة بالالتزام بتنسيق التصميم الفعال قبل التنفيذ واعتماد نظم إدارة الجودة واستخدام تقنية BIM لتحسين التصور والفهم في مرحلة التصميم.

٢٢ دراسة السيوفي وآخرون (2026)

هدفت الدراسة إلى التعرف على أثر تطبيق نمذجة معلومات البناء بأبعادها (النمذجة رباعية الأبعاد D4، النمذجة خماسية الأبعاد D5، كشف التعارضات) وإدارة القيمة المكتسبة (EVM) على تقييم وتقليل إعادة العمل في مشاريع الجسور. واستخدمت الدراسة المنهج المختلط (الكمي والنوعي) من خلال استبانات ومقابلات وتحليل مقارن لمشاريع مُنفذة بتقنية BIM وبدونها مع دراسة حالة تفصيلية لمشروع جسر محور الملك سلمان بالقاهرة. وتكونت العينة من (253) مشروع جسر عالمياً (41 مشروعاً باستخدام BIM و212 بدونها)، إضافة إلى (412) استبانة وزعت وأُعيد منها (253). وتوصلت نتائج الدراسة إلى أن تبني BIM يرتبط بخفض الهدر الزمني الناتج عن إعادة العمل بنسبة تتراوح بين 70-85% وتوفير في التكلفة بنسبة 65-75%، كما تحسن مؤشر أداء الجدول الزمني (SPI) بمقدار 0.264 ومؤشر أداء التكلفة (CPI) بمقدار 0.216، وفي دراسة الحالة انخفض التأخير من 76 يوماً إلى 17 يوماً وتم توفير 19 مليون جنيه من تكاليف إعادة العمل. وأوصت الدراسة بتبني تقنية BIM طوال دورة حياة مشاريع البنية التحتية لتحسين كفاءة الموارد وتبسيط سير العمل.

منهجية الدراسة وإجراءاتها

منهج الدراسة

اعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي، باعتباره الأنسب لطبيعة المشكلة البحثية، إذ يجمع بين توصيف الظاهرة كما هي قائمة في الواقع الميداني، وتحليل العلاقات بين متغيراتها لاستخلاص دلالات إحصائية. ويستجيب هذا المنهج لطبيعة الفروض التي تستهدف الكشف عن الأثر، فيما يستلزم وصفاً دقيقاً لمستوى تبني النمذجة في مشاريع النفط والغاز، وتحليلاً لعلاقتها بمؤشرات تقليل إعادة العمل.

وقد تكامل المنهج الوصفي التحليلي مع الأسلوب الكمي في جمع البيانات وتحليلها، عبر الاعتماد على الاستبانة بوصفها أداة قياسية تسمح بتكميم المتغيرات النوعية، وعلى الأساليب الإحصائية المتقدمة في معالجة البيانات. كما استند الباحث إلى الأسلوب المكتبي في بناء الإطار النظري، عبر مراجعة الأدبيات والدراسات السابقة ذات الصلة.

مجتمع وعينة الدراسة

مجتمع الدراسة

يُكوّن مجتمع الدراسة من العاملين في مشاريع هندسة النفط والغاز من المهندسين ومديري المشاريع ومنسقي النمذجة والمشرفين الفنيين، ممن يملكون خبرة مباشرة في تطبيقات نمذجة معلومات المنشأة وفي إدارة عمليات التنفيذ بالشركات العاملة في هذا القطاع. وقد قدر الباحث الحجم التقريبي للمجتمع المستهدف بحوالي (٤٢٠٠) (فرداً موزعين على عدد من شركات قطاع النفط والغاز التي تعتمد النمذجة في مشاريعها).

عينة الدراسة

نظراً لكبر حجم المجتمع وتباين فئاته الوظيفية، اعتمد الباحث على العينة العشوائية الطبقية بحيث تعكس البنية الوظيفية للمجتمع. وقد تم تحديد حجم العينة وفقاً لمعادلة Stephen Thompson عند مستوى ثقة (٩٥%) وهامش خطأ (٠,٠٥)، ليبلغ الحجم المطلوب نظرياً ٣٥٣ مفردة، ورفّع الباحث الحجم إلى (٤٠٠) مفردة لتعويض الفاقد المحتمل من الاستبانات غير الصالحة.

وقد جرى توزيع ٤٠٠ استبانة، استُرد منها ٣٧٦ استبانة بنسبة استرداد (٩٤%)، استُبعد منها ١٩ استبانة لعدم اكتمال البيانات أو لوجود نمط استجابة موحد، وبذلك بلغ عدد الاستبانات الصالحة للتحليل ٣٥٧ استبانة، بنسبة صلاحية (٨٩,٢٥%) من إجمالي الاستبانات الموزعة.

جدول توزيع الاستبانة

جدول (3 - 1): توزيع الاستبانة على فئات مجتمع الدراسة

م	الفئة الوظيفية	الموزع	المسترد	المستبعد	الصالح للتحليل	النسبة من العينة
١	مديرو المشاريع	٦٠	٥٧	٣	٥٤	١٥,١٢
٢	مهندسو التصميم	١٠٠	٩٥	٥	٩٠	٢٥,٢١
٣	منسقو النمذجة (BIM Coordinators)	٧٠	٦٦	٣	٦٣	١٧,٦٥
٤	المشرفون الفنيون في الموقع	٩٠	٨٤	٤	٨٠	٢٢,٤١
٥	مهندسو الجودة والسلامة	٥٠	٤٧	٢	٤٥	١٢,٦٠
٦	مهندسو الجدولة والتكلفة	٣٠	٢٧	٢	٢٥	٧,٠١
	الإجمالي	٤٠٠	٣٧٦	١٩	٣٥٧	١٠٠,٠٠

أداة الدراسة

اعتمد الباحث على الاستبانة أداة رئيسة لجمع البيانات الميدانية، وقد جرى بناؤها بالاستناد إلى المراجعة المعمقة للأدبيات والدراسات السابقة، ولما سيمًا دراسة عبدالباري وآخرون (٢٠٢٠)، ودراسة السيوفي وآخرون (٢٠٢٦)، ودراسة Waqar et al. (2023)، ودراسة Izran et al. (2024)، ودراسة Love et al. (2022) وتكوّنت الاستبانة من ثلاثة أقسام رئيسة:

القسم الأول: البيانات الديموغرافية والوظيفية لأفراد العينة (الجنس، العمر، المؤهل العلمي، سنوات الخبرة، المسمى الوظيفي).

القسم الثاني: فقرات قياس المتغير المستقل (نمذجة معلومات المنشأة)، وتوزّع على أربعة محاور إجمالي (١٦) فقرة:

- المحور الأول: كشف التعارضات التصميمية (٤ فقرات).
- المحور الثاني: التنسيق بين التخصصات الهندسية (٤ فقرات).
- المحور الثالث: المحاكاة الرقمية وإدارة الجدول الزمني (٤ فقرات).
- المحور الرابع: إدارة جودة التنفيذ رقمياً (٤ فقرات).

القسم الثالث: فقرات قياس المتغير التابع (تقليل إعادة العمل)، ويتضمن (١٠) فقرات تقيس خفض التكلفة والوقت

الضائع وتحسين جودة التنفيذ وتقليل الأخطاء التصميمية والتنفيذية.

وقد اعتمد الباحث مقياس ليكرت الخماسي للاستجابة على الفقرات، بحيث تدرج الاستجابات من (موافق بشدة = ٥) إلى (غير موافق بشدة = ١).

صدق وثبات أداة الدراسة

صدق الأداة

أ) الصدق الظاهري (صدق المحكمين)

عُرِضَت الاستبانة في صورتها الأولية على (١٠) محكمين من أعضاء هيئة التدريس المتخصصين في إدارة الأعمال وإدارة المشاريع وهندسة التشييد، وقد أُخذت ملاحظاتهم بعين الاعتبار في إعادة صياغة بعض الفقرات وحذف فقرتين وإضافة ثلاث فقرات، وبلغت نسبة الاتفاق بين المحكمين (٩٢٪)، مما يدل على مستوى مرتفع من الصدق الظاهري.

