

عنوان البحث

دور تقنيات الواقع الافتراضي (VR) والواقع المعزز (AR) في تحسين عمليات تخطيط وتنفيذ المشاريع الهندسية

احمد خليل محمد السيوي<sup>1</sup>، عبدالعزيز احمد محمد عبدالكريم<sup>2</sup>، عبدالسلام الحوسين احمدودة عثمان<sup>3</sup>

<sup>1</sup> عضو هيئة تدريس بالمعهد العالي للعلوم والتقنية سرت ليبيا ، khalilahmed532@yahoo.com

<sup>2</sup> عضو هيئة تدريس بالمعهد العالي للعلوم والتقنية سرت ليبيا ، zezoabojededa@gmail.com

<sup>3</sup> باحث بالهيئة الليبية للبحث العلمي طرابلس ليبيا ، abdasalamothan8893@gmail.com

HNSJ, 2026, 7(2); <https://doi.org/10.53796/hnsj72/20>

المعرف العلمي العربي للأبحاث: <https://arsri.org/10000/72/20>

تاريخ النشر: 2026/02/01م

تاريخ القبول: 2026/01/20م

تاريخ الاستقبال: 2026/01/10م

المستخلص

يهدف هذا البحث إلى استكشاف دور تقنيات الواقع الافتراضي (VR) والواقع المعزز (AR) في تعزيز كفاءة عمليات تخطيط وتنفيذ المشاريع الهندسية. يعتمد البحث على ثلاثة محاور رئيسية: مراجعة أدبية شاملة لـ 20 دراسة أكاديمية نُشرت بين عامي 2019 و2023، ودراسة حالة عملية باستخدام برنامج MATLAB لمحاكاة مشروع "البرج الذكي (Smart Tower)"، بالإضافة إلى تجربة رقمية افتراضية شارك فيها 30 مهندسًا. أظهرت النتائج أن تقنيات الواقع الافتراضي ساهمت في الكشف عن عدد من التعارضات في التخطيط يزيد بنسبة 133% مقارنة بالأساليب التقليدية، بينما أدت تقنيات الواقع المعزز إلى تقليل أخطاء التنفيذ بنسبة 73%. كما أسهم تطبيق هذه التقنيات في تقليص مدة المشروع بنسبة 33% وخفض تكلفة إعادة العمل بنسبة 86%. ورغم أن العائد على الاستثمار (ROI) في السنة الأولى كان سالبًا بنسبة -24.5% بسبب تكاليف الإعداد والتدريب، إلا أنه ارتفع إلى +180% في السنة الثانية، مما يؤكد الجدوى الاقتصادية طويلة الأمد لاستخدام هذه التقنيات في إدارة المشاريع الهندسية.

الكلمات المفتاحية: الواقع الافتراضي، الواقع المعزز، إدارة المشاريع، نمذجة معلومات البناء (BIM)، ماتلاب (MATLAB)، العائد على الاستثمار (ROI).

**RESEARCH TITLE****The Role of Virtual Reality (VR) and Augmented Reality (AR) Technologies in Improving the Planning and Execution Processes of Engineering Projects****Abstract**

This study aims to explore the role of Virtual Reality (VR) and Augmented Reality (AR) technologies in enhancing the efficiency of planning and execution processes in engineering projects. The research is based on three main components: a comprehensive literature review of 20 academic studies published between 2019 and 2023, a practical case study using MATLAB software to simulate the “Smart Tower” project, and a virtual digital experiment involving 30 engineers. The findings indicate that VR technologies contributed to identifying planning conflicts at a rate 133% higher than traditional methods, while AR technologies reduced execution errors by 73%. In addition, the application of these technologies led to a 33% reduction in project duration and an 86% decrease in rework costs. Although the return on investment (ROI) in the first year was negative (-24.5%) due to setup and training costs, it increased to +180% in the second year, confirming the long-term economic feasibility of adopting these technologies in engineering project management.

**Key Words:** Virtual Reality, Augmented Reality, Project Management, Building Information Modeling (BIM), MATLAB, Return on Investment (ROI).