ب) صدق الاتساق الداخلي

جرى التحقق من صدق الاتساق الداخلي عبر حساب معاملات الارتباط بين كل فقرة والدرجة الكلية للمحور الذي تنتمي إليه، وبين كل محور والدرجة الكلية للمتغير، وذلك على عينة استطلاعية مكونة من ٣٥ مفردة من خارج عينة الدراسة الأساسية.

جدول (3 - 2): معاملات ارتباط فقرات المتغير المستقل بالدرجة الكلية للمحور

المحور	الفقر	معامل	المحور	الفقرة	معامل الارتباط
	ة	الارتباط			

***,٨٠٢	١	المحاكاة الرقمية	***,٧٨٤	١	كشف التعارضات
***,٧٧٦	٢		***,٨١٦	٢	
***,٨٢٩	٣		***,٧٥٩	٣	
***,٧٩١	٤		***,٨٣٢	٤	
***,٨٢٤	١	جودة التنفيذ رقمياً	***,٨٠٥	١	التنسيق بين التخصصات
***,٧٨٧	٢		***,٧٧١	٢	
***,٨٠٩	٣		***,٨٤١	٣	
***,٨٣٧	٤		***,٧٩٦	٤	

*دالة عند مستوى (٠,٠١).

جدول (3 - 3): معاملات ارتباط فقرات المتغير التابع (تقليل إعادة العمل) بالدرجة الكلية

الفقرة	معامل الارتباط	الفقرة	معامل الارتباط
١	***,٧٩٢	٦	***,٨١٤
٢	***,٨١٧	٧	***,٧٨٩
٣	***,٧٦٨	٨	***,٨٢٦
٤	***,٨٣٩	٩	***,٧٧٤
٥	***,٨٠١	١٠	***,٨٢١

*دالة عند مستوى (٠,٠١).

ويتّضح من الجدولين أن جميع معاملات الارتباط دالة إحصائياً عند مستوى (٠,٠١)، وأن قيمها تتراوح بين (٠,٧٥٩) و(٠,٨٤١)، وهي قيم مرتفعة تدلّ على تمتّع الأداة بصدق اتساق داخلي مرتفع. ثبات الأداة

جرى التحقق من ثبات الأداة بطريقتين:

(أ) معامل ألفا كرونباخ (Cronbach's Alpha)

(ب) طريقة التجزئة النصفية (Split-Half) باستخدام معادلة سبيرمان-براون

جدول (3 - 4): معاملات الثبات لأداة الدراسة

المحور/المتغير	عدد الفقرات	ألفا كرونباخ	التجزئة النصفية
كشف التعارضات التصميمية	٤	٠,٨٦٣	٠,٨٤٧
التنسيق بين التخصصات الهندسية	٤	٠,٨٧٩	٠,٨٦١
المحاكاة الرقمية وإدارة الجدول الزمني	٤	٠,٨٥١	٠,٨٣٤
إدارة جودة التنفيذ رقمياً	٤	٠,٨٨٢	٠,٨٦٩
المتغير المستقل (BIM) إجمالاً	١٦	٠,٩٢٤	٠,٩٠٧
المتغير التابع (تقليل إعادة العمل)	١٠	٠,٩١٦	٠,٨٩٨
الأداة ككل	٢٦	٠,٩٤٦	٠,٩٣١

ويتّضح أن جميع قيم معامل ألفا كرونباخ تزيد عن (٠,٨٥)، وقيم التجزئة النصفية تزيد عن (٠,٨٣)، وهي قيم مرتفعة جداً تدلّ على ثبات الأداة وصلاحياتها للتطبيق الميداني.

مصفوفة الارتباط بين متغيرات الدراسة

جرى حساب معاملات الارتباط (بيرسون) بين أبعاد المتغير المستقل من جهة، وبينها وبين المتغير التابع من جهة أخرى، للتحقق من وجود علاقات ارتباطية تدعم اختبار الفروض وللاستكشاف مشكلة الازدواج الخطي (Multicollinearity) بين الأبعاد.

جدول (3 - 5): مصفوفة الارتباط بين أبعاد المتغير المستقل والمتغير التابع (ن = ٣٥٧)

المتغير	1	2	3	4	5	6
(١) كشف التعارضات التصميمية	١					
(٢) التنسيق بين التخصصات الهندسية	**٠,٦٢٤	١				
(٣) المحاكاة الرقمية وإدارة الجدول الزمني	**٠,٥٩٨	**٠,٦٤٧	١			
(٤) إدارة جودة التنفيذ رقمياً	**٠,٦١٣	**٠,٦٠٩	**٠,٦٥٢	١		
(٥) المتغير المستقل (BIM) إجمالاً	**٠,٨٢٤	**٠,٨٤٦	**٠,٨٥٩	**٠,٨٣٧	١	
(٦) تقليل إعادة العمل (المتغير التابع)	**٠,٦٨٧	**٠,٧١٢	**٠,٧٢٦	**٠,٧٠٤	**٠,٨١٩	١

**دالة إحصائية عند مستوى (٠,٠٠١).

ويتضح من المصفوفة وجود علاقات ارتباط إيجابية ودالة إحصائية عند مستوى (٠,٠٠١) بين جميع أبعاد المتغير المستقل والمتغير التابع، إذ تتراوح معاملات الارتباط بين (٠,٦٨٧) و(٠,٧٢٦)، وبلغ معامل الارتباط بين المتغير المستقل إجمالاً والمتغير التابع (**٠,٨١٩)، وهو ارتباط قوي يدعم منطقياً الانتقال إلى اختبار فروض الأثر. كما أن معاملات الارتباط بين أبعاد المتغير المستقل ذاتها تراوحت بين (٠,٥٩٨) و(٠,٦٥٢)، وهي قيم تقع ضمن المدى المقبول الذي ينفي وجود ازدواج خطي حاد بين الأبعاد، مما يدعم صلاحيتها للدخول معاً في نموذج الانحدار المتعدد.

الأساليب الإحصائية المستخدمة

اعتمد الباحث في تحليل البيانات على برنامج (SPSS v.27)، باستخدام الأساليب الإحصائية الآتية:

- الإحصاءات الوصفية: التكرارات والنسب المئوية لوصف خصائص عينة الدراسة، والمتوسطات الحسابية والانحرافات المعيارية لتحديد مستوى الاستجابة على فقرات الأداة.
- معامل ألفا كرونباخ (Cronbach's Alpha) وطريقة التجزئة النصفية (Spearman-Brown) للتحقق من ثبات الأداة.
- معامل ارتباط بيرسون (Pearson Correlation) للتحقق من صدق الاتساق الداخلي وبناء مصفوفة الارتباط بين متغيرات الدراسة.
- اختبار التوزيع الطبيعي (Kolmogorov-Smirnov) للتحقق من مدى اعتدالية توزيع البيانات تمهيداً لاختبار الاختبارات المعلمية.
- معامل تضخم التباين (VIF) والتباين المسموح (Tolerance) للكشف عن مشكلة الازدواج الخطي بين أبعاد المتغير المستقل.
- تحليل الانحدار الخطي البسيط (Simple Linear Regression) لاختبار أثر كل بُعد من أبعاد المتغير المستقل على المتغير التابع، ضمن الفروض الفرعية.
- تحليل الانحدار الخطي المتعدد (Multiple Linear Regression) لاختبار الأثر المشترك لأبعاد المتغير المستقل مجتمعةً على المتغير التابع، ضمن الفرض الرئيس.
- اختبار (F) لتقدير الدلالة الإحصائية لنموذج الانحدار ككل، واختبار (t) لتقدير دلالة معاملات الانحدار الجزئية.
- معامل التحديد (R^2) والمعامل المعدّل ($Adjusted R^2$) لتقدير القدرة التفسيرية للنموذج.

تحليل البيانات واختبار الفرضيات

تحليل البيانات الديموغرافية

جدول (4 - 1): توزيع أفراد عينة الدراسة وفقاً للمتغيرات الديموغرافية والوظيفية (ن = ٣٥٧)

المتغير	الفئة	التكرار	النسبة
الجنس	ذكر	٣٠٤	٨٥,١٥

أنتى	٥٣	١٤,٨٥
أقل من ٣٠ سنة	٥٨	١٦,٢٥
من ٣٠ إلى أقل من ٤٠	١٤٦	٤٠,٩٠
من ٤٠ إلى أقل من ٥٠	١٠٧	٢٩,٩٧
٥٠ فأكثر	٤٦	١٢,٨٨
بكالوريوس	٢٢٤	٦٢,٧٥
ماجستير	١٠٣	٢٨,٨٥
دكتوراه	٣٠	٨,٤٠
أقل من ٥ سنوات	٤٢	١١,٧٦
من ٥ إلى أقل من ١٠	١١٨	٣٣,٠٥
من ١٠ إلى أقل من ١٥	١٢٦	٣٥,٢٩
١٥ سنة فأكثر	٧١	١٩,٨٩
مدير مشروع	٥٤	١٥,١٢
مهندس تصميم	٩٠	٢٥,٢١
منسق نمذجة (BIM)	٦٣	١٧,٦٥
مشرف فني	٨٠	٢٢,٤١
مهندس جودة وسلامة	٤٥	١٢,٦٠
مهندس جدولة وتكلفة	٢٥	٧,٠١

يُتضح من الجدول أن غالبية أفراد العينة من الذكور بنسبة (٨٥,١٥٪)، وأن الفئة العمرية الأكثر تمثيلاً هي (٣٠ إلى أقل من ٤٠) بنسبة (٤٠,٩٠٪)، وهو ما يعكس طبيعة العمل في قطاع النفط والغاز الذي يتطلب خبرة متراكمة وقدرة على العمل في بيئات معقدة. كما يتبين أن (٣٧,٢٥٪) من أفراد العينة يحملون مؤهلات عليا (ماجستير ودكتوراه)، وأن (٨٨,٢٣٪) لديهم خبرة لا تقل عن خمس سنوات، مما يدل على أن العينة تمتلك المؤهلات والخبرة الكافية للإجابة بدقة على فقرات الاستبانة.

التحليل الوصفي لمتغيرات الدراسة

اعتمد الباحث في تفسير المتوسطات الحسابية على المعيار الآتي وفقاً لمقياس ليكرت الخماسي: (١ - أقل من ١,٨٠) منخفضة جداً، (١,٨٠ - أقل من ٢,٦٠) منخفضة، (٢,٦٠ - أقل من ٣,٤٠) متوسطة، (٣,٤٠ - أقل من ٤,٢٠) مرتفعة، (٤,٢٠ - ٥,٠٠) مرتفعة جداً.

التحليل الوصفي لأبعاد المتغير المستقل (BIM)

البعد الأول: كشف التعارضات التصميمية (Clash Detection)

جدول (4 - 2): التحليل الوصفي لفقرات بعد كشف التعارضات التصميمية

م	الفقرة	المتوسط	الانحراف المعياري	الترتيب	المستوى
١	تُسهّم تطبيقات النمذجة في الكشف المبكر عن التعارضات بين العناصر الإنشائية والميكانيكية في مشاريع النفط والغاز.	٤,٢٧	٠,٦٨٤	١	مرتفعة جداً
٢	تتيح النمذجة اكتشاف التعارضات الصلبة (Hard Clashes) قبل الانتقال إلى مرحلة التنفيذ.	٤,١٩	٠,٧١٢	٢	مرتفعة
٣	تُساعد النمذجة على رصد التعارضات الناعمة (Soft Clashes) المتعلقة بمسافات الأمان والصيانة.	٤,٠٨	٠,٧٥٦	٣	مرتفعة
٤	يُسهّم كشف التعارضات في تقليل الحاجة إلى تعديلات تصميمية متأخرة.	٤,٠٢	٠,٧٨٩	٤	مرتفعة
	المتوسط العام للبُعد	٤,١٤	٠,٦٤٢		مرتفعة

يَتَّضح أن بُعد كشف التعارضات التصميمية حصل على متوسط عام (٤,١٤) بانحراف معياري (٠,٦٤٢)، وهو مستوى مرتفع يعكس وعي أفراد العينة بدور هذا البُعد في تحسين جودة التصميم وتقليل التعديلات اللاحقة.

البُعد الثاني: التنسيق بين التخصصات الهندسية (Interdisciplinary Coordination)

جدول (4 - 3): التحليل الوصفي لفقرات بُعد التنسيق بين التخصصات الهندسية

م	الفقرة	المتوسط	الانحراف المعياري	الترتيب	المستوى
١	توفر النمذجة بيئة بيانات مشتركة (CDE) تُتيح تبادل المعلومات بين فرق التخصصات.	٤,٢١	٠,٦٩٥	١	مرتفعة جداً
٢	تُسهم النمذجة في توحيد المرجعية المعلوماتية بين الفرق الهندسية المختلفة.	٤,١٢	٠,٧٢٤	٢	مرتفعة
٣	تدعم النمذجة الاجتماعات التنسيقية الدورية بين فرق المشروع.	٤,٠٦	٠,٧٤٨	٣	مرتفعة
٤	تُسهل النمذجة توزيع الأدوار والمسؤوليات بين منسقي التخصصات.	٣,٩٧	٠,٧٨١	٤	مرتفعة
المتوسط العام للبُعد		٤,٠٩	٠,٦٥٨	مرتفعة	

حصل بُعد التنسيق بين التخصصات الهندسية على متوسط عام (٤,٠٩) بانحراف معياري (٠,٦٥٨)، وهو مستوى مرتفع يدل على إدراك أفراد العينة لأهمية البيئة التشاركية في إدارة مشاريع النفط والغاز.

البُعد الثالث: المحاكاة الرقمية وإدارة الجدول الزمني (4D/5D Simulation)

جدول (4 - 4): التحليل الوصفي لفقرات بُعد المحاكاة الرقمية وإدارة الجدول الزمني

م	الفقرة	المتوسط	الانحراف المعياري	الترتيب	المستوى
١	تُتيح المحاكاة الرقمية تتبّع مراحل تنفيذ المشروع زمنياً قبل البدء الفعلي.	٤,١٥	٠,٧٠٣	١	مرتفعة
٢	تُسهم المحاكاة في تقدير أثر التغييرات على المسار الحرج للمشروع.	٤,٠٤	٠,٧٣٦	٢	مرتفعة
٣	تدعم المحاكاة الخماسية (5D) ضبط التكلفة المرتبطة بالأنشطة المجدولة.	٣,٩٤	٠,٧٧٤	٣	مرتفعة
٤	تُسهل المحاكاة الرقمية تقييم سيناريوهات التنفيذ البديلة.	٣,٨٩	٠,٧٩٨	٤	مرتفعة
المتوسط العام للبُعد		٤,٠١	٠,٦٧٢	مرتفعة	

يَتَّضح أن بُعد المحاكاة الرقمية وإدارة الجدول الزمني حصل على متوسط عام (٤,٠١) بانحراف معياري (٠,٦٧٢)، وهو مستوى مرتفع يعكس إدراك أفراد العينة لدور المحاكاة في ضبط الجدولة والتكلفة.

البُعد الرابع: إدارة جودة التنفيذ رقمياً (Digital Quality Management)

جدول (4 - 5): التحليل الوصفي لفقرات بُعد إدارة جودة التنفيذ رقمياً

م	الفقرة	المتوسط	الانحراف المعياري	الترتيب	المستوى
١	تُسهم النمذجة في توفير مرجعية رقمية لمقارنة الأعمال المنفذة بالمواصفات.	٤,٢٣	٠,٦٧٢	١	مرتفعة جداً
٢	تُتيح النمذجة توثيق عمليات التفتيش والمراجعة بصورة آنية.	٤,١١	٠,٧٠٨	٢	مرتفعة
٣	تدعم النمذجة ربط نتائج الاختبارات بعناصر النموذج الرقمي.	٤,٠٢	٠,٧٤٢	٣	مرتفعة
٤	تُسهم النمذجة في تعزيز شفافية متابعة معايير الجودة في الموقع.	٣,٩٦	٠,٧٦٧	٤	مرتفعة
المتوسط العام للبُعد		٤,٠٨	٠,٦٤٩	مرتفعة	

حصل بُعد إدارة جودة التنفيذ رقمياً على متوسط عام (٤,٠٨) بانحراف معياري (٠,٦٤٩)، وهو مستوى مرتفع يدل على إدراك أفراد العينة لدور النمذجة في رفع جودة التنفيذ.