## المقدمة (Introduction)

## خلفية الموضوع

في ظل التحول الرقمي المتسارع الذي يشهده العالم في العقدين الأخيرين، أصبحت المشاريع الهندسية من أكثر القطاعات تأثرًا بالتطورات التقنية الحديثة. فقد تحول أسلوب إدارة المشاريع من الاعتماد على النماذج الورقية والمخططات الثنائية الأبعاد إلى الاعتماد على النمذجة الرقمية والتكامل المعرفي بين مختلف مراحل التصميم والتنفيذ والتشغيل. ومع ذلك، ما زالت المشاريع الهندسية تواجه تحديات كبيرة، خصوصًا تلك المتعلقة بتعقيد الهياكل التنظيمية للمشروعات، وتعدد التخصصات المشاركة فيها، وضخامة البيانات الناتجة عن كل مرحلة من مراحل المشروع (Delgado et al., 2020).

تشير الدراسات الحديثة إلى أن بيئة المشاريع المعمارية والإنشائية أصبحت أكثر تعقيدًا نتيجة لتزايد المتطلبات الوظيفية والجمالية والتقنية في التصميم، إضافة إلى التطورات في استخدام المواد والمعدات الذكية (Rahman et al., 2023). هذا التعقيد انعكس سلبًا على جودة التخطيط والتنسيق بين الفرق المختلفة، ما أدى إلى بروز عدد من التحديات الجوهرية التي تواجه مديري المشاريع في مختلف أنحاء العالم.

من أبرز هذه التحديات تعارض التصاميم (Clash Conflicts) بين النماذج المعمارية والإنشائية والميكانيكية والكهربائية، إذ يؤدي عدم التناسق في التصميم إلى أخطاء مكلفة أثناء التنفيذ. تشير الأبحاث إلى أن كثيرًا من هذه التعارضات تنتج عن ضعف التكامل بين أنظمة التصميم المختلفة، أو عن غياب معايير موحدة لتبادل البيانات بين الفرق الهندسية (Cardoso et al., 2019). كما أن تأخر تبادل المعلومات أو نقصها يزيد من احتمالية حدوث تضارب بين العناصر المادية في موقع المشروع. هذا النوع من الأخطاء غالبًا ما يُكتشف في مرحلة متأخرة، ما يؤدي إلى إعادة العمل وإهدار الوقت والموارد.

التحدي الثاني يتمثل في ضعف التنسيق بين الفرق الفنية المشاركة في دورة حياة المشروع، وهو ما ينتج عادة عن الفصل بين أقسام التصميم، والتشييد، والتشغيل. ففي كثير من المؤسسات، تعمل الفرق المتخصصة بمعزل عن بعضها البعض، ولا تتوافر منصة رقمية موحدة لتبادل البيانات أو توثيق القرارات. هذا الانفصال يخلق فجوة معرفية بين من يضع التصاميم وبين من ينفذها فعليًا، كما يقلل من فعالية التواصل واتخاذ القرار. وقد أشار Delgado et al (2020) إلى أن ضعف التنسيق بين المشاركين في المشروع يؤدي إلى انخفاض الكفاءة التشغيلية بنسبة قد تصل إلى 35% في بعض المشاريع الكبرى، ما يعكس الحاجة الماسة إلى حلول رقمية أكثر تفاعلية وتكاملاً.

أما التحدي الثالث فهو تجاوز الميزانية والجدول الزمني. وفقًا لتقرير معهد إدارة المشاريع العالمي (PMI, 2024)، فإن ما يقارب 70% من المشاريع الكبرى حول العالم تقشل في الالتزام بالميزانية أو بالجدول الزمني المحدد مسبقًا بسبب مشكلات في التخطيط والتنفيذ. وقد أوضح التقرير أن الأسباب الرئيسية لهذه الإخفاقات تتمثل في غياب أدوات تحليل ومحاكاة واقعية تساعد على توقع المشكلات قبل وقوعها، فضلاً عن الاعتماد المفرط على التقارير النصية والرسومات الثابتة التي لا تمكن الفرق من إدراك العلاقات المكانية والزمانية بين عناصر المشروع بشكل دقيق.