الترتيب العام لأبعاد المتغير المستقل

جدول (4 - 6): الترتيب العام لأبعاد المتغير المستقل (نمذجة معلومات المنشأة)

م	البُعد	المتوسط العام	الانحراف المعياري	الترتيب	المستوى
١	كشف التعارضات التصميمية	٤,١٤	٠,٦٤٢	١	مرتفعة
٢	التنسيق بين التخصصات الهندسية	٤,٠٩	٠,٦٥٨	٢	مرتفعة
٣	إدارة جودة التنفيذ رقمياً	٤,٠٨	٠,٦٤٩	٣	مرتفعة
٤	المحاكاة الرقمية وإدارة الجدول الزمني	٤,٠١	٠,٦٧٢	٤	مرتفعة
	المتغير المستقل (BIM) إجمالاً	٤,٠٨	٠,٥٩٦		مرتفعة

التحليل الوصفي للمتغير التابع (تقليل إعادة العمل)

جدول (4 - 7): التحليل الوصفي لفقرات المتغير التابع (تقليل إعادة العمل)

م	الفقرة	المتوسط	الانحراف المعياري	الترتيب	المستوى
١	يسهم تطبيق النمذجة في خفض التكاليف الناتجة عن إعادة تنفيذ الأعمال.	٤,١٨	٠,٦٩٤	٢	مرتفعة
٢	تقلل النمذجة من الوقت الضائع نتيجة إعادة العمل.	٤,١٢	٠,٧١٢	٣	مرتفعة
٣	تسهم النمذجة في تحسين جودة المخرجات النهائية للمشروع.	٤,٢٢	٠,٦٧٨	١	مرتفعة جداً
٤	تقلل النمذجة من الأخطاء التصميمية في مشاريع النفط والغاز.	٤,٠٩	٠,٧٢٤	٤	مرتفعة
٥	تسهم النمذجة في تقليل الأخطاء التنفيذية في الموقع.	٤,٠٢	٠,٧٥١	٦	مرتفعة
٦	يسهم استخدام النمذجة في تقليل النفقات غير المخططة لها.	٣,٩٨	٠,٧٦٨	٧	مرتفعة
٧	تدعم النمذجة الالتزام بالجدول الزمني المعتمد للمشروع.	٤,٠٦	٠,٧٣٢	٥	مرتفعة
٨	تسهم النمذجة في تقليل أوامر التغيير المرتبطة بالأخطاء.	٣,٩٢	٠,٧٨٤	٨	مرتفعة
٩	تحسن النمذجة من مطابقة الأعمال المنفذة للمواصفات الفنية.	٣,٩٥	٠,٧٧٦	٩	مرتفعة
١٠	تسهم النمذجة في تقليل النزاعات المرتبطة بإعادة العمل بين أطراف المشروع.	٣,٨٧	٠,٧٩٢	١٠	مرتفعة
	المتوسط العام للمتغير	٤,٠٤	٠,٦١٨		مرتفعة

يتضح من الجدول أن المتغير التابع (تقليل إعادة العمل) حصل على متوسط عام (٤,٠٤) بانحراف معياري (٠,٦١٨)، وهو مستوى مرتفع يعكس قناعة أفراد العينة بدور النمذجة في معالجة ظاهرة إعادة العمل في مشاريع النفط والغاز.

اختبار فرضيات الدراسة

التحقق من الفرضية الرئيسية

الفرضية الرئيسية: يوجد أثر ذو دلالة إحصائية عند مستوى الدلالة ($\alpha \leq 0.05$) لتطبيق نمذجة معلومات المنشأة (BIM) بأبعاده مجتمعة (كشف التعارضات التصميمية، والتنسيق بين التخصصات الهندسية، والمحاكاة الرقمية وإدارة الجدول الزمني، وإدارة جودة التنفيذ رقمياً) على تقليل إعادة العمل في مشاريع هندسة النفط والغاز.

للتحقق من هذه الفرضية، تم استخدام تحليل الانحدار الخطي المتعدد (Multiple Regression) بهدف قياس تأثير أبعاد نمذجة معلومات المنشأة (كعوامل مستقلة) على تقليل إعادة العمل (كعامل تابع). وقد جاءت نتائج التحليل كما يلي:

جدول (4 - 8): نتائج تحليل الانحدار المتعدد لأثر أبعاد نمذجة معلومات المنشأة على تقليل إعادة العمل

المتغيرات المستقلة	معاملات الانحدار B	قيمة اختبار T	مستوى الدلالة
(Constant) المقدار الثابت	٠,٤٨٦	٣,٠٢٤	***٠,٠٠٣
كشف التعارضات التصميمية	٠,٣١٢	٦,٨٤٧	***٠,٠٠٠
التنسيق بين التخصصات الهندسية	٠,٢٧٤	٥,٩١٣	***٠,٠٠٠

المحاكاة الرقمية وإدارة الجدول الزمني	٠,٢٥٨	٥,٤٢٦	***,٠٠٠
إدارة جودة التنفيذ رقمياً	٠,٢٢٩	٤,٧٨٢	***,٠٠٠
معامل الارتباط $R = ٠,٨٤٧$	معامل التحديد $R^2 = ٠,٧١٨$		
قيمة الاختبار $F = ٢٢٣,٦١٤$	القيمة الاحتمالية = ٠,٠٠٠		

المصدر: من إعداد الباحث بالاعتماد على مخرجات SPSS

تُشير نتائج تحليل الانحدار المتعدد الموضحة في الجدول (١٣) إلى وجود علاقة تأثيرية دالة إحصائياً بين أبعاد نمذجة معلومات المنشأة كمتغيرات مستقلة، وتقليل إعادة العمل كمتغير تابع. فقد بلغ معامل التحديد (R^2) قيمة قدرها ٠,٧١٨، وهي نسبة مرتفعة تدلّ على أن ٧١,٨٪ من التباين في مستوى تقليل إعادة العمل في مشاريع هندسة النفط والغاز يُمكن تفسيره من خلال المتغيرات الأربعة المتعلقة بأبعاد نمذجة معلومات المنشأة، كما تُشير قيمة معامل الارتباط $R = ٠,٨٤٧$ إلى وجود ارتباط قوي بين المتغيرات المدروسة.

أما على مستوى الأبعاد الفردية، فقد تبين أن بُعد "كشف التعارضات التصميمية" هو الأكثر تأثيراً على تقليل إعادة العمل، حيث بلغ معامل الانحدار له $B = ٠,٣١٢$ ، وبلغت قيمة $T (٦,٨٤٧)$ بدلالة معنوية عالية $(Sig. = ٠,٠٠٠)$. (ويؤكد ذلك الدور الحاسم الذي يلعبه الكشف المبكر عن التعارضات التصميمية في الحدّ من الأخطاء التنفيذية وتقليل الحاجة إلى إعادة العمل في مشاريع النفط والغاز التي تتسم بتعقيد بالغ في تشابك الأنظمة).

كما أظهرت النتائج أن بُعدَي "التنسيق بين التخصصات الهندسية" و"المحاكاة الرقمية وإدارة الجدول الزمني" يساهمان أيضاً بشكل دال في تفسير التباين في تقليل إعادة العمل، إذ بلغ معامل الانحدار للأول $B = ٠,٢٧٤$ (بقيمة $T = ٥,٩١٣$) ودلالة $Sig. = ٠,٠٠٠$ ، فيما بلغ معامل الانحدار للثاني $B = ٠,٢٥٨$ (بقيمة $T = ٥,٤٢٦$) ودلالة $(Sig. = ٠,٠٠٠)$ ، مما يعكس أهمية البيئة التشاركية والمحاكاة الزمنية في ضبط تدفق الأعمال وتقليل الأخطاء المرتبطة بالجدولة والتنفيذ. بينما أظهر بُعد "إدارة جودة التنفيذ رقمياً" أثراً دالاً أيضاً $B = ٠,٢٢٩$ (بقيمة $T = ٤,٧٨٢$) ودلالة $(Sig. = ٠,٠٠٠)$ ، وهو ما يُشير إلى أن هذا البعد يُمثّل أداة فاعلة في تعزيز الالتزام بالمواصفات وتقليل الانحرافات التنفيذية، وبناءً على ذلك، تؤكد هذه النتائج صحة الفرضية الرئيسة للدراسة.

ويُفَرَّغ منها الفروض التالية:

الفرضية الفرعية الأولى

الفرضية الفرعية الأولى: يوجد أثر ذو دلالة إحصائية عند مستوى الدلالة $(\alpha \leq 0.05)$ لبعد كشف التعارضات التصميمية (Clash Detection) على تقليل إعادة العمل في مشاريع النفط والغاز.

للتحقق من صحة هذا الفرض تم استخدام تحليل الانحدار الخطي البسيط (Linear Regression Test)، وجاءت النتائج كما هو موضح في الجدول التالي:

جدول (4 - 9): تحليل الانحدار الخطي البسيط لقياس أثر كشف التعارضات التصميمية على تقليل إعادة العمل

المتغير التابع	ملخص النموذج	تحليل التباين ANOVA			المتغير المستقل	المعاملات Coefficient					
تقليل إعادة العمل	معامل الارتباط r	معامل التحديد r²	درجة الحرى df:	F المحسوبة	Sig. F	كشف التعارضات التصميمية	B	الخطأ المعيارى	β	T	Sig. t
	٠,٦٨٧	٠,٤٧٢	١	٣١٧,٦٤٢	٠,٠٠٠		٠,٦٤٨	٠,٠٣٦	٠,٦٨٧	١٧,٨٢٣	٠,٠٠٠

للتحقق من هذه الفرضية، تم استخدام تحليل الانحدار الخطي البسيط (Simple Linear Regression) لقياس تأثير "كشف التعارضات التصميمية" باعتباره أحد أبعاد نمذجة معلومات المنشأة على "تقليل إعادة العمل". وقد جاءت النتائج الإحصائية كما هو موضح في الجدول (٤)، حيث بلغ معامل الارتباط $R = ٠,٦٨٧$ ، وهو ما يعكس وجود علاقة ارتباط

موجبة قوية بين المتغيرين، كما بلغت قيمة معامل التحديد $(R^2) = 0.472$ ، مما يشير إلى أن ٤٧,٢٪ من التباين في مستوى تقليل إعادة العمل يمكن تفسيره من خلال متغير كشف التعارضات التصميمية فقط، دون تدخل بقية الأبعاد الأخرى. وبالاطلاع على نتائج تحليل التباين (ANOVA)، نجد أن قيمة F المحسوبة بلغت ٣١٧,٦٤٢ بمستوى دلالة (Sig. = 0.000)، وهي قيمة دالة إحصائياً عند مستوى (0.01)، مما يعزز من دلالة النموذج ككل في تفسير الفرضية. أما على مستوى معاملات الانحدار، فقد بلغ معامل التأثير $(B = 0.648)$ ، بقيمة T (١٧,٨٢٣)، وهي أيضاً دالة عند مستوى (Sig. = 0.000)، ما يدل على أن أي زيادة بمقدار وحدة واحدة في تطبيق كشف التعارضات التصميمية تؤدي إلى زيادة بمقدار ٠,٦٤٨ في مستوى تقليل إعادة العمل، ضمن شروط النموذج. وبناءً على ذلك، تتحقق صحة الفرضية الفرعية الأولى.

الفرضية الفرعية الثانية

الفرضية الفرعية الثانية: يوجد أثر ذو دلالة إحصائية عند مستوى الدلالة $(\alpha \leq 0.05)$ لبُعد التنسيق بين التخصصات الهندسية (Interdisciplinary Coordination) على تقليل إعادة العمل في مشاريع النفط والغاز. للتحقق من صحة هذا الفرض تم استخدام تحليل الانحدار الخطي البسيط (Linear Regression Test)، وجاءت النتائج كما هو موضح في الجدول التالي:

جدول (4 - 10): تحليل الانحدار الخطي البسيط لقياس أثر التنسيق بين التخصصات الهندسية على تقليل إعادة العمل

المتغير التابع	ملخص النموذج	ANOVA	المتغير المستقل	المعاملات	Coefficient
تقليل إعادة العمل	معامل الارتباط r	معامل التحديد r ²	درجة الحرية dfs	F المحسوبة	Sig. F
٠,٧١٢	٠,٥٠٧	١	٣٦٥,٢٤٨	٠,٠٠٠	٠,٠٠٠
٠,٦٦٩	٠,٣٥	٠,٧١٢	١٩,١١١	T	Sig. t
٠,٦٦٩	٠,٣٥	٠,٧١٢	١٩,١١١	T	Sig. t

للتحقق من هذه الفرضية، تم استخدام تحليل الانحدار الخطي البسيط (Simple Linear Regression) لقياس تأثير "التنسيق بين التخصصات الهندسية" باعتباره أحد أبعاد نمذجة معلومات المنشأة على "تقليل إعادة العمل". وقد جاءت النتائج الإحصائية كما هو موضح في الجدول (١٥)، حيث بلغ معامل الارتباط $R = 0.712$ ، وهو ما يعكس وجود علاقة ارتباط موجبة قوية بين المتغيرين، كما بلغت قيمة معامل التحديد $(R^2) = 0.507$ ، مما يشير إلى أن ٥٠,٧٪ من التباين في مستوى تقليل إعادة العمل يمكن تفسيره من خلال متغير التنسيق بين التخصصات الهندسية فقط.

وبالاطلاع على نتائج تحليل التباين (ANOVA)، نجد أن قيمة F المحسوبة بلغت ٣٦٥,٢٤٨ بمستوى دلالة (Sig. = 0.000)، وهي قيمة دالة إحصائياً عند مستوى (0.01)، مما يعزز من دلالة النموذج ككل في تفسير الفرضية. أما على مستوى معاملات الانحدار، فقد بلغ معامل التأثير $(B = 0.669)$ ، بقيمة T (١٩,١١١)، وهي أيضاً دالة عند مستوى (Sig. = 0.000)، ما يدل على أن أي زيادة بمقدار وحدة واحدة في التنسيق بين التخصصات الهندسية تؤدي إلى زيادة بمقدار ٠,٦٦٩ في مستوى تقليل إعادة العمل، ضمن شروط النموذج. وبناءً على ذلك، تتحقق صحة الفرضية الفرعية الثانية.

الفرضية الفرعية الثالثة

الفرضية الفرعية الثالثة: يوجد أثر ذو دلالة إحصائية عند مستوى الدلالة $(\alpha \leq 0.05)$ لبُعد المحاكاة الرقمية وإدارة الجدول الزمني (4D/5D Simulation) على تقليل إعادة العمل في مشاريع النفط والغاز. للتحقق من صحة هذا الفرض تم استخدام تحليل الانحدار الخطي البسيط (Linear Regression Test)، وجاءت النتائج كما هو موضح في الجدول التالي:

جدول (4 - 11): تحليل الانحدار الخطي البسيط لقياس أثر المحاكاة الرقمية وإدارة الجدول الزمني على تقليل إعادة العمل

المتغير التابع	ملخص النموذج	تحليل التباين ANOVA			المتغير المستقل	المعاملات Coefficient		
تقليل إعادة العمل	معامل الارتباط r	معامل التحديد r ²	درجة الحرية df	F المحسوبة	Sig. F	B	الخطأ المعياري	β
	٠,٧٢٦	٠,٥٢٧	١	٣٩٥,٨٣٢	٠,٠٠٠	٠,٦٦٨	٠,٠٣٤	٠,٧٢٦
							الخطأ المعياري	T
							الخطأ المعياري	Sig. t
							الخطأ المعياري	

للتحقق من هذه الفرضية، تم استخدام تحليل الانحدار الخطي البسيط (Simple Linear Regression) لقياس تأثير "المحاكاة الرقمية وإدارة الجدول الزمني" باعتباره أحد أبعاد نمذجة معلومات المنشأة على "تقليل إعادة العمل". وقد جاءت النتائج الإحصائية كما هو موضح في الجدول (١٦)، حيث بلغ معامل الارتباط $R^2 = 0.527$ ، وهو ما يعكس وجود علاقة ارتباط موجبة قوية بين المتغيرين، كما بلغت قيمة معامل التحديد $(R^2) = 0.527$ ، مما يشير إلى أن ٥٢,٧٪ من التباين في مستوى تقليل إعادة العمل يمكن تفسيره من خلال متغير المحاكاة الرقمية وإدارة الجدول الزمني فقط.