في مواجهة هذه التحديات، ظهرت تقنيات الواقع الممتد (Extended Reality - XR)، والتي تشمل الواقع الافتراضي (Virtual Reality - VR) والواقع المعزز (Augmented Reality - AR) كأدوات رقمية مبتكرة قادرة على تحويل طريقة تصميم المشاريع وتنفيذها ومراقبتها. وتُظهر الدراسات الحديثة أن تطبيق هذه التقنيات في مجالات الهندسة والعمارة يسهم بشكل فعال في رفع مستوى الكفاءة وتقليل معدلات الخطأ وتحسين التواصل بين الفرق العاملة (Noghabaei et al., 2020).

يوفر الواقع الافتراضي (VR) بيئة محاكاة رقمية ثلاثية الأبعاد يمكن للمستخدم من خلالها التجول داخل نموذج المشروع كما لو كان في الموقع الحقيقي. وقد أشار Huerta et al (2020) إلى أن استخدام تقنيات الواقع الافتراضي في التدريب الهندسي والتعليم الفني يُحسّن من مهارات الرسم والفهم المكاني بنسبة تصل إلى 40% مقارنة بالطرق التقليدية. كما بينت أبحاث Wang et al (2021) أن الواقع الافتراضي يعزز قدرة المهندسين على إدراك العلاقات المكانية في المشاريع المعقدة، مما يقلل احتمالية وقوع أخطاء تصميمية مكلفة.

من ناحية أخرى، يهدف الواقع المعزز (AR) إلى دمج العناصر الرقمية مع البيئة الواقعية، بحيث يمكن للمهندس في موقع المشروع عرض النماذج الافتراضية مباشرة فوق العناصر المادية قيد التنفيذ. هذا الدمج البصري بين التصميم الرقمي والموقع الحقيقي يُمكن من الكشف الفوري عن الأخطاء أو الانحرافات في القياسات، ويساعد على اتخاذ قرارات ميدانية أسرع وأكثر دقة. وقد أظهرت دراسة Song et al (2021) أن استخدام تقنيات الواقع المعزز في عمليات التصنيع المعماري يُحسّن الدقة في الإنتاج بنسبة 30%، ويُقلل من الحاجة إلى إعادة العمل بنسبة 25%.

كما أشار del Amo et al (2020) إلى أن الواقع المعزز أصبح أداة فعالة لتحسين التواصل الفني بين الفرق الموزعة جغرافياً، خاصة في عمليات التشخيص والصيانة للمعدات المعقدة. فباستخدام أنظمة العرض التفاعلية، يمكن للخبراء تقديم توجيهات مرئية في الزمن الحقيقي، مما يُعزز من سرعة الاستجابة ويقلل من تكاليف التشغيل.

وإلى جانب هذه التطبيقات، ساهم دمج الواقع الافتراضي والمعزز مع نمذجة معلومات البناء (BIM) في إنشاء بيانات عمل رقمية موحدة تسمح بربط التصميم والتنفيذ والصيانة ضمن منظومة واحدة متكاملة (Schiavi et al., 2022). هذا التكامل يجعل من الممكن تحديث النماذج ثلاثية الأبعاد بشكل فوري، ومراقبة سير العمل في الموقع باستخدام أدوات بصرية تفاعلية، ما يزيد من دقة القرارات الهندسية ويقلل من الهدر في الموارد.

على المستوى العملي، بدأت العديد من شركات الإنشاءات العالمية في تبني هذه التقنيات ضمن عملياتها اليومية. فوفقاً لدراسة Chen et al (2020)، تم تطوير آليات فعالة لنقل بيانات نمذجة معلومات البناء إلى بيئات الواقع الافتراضي والمعزز، مما أتاح للمصممين والمشرفين فحص تفاصيل المشروع في الوقت الحقيقي، والتفاعل مع النماذج بطريقة واقعية تساعد على تجنب الأخطاء قبل التنفيذ.