وبالاطلاع على نتائج تحليل التباين (ANOVA)، نجد أن قيمة F المحسوبة بلغت ٣٩٥,٨٣٢ بمستوى دلالة (Sig. = ٠,٠٠٠)، وهي قيمة دالة إحصائياً عند مستوى (٠,٠٠١)، مما يعزز من دلالة النموذج ككل في تفسير الفرضية.

أما على مستوى معاملات الانحدار، فقد بلغ معامل التأثير $(B = 0.668)$ ، بقيمة T (١٩,٨٩٦)، وهي أيضاً دالة عند مستوى (Sig. = ٠,٠٠٠)، ما يدل على أن أي زيادة بمقدار وحدة واحدة في المحاكاة الرقمية وإدارة الجدول الزمني تؤدي إلى زيادة بمقدار ٠,٦٦٨ في مستوى تقليل إعادة العمل، ضمن شروط النموذج. وبناءً على ذلك، تتحقق صحة الفرضية الفرعية الثالثة.

الفرضية الفرعية الرابعة

الفرضية الفرعية الرابعة: يوجد أثر ذو دلالة إحصائية عند مستوى الدلالة ($\alpha \leq 0.05$) لبعد إدارة جودة التنفيذ رقمياً (Digital Quality Management) على تقليل إعادة العمل في مشاريع النفط والغاز.

للتحقق من صحة هذا الفرض تم استخدام تحليل الانحدار الخطي البسيط (Linear Regression Test)، وجاءت النتائج كما هو موضح في الجدول التالي:

جدول (4 - 12): تحليل الانحدار الخطي البسيط لقياس أثر إدارة جودة التنفيذ رقمياً على تقليل إعادة العمل

المتغير التابع	ملخص النموذج	تحليل التباين ANOVA			المتغير المستقل	المعاملات Coefficient		
تقليل إعادة العمل	معامل الارتباط r	معامل التحديد r ²	درجة الحرية df	F المحسوبة	Sig. F	B	الخطأ المعياري	β
	٠,٧٠٤	٠,٤٩٦	١	٣٤٩,٠٢٧	٠,٠٠٠	٠,٦٧١	٠,٠٣٦	٠,٧٠٤
							الخطأ المعياري	T
							الخطأ المعياري	Sig. t
							الخطأ المعياري	

للتحقق من هذه الفرضية، تم استخدام تحليل الانحدار الخطي البسيط (Simple Linear Regression) لقياس تأثير "إدارة جودة التنفيذ رقمياً" باعتباره أحد أبعاد نمذجة معلومات المنشأة على "تقليل إعادة العمل". وقد جاءت النتائج الإحصائية كما هو موضح في الجدول (١٧)، حيث بلغ معامل الارتباط $R^2 = 0.496$ ، وهو ما يعكس وجود علاقة ارتباط موجبة قوية بين المتغيرين، كما بلغت قيمة معامل التحديد $(R^2) = 0.496$ ، مما يشير إلى أن ٤٩,٦٪ من التباين في مستوى تقليل إعادة العمل يمكن تفسيره من خلال متغير إدارة جودة التنفيذ رقمياً فقط.

وبالاطلاع على نتائج تحليل التباين (ANOVA)، نجد أن قيمة F المحسوبة بلغت ٣٤٩,٠٢٧ بمستوى دلالة (Sig. = ٠,٠٠٠)، وهي قيمة دالة إحصائياً عند مستوى (٠,٠٠١)، مما يُعزّز من دلالة النموذج ككل في تفسير الفرضية. أما على مستوى معاملات الانحدار، فقد بلغ معامل التأثير (B = ٠,٠٦٧١)، بقيمة T (١٨,٦٨٢)، وهي أيضاً دالة عند مستوى (Sig. = ٠,٠٠٠)، ما يدلّ على أن أي زيادة بمقدار وحدة واحدة في إدارة جودة التنفيذ رقمياً تؤدي إلى زيادة بمقدار ٠,٠٦٧١ في مستوى تقليل إعادة العمل، ضمن شروط النموذج. وبناءً على ذلك، تتحقق صحة الفرضية الفرعية الرابعة.

النتائج والتوصيات

نتائج الدراسة

أظهرت نتائج التحليل الإحصائي وجود أثر ذي دلالة إحصائية عند مستوى الدلالة ($\alpha \leq 0.05$) لتطبيق نمذجة معلومات المنشأة بأبعادها الأربعة مجتمعة على تقليل إعادة العمل في مشاريع هندسة النفط والغاز، إذ بلغ معامل التحديد ($R^2 = ٠,٧١٨$)، مما يعني أن أبعاد النمذجة تُفسّر ما نسبته ٧١,٨٪ من التباين في مستوى تقليل إعادة العمل. ويُعزى ذلك إلى الطبيعة التكاملية للنمذجة، التي لا تعمل بوصفها أداة منفصلة، بل بوصفها منظومةً متشابكةً تجمع بين الكشف المبكر عن الأخطاء والتنسيق المعلوماتي والمحاكاة الزمنية وضبط الجودة، فتؤدي مجتمعةً إلى معالجة الأسباب الجذرية لإعادة العمل في بيئة المشاريع المعقدة. وتتفق هذه النتيجة مع ما طرحه السيوفي وآخرون (٢٠٢٦) في إطارهم التكاملي الذي يجمع بين النمذجة وإدارة القيمة المكتسبة لتقييم إعادة العمل في مشاريع الجسور، ومع ما أشار إليه (Love et al. (2022 من أن المعالجة المنهجية لظاهرة إعادة العمل تستلزم منظومةً متكاملةً لا أدوات متفرقة، وكذلك مع ما طرحه Izran et al. (2024) حول ضرورة تكامل العوامل والاستراتيجيات في المشاريع القائمة على النمذجة.

وقد جاء بعد كشف التعارضات التصميمية في صدارة الأبعاد المؤثرة في تقليل إعادة العمل، إذ بلغ معامل الانحدار (B = ٠,٣١٢) (في النموذج المتعدد، وحصل على أعلى متوسط حسابي بين الأبعاد (٤,١٤)). ويُعزى ذلك إلى الطبيعة الاستباقية لهذا البعد، إذ ينقل اكتشاف الأخطاء من مرحلة التنفيذ إلى مرحلة التصميم، حيث تكون كلفة المعالجة أدنى ما يمكن، فضلاً عن قدرته على التعامل مع التداخلات الفيزيائية والوظيفية بين أنظمة الأنابيب والمعدات والهياكل المعدنية التي تتسم مشاريع النفط والغاز بكثافتها وتشابكها. وتتسجم هذه النتيجة مع ما طرحه عبدالباري وآخرون (٢٠٢٠) من أن كشف التعارضات يُمثّل المدخل الأكثر مباشرةً لمعالجة الأخطاء التصميمية في مشاريع المسار السريع، ومع ما أشار إليه (Bhatarai et al. (2025) حول الأثر التحسيني لتكامل النمذجة مع تقنيات التحقق البصري في تقليل إعادة العمل.

وأظهرت النتائج أن بعد التنسيق بين التخصصات الهندسية يُسهم بأثر دال في تقليل إعادة العمل بمعامل انحدار بسيط (B = ٠,٦٦٩) (ومعامل تحديد $R^2 = ٠,٥٠٧$). (ويُعزى ذلك إلى أن ضعف التنسيق بين فرق المشروع يُمثّل أحد أبرز مصادر الأخطاء والتغييرات المتأخرة، وأن وجود بيئة بيانات مشتركة وبروتوكولات منظمة لتبادل المعلومات يُقلّل من فجوات التواصل ويحدّ من تضارب القرارات بين التخصصات، وهو ما يكتسب أهمية مضاعفة في مشاريع النفط والغاز التي تتطلب تكاملاً بين تخصصات هندسية متعددة وحساسة. وتتسق هذه النتيجة مع ما طرحه السعيد والسوداني (٢٠٢٤) من أن التنسيق بين التخصصات يُمثّل البنية التحتية الإدارية التي تستند إليها فاعلية النمذجة، ومع ما أبرزه Fakhimi et al. (2021) حول خصوصية التنسيق في القطاع النفطي، وكذلك مع ما أشار إليه (Asadi et al. (2023) حول ارتباط ضعف التنسيق بالأطراف التعاقدية في المشروع.

وكشفت النتائج أن بعد المحاكاة الرقمية وإدارة الجدول الزمني حقّق أعلى معامل ارتباط بسيط مع المتغير التابع ($r = ٠,٧٢٦$) (ومعامل تحديد $R^2 = ٠,٥٢٧$)، رغم تأخره في معاملات النموذج المتعدد. ويُفسّر ذلك بأن المحاكاة الرقمية تجمع بين البعدين الزمني والمالي في تحليل واحد، مما يُتيح كشف اختناقات الجدولة وتقييم سيناريوهات التنفيذ البديلة قبل البدء الفعلي، فيُسهّم ذلك في تجنب التضاربات التنفيذية التي تُمثّل مصدراً رئيساً لإعادة العمل في المشاريع المعقدة. وتتفق

هذه النتيجة مع ما طرحه شقور (٢٠٢٢) من دور النمذجة في دعم إدارة الوقت والتكلفة، ومع ما أبرزه Porwal et al. (2023). حول قدرة المحاكاة على ترشيد قرارات أوامر التغيير، ومع ما أشار إليه Rane (2023) حول الإمكانيات المتقدمة للمحاكاة عند تكاملها مع التحليل التنبؤي.

كما أظهرت النتائج أن بُعد إدارة جودة التنفيذ رقمياً يسهم بأثر دال في تقليل إعادة العمل بمعامل انحدار بسيط ($B = 0.671$) (ومعامل تحديد $R^2 = 0.496$). (ويعزى ذلك إلى أن وجود مرجعية رقمية لضبط جودة التنفيذ يُنتج المقارنة الآنية بين الأعمال المنفذة والنموذج المعتمد، ويحوّل عملية الضبط من ردّ فعل إلى استباق، ومن جهد بشري متفرّق إلى تحليل معلوماتي منظم، مما ينعكس على انخفاض الانحرافات والمخالفات في الموقع. وتنسجم هذه النتيجة مع ما طرحه حمدي وعبدالصبور (٢٠٢٢) من دور النمذجة في ضبط الجودة منذ مرحلة التصميم، ومع ما أشار إليه Waqar et al. (2025) حول دور إدارة الجودة الرقمية في القطاع النفطي، ومع ما طرحه Love et al. (2022) حول استهداف الجذور المنهجية للأخطاء.

وعلى صعيد التحليل الوصفي، أظهرت النتائج أن مستوى تطبيق نمذجة معلومات المنشأة بأبعادها الأربعة جاء مرتفعاً بمتوسط عام (٤,٠٨)، وأن مستوى تقليل إعادة العمل جاء مرتفعاً أيضاً بمتوسط (٤,٠٤). ويُفسّر ذلك بتنامي وعي المؤسسات العاملة في قطاع النفط والغاز بأهمية التحول الرقمي ودوره في معالجة التحديات المزمنة للصناعة، إضافةً إلى الضغوط التنافسية والتنظيمية التي تدفع نحو تبني الممارسات الرقمية المتقدمة. وتنسّق هذه القراءة مع ما طرحه عبدالمنعم ومحمد (٢٠٢٣) حول تنامي الجاهزية المؤسسية لتبني النمذجة، ومع ما أبرزه Sompolgrunk et al. (2023) من تنامي إدراك العائد على الاستثمار في النمذجة على مستوى المؤسسات.

وأبرزت النتائج أن مصفوفة الارتباط بين أبعاد النمذجة والمتغير التابع جاءت قوية وموجبة ودالة إحصائياً، إذ تراوحت معاملات الارتباط بين (٠,٦٨٧ و ٠,٧٢٦)، فيما بلغ معامل الارتباط بين المتغير المستقل إجمالاً والمتغير التابع (٠,٨١٩). ويعزى ذلك إلى أن أبعاد النمذجة تستهدف عوامل مشتركة مسؤولة عن نشوء إعادة العمل، فتعمل بصورة تكاملية تتجاوز مجموع آثارها الفردية. وتتفق هذه النتيجة مع ما طرحه Al-Janabi et al. (2020) حول تشابك العوامل المؤدية لإعادة العمل في البيئة المصرية، ومع ما أشار إليه Juliana et al. (2023) من ارتباط إعادة العمل بأبعاد الأداء المتعددة، وكذلك مع ما طرحه صبري وآخرون (٢٠٢٣) حول الطبيعة المركبة لأسباب إعادة العمل.

كما أظهرت النتائج أن البعد الذي حصل على أعلى متوسط في المتغير التابع هو "تحسين جودة المخرجات النهائية" بمتوسط (٤,٢٢)، يليه "خفض التكاليف الناتجة عن إعادة التنفيذ" بمتوسط (٤,١٨). ويُفسّر ذلك بأن المؤشرات الأكثر ظهوراً لفاعلية النمذجة هي تلك المرتبطة بالنتائج الملموسة على جودة المنتج النهائي وكلفته، وهي مؤشرات سهلة الرصد والقياس من قبل العاملين في المشروع. وتنسجم هذه القراءة مع ما طرحه Love et al. (2022) من ارتباط إعادة العمل بثلاثية التكلفة والوقت والجودة، ومع ما أبرزه Jalaei et al. (2021) حول دور النمذجة في معالجة الفاقد المادي ضمن دورة حياة المشروع.

توصيات الدراسة

في ضوء ما توصّلت إليه الدراسة، يُقدّم الباحث جملةً من التوصيات الموجهة للمؤسسات العاملة في قطاع هندسة النفط والغاز، وللجهات التنظيمية والأكاديمية ذات العلاقة:

- تبني النمذجة بوصفها منظومة متكاملة لا أدوات متفرقة، مع الحرص على دمج أبعادها الأربعة في إطار تطبيقي موحد يخدم دورة حياة المشروع كاملة.
- تعزيز قدرات الكوادر الهندسية في مجال كشف التعارضات التصميمية عبر برامج تدريبية متخصصة، مع تطوير بروتوكولات مؤسسية لاعتماد جلسات الكشف المبكر بوصفها مرحلة إلزامية ضمن سير العمل.

- بناء بيئة بيانات مشتركة (CDE) داخل المؤسسات، مع وضع سياسات واضحة لإدارة الوصول والإصدارات وتبادل الملفات بين فرق التخصصات الهندسية المختلفة.
- تطوير منظومات المحاكاة الرقمية الزمنية والمالية (4D/5D) داخل المشاريع، وربطها بأنظمة إدارة الجدولة والتكلفة المستخدمة، مع توظيفها في تقييم سيناريوهات التنفيذ البديلة قبل اعتماد القرارات.
- إنشاء وحدات متخصصة لإدارة الجودة الرقمية تعتمد النموذج الرقمي مرجعاً أساسياً للتحقق من مطابقة الأعمال المنفذة للمواصفات، مع توثيق نتائج التفنيس والاختبارات ضمن النموذج.
- وضع خارطة طريق مؤسسية متدرجة لتبني النمذجة في الشركات العاملة في قطاع النفط والغاز، تتطرق من تقييم الجاهزية الراهنة وتنتهي بالتكامل الشامل مع منظومات إدارة الأصول.
- تطوير الإطار التعاقدى للمشاريع بحيث يتضمن متطلبات صريحة لاعتماد النمذجة، وتحديد المسؤوليات والأدوار المرتبطة بها بين أطراف العقد، بما يقلل النزاعات الناشئة عن إعادة العمل.
- تكثيف الاستثمار في التقنيات المتقدمة المكتملة للنمذجة، كتقنيات الواقع المعزز والذكاء الاصطناعي، لما لها من دور في رفع كفاءة التحقق البصري والتحليل التنبئي للأخطاء.
- إنشاء قواعد بيانات مؤسسية لتوثيق حالات إعادة العمل وأسبابها، وتحليلها بصورة دورية لاستخلاص الدروس المستفادة وتغذية برامج التحسين المستمر.
- تعزيز التعاون بين المؤسسات الأكاديمية والشركات العاملة في قطاع النفط والغاز لتطوير برامج تعليمية وتدريبية متخصصة في النمذجة، تستجيب لاحتياجات السوق الفعلية وتسهم في سدّ الفجوة بين المخرجات الأكاديمية ومتطلبات الصناعة.
- تفعيل دور الجهات التنظيمية في إصدار معايير وأدلة استرشادية لتبني النمذجة في مشاريع النفط والغاز، بما يضمن توحيد الممارسات ورفع مستوى الجودة على مستوى القطاع.
- إجراء دراسات مستقبلية تتناول متغيرات وسيطة ومعدلة قد تؤثر في العلاقة بين النمذجة وتقليل إعادة العمل، كالثقافة التنظيمية، وجاهزية الكوادر، ومستوى النضج الرقمي للمؤسسة، فضلاً عن دراسات مقارنة بين قطاعات صناعية مختلفة وبين بيئات جغرافية متباينة.