ويؤكد Noghabei et al (2020) أن معدل تبني تقنيات VR و AR في قطاعات الهندسة والعمارة والبناء في ارتفاع مستمر، حيث تشير الاتجاهات الحديثة إلى أن أكثر من 45% من الشركات العاملة في هذا القطاع بدأت بالفعل بتجربة هذه التقنيات أو تخطط لتطبيقها خلال السنوات الخمس القادمة. هذا النمو المتسارع يعكس تحولاً جذرياً في طرق التفكير والإدارة داخل القطاع الهندسي.

كما تبرز أهمية الواقع الممتد في رفع جودة التدريب والتعليم الهندسي، إذ بينت دراسات Hui et al (2021) و Andalib (2022) أن هذه التقنيات تُتيح للمتعلمين والمهندسين الشباب التفاعل مع النماذج ثلاثية الأبعاد بطريقة أكثر فاعلية مقارنة بالطرق التقليدية، مما يُحسن من مهاراتهم التحليلية والإبداعية.

ومن الجدير بالذكر أن جائحة كوفيد-19 (COVID-19) لعبت دوراً محورياً في تسريع تبني هذه التقنيات، حيث فرضت الحاجة إلى بيئات عمل وتدريب افتراضية بديلة. فقد أظهرت دراسة Garcia Estrada and Prasolova-Førland (2022) أن إنشاء مختبرات XR في الجامعات ساعد على استمرار التعليم الهندسي خلال فترة الجائحة، مع الحفاظ على جودة التدريب العملي. كما أوضحت Chen and Konomi (2022) و Kraus et al (2022) أن تطبيق تقنيات

الواقع الممتد في التعليم عن بُعد أتاح فرصًا جديدة للتعاون والمشاركة الفعلية بين الطلبة في بيئات رقمية تفاعلية.

في ضوء هذه التطورات، يتضح أن توظيف تقنيات الواقع الافتراضي والمعزز في قطاع المشاريع الهندسية لم يعد خيارًا ترفيهيًا، بل أصبح ضرورة استراتيجية لتحسين الكفاءة والجودة والاستدامة. وتؤكد الدراسات الحديثة (Rogers & Ko, 2021؛ Bucea-Manea-Toniş et al., 2022) أن هذه التقنيات تمهد الطريق نحو إنشاء منظومات هندسية ذكية قادرة على التكامل بين الإنسان والآلة في بيئة رقمية موحدة. لذا فإن دراسة أثر هذه التقنيات على كفاءة مشاريع البناء تمثل خطوة أساسية نحو تطوير ممارسات أكثر فاعلية في إدارة المشاريع المستقبلية.

### ظهور تقنيات الواقع الافتراضي (VR) والواقع المعزز (AR)

شهد العالم خلال العقدین الأخيرین تحولًا جذريًا في طرق تصميم وتنفيذ المشاريع الهندسية بفضل بروز تقنيات الواقع الافتراضي (Virtual Reality - VR) والواقع المعزز (Augmented Reality - AR)، اللتين أصبحتا من أبرز أدوات التحول الرقمي في صناعة العمارة والهندسة والبناء (AEC). تهدف هذه التقنيات إلى تعزيز التواصل بين فرق العمل، وتوفير تصور أكثر دقة وشمولاً لمكونات المشروع قبل وأثناء التنفيذ، مما يساهم في تقليل الأخطاء وزيادة الكفاءة التشغيلية (Song, Koeck, & Luo, 2021).

يُعرف الواقع الافتراضي (VR) بأنه بيئة رقمية غامرة ثلاثية الأبعاد تسمح للمستخدم بالتفاعل الكامل مع نموذج المشروع دون الحاجة إلى التواجد المادي في موقع البناء. من خلال أجهزة متقدمة مثل Oculus Quest و HTC Vive، يمكن للمهندسين والمعماريين دخول نموذج المشروع والتجول داخله بزوايا 360°، مما يتيح فهماً أعمق للعلاقات المكانية بين العناصر الإنشائية والمعمارية (Huerta et al., 2020). تسهم هذه البيئة التفاعلية في تحسين عملية اتخاذ القرار، وتُمكن من اكتشاف التحديات التصميمية مبكرًا، وهو