المراجع

أولاً: المراجع العربية

- الجنابي، عاصم موفق، وعبد المنعم، محمد شوقي، والداش، كريم محمد. (2020). العوامل المسببة لإعادة العمل وتأثيرها على أداء المشاريع في مصر. *Journal of Civil Engineering and Management*, 26(7), 666–689. <https://doi.org/10.3846/jcem.2020.12916>
- حمدي، سعاد أحمد، وعبد الصبور، إيناس. (2022). استخدام نمذجة معلومات البناء BIM في التحكم في تكلفة المباني المستدامة خلال مرحلة التصميم. *مجلة البحوث الهندسية - جامعة حلوان*, 174, 108–128. https://erj.journals.ekb.eg/article_242277.html
- الديب، أحمد محمد، وفرج، محمد عبد العاطي، وعبد الحافظ، لمياء محمد. (2022). استخدام نمذجة معلومات البناء كأداة للإدارة الرشيدة في عمليات التشييد - دراسة حالة. *مجلة عين شمس الهندسية*, 13(2), 101556. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.07.009>
- السعيد، حيدر كاظم محمد، والسوداني، حيدر نعمة. (2024). تحسين تطبيق نمذجة معلومات البناء (BIM) في صناعة التشييد. *مجلة الهندسة - جامعة بغداد*, 30(2), 85–104. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2024.02.06>
- السيوفي، سارة محمد، و خليل، أيمن حسين حسني، ومحمد، حسام حسن. (2026). إطار شامل لتقييم إعادة العمل في مشاريع الجسور باستخدام إدارة القيمة المكتسبة (EVM) ونمذجة معلومات البناء (BIM). *Scientific Reports*, 16, 5682. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-27546-0>
- شقور، إيمان نبيل. (2022). دور تطبيقات نمذجة معلومات البناء (BIM) في تعزيز مجالات المعرفة لإدارة المشاريع في مصر. *مجلة عين شمس الهندسية*, 13(1), 101509. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.06.005>
- صبري، مي، وموتاوة، إبراهيم، والشيخ، آسر. (2023). أسباب إعادة العمل في مشاريع البناء والتشييد في مصر. *مجلة جامعة الأزهر لبحوث الهندسة المدنية (CERM)*, 45(1), 193–210. <https://azharcermjournal.com/CERMF2301/P23-01-12.pdf>
- عبد الباري، محمد، وإدكنز، أندرو، ودرة، عصام محمد. (2020). تقليل أسباب إعادة العمل المتعلقة بالعميل في مشاريع المسار السريع باستخدام نمذجة معلومات البناء. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 25, 140–160. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2020.009140>
- عبد المنعم، محمد شوقي، ومحمد، أحمد. (2023). نحو إطار عمل لبنني تطبيق نمذجة معلومات البناء (BIM) لتعزيز مجالات إدارة المشاريع في مصر. *مجلة جامعة الأزهر - قسم الهندسة*, 18(68), 868–890. https://jaes.journals.ekb.eg/article_283079.html

ثانياً: المراجع الأجنبية

- Abdelbary, M., Edkins, A., & Dorra, E. M. (2020). Reducing CRR in fast-track projects through BIM. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 25, 140–160. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2020.009>
- Al-Janabi, A. M., Abdel-Monem, M. S., & El-Dash, K. M. (2020). Factors causing rework and their impact on projects' performance in Egypt. *Journal of Civil Engineering and Management*, 26(7), 666–689. <https://doi.org/10.3846/jcem.2020.12916>
- Asadi, R., Rotimi, J. O. B., & Wilkinson, S. (2023). Rework causes classification model with liable parties of the contract in construction projects. *Frontiers in Built Environment*, 9, 1143829, 1–20. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1143829>

- Bhatarai, R., Banihashemi, S., Shakouri, M., & Antwi-Afari, M. (2025). Integration of Augmented Reality with Building Information Modeling: Design Optimization and Construction Rework Reduction Perspective: R. Bhatarai et al. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 32(4), 2233-2254.
- Elseufy, S. M., Khalil, A. H. H., & Mohamed, H. H. (2026). A comprehensive framework for evaluating bridge project rework through earned value management (EVM) and building information modeling (BIM). *Scientific Reports*, 16, Article 5682. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-27546-0>
- Fakhimi, A. H., Sardroud, J. M., Mazroi, A., Goreishi, S. R., & Azhar, S. (2021). Building information modeling deployment in oil, gas and petrochemical industry: An adoption roadmap. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 54(2), 281–299. <https://doi.org/10.22059/ceij.2020.302855.1680>
- Izran, I. M., Khudzari, F., Rahman, R. A., Alias, A. R., & Naganathan, H. (2024, June). Reducing rework in BIM-based construction project: factors and strategies. In *International conference on structural engineering and construction management* (pp. 375-384). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Jalaei, F., Zoghi, M., & Khoshand, A. (2021). Life cycle environmental impact assessment to manage and optimize construction waste using Building Information Modeling (BIM). *International Journal of Construction Management*, 21(8), 784-801.
- Juliana, A., Oladimeji, O., Abiodun, A. O., Haddad, A. N., & Tam, V. W. Y. (2023). Influence of rework on construction project performance in Nigeria. *International Journal of Construction Management*, 24(8), 888–893. <https://doi.org/10.1080/15623599.2023.2239439>
- Love, P. E. D., Matthews, J., Porter, S. R., Sing, M. C. P., & Fang, W. (2022). State of science: Why does rework occur in construction? What are its consequences? And what can be done to mitigate its occurrence? *Engineering*, 18, 246–258. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.04.014>
- Mamdouh, M., Moursy, O., Hassan, A. A., & Gerges, V. F. (2024, September). A comparison between CAD system and building information modelling (BIM). In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1396, No. 1, p. 012037). IOP Publishing.
- Porwal, A., Parsamehr, M., Szostopal, D., Ruparathna, R., & Hewage, K. (2023). The integration of building information modeling (BIM) and system dynamic modeling to minimize construction waste generation from change orders. *International Journal of Construction Management*, 23(1), 156-166.
- Rane, N. (2023). Integrating building information modelling (BIM) and artificial intelligence (AI) for smart construction schedule, cost, quality, and safety management: challenges and opportunities. *Cost, Quality, and Safety Management: Challenges and Opportunities* (September 16, 2023).
- Sompolgrunk, A., Banihashemi, S., & Mohandes, S. R. (2023). Building information modelling (BIM) and the return on investment: a systematic analysis. *Construction Innovation*, 23(1), 129-154.
- Waqar, A., Nisar, S., & Qadir, S. (2025). BIM-driven sustainable safety management solutions for downstream oil and gas (D-O&G) construction projects. *Environmental Challenges*, 18, 101058. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101058>
- Waqar, A., Othman, I., & González-Lezcano, R. A. (2023). Challenges to the implementation of BIM for the risk management of oil and gas construction projects: Structural equation modeling approach. *Sustainability*, 15(10), 8019. <https://doi.org/10.3390/su15108019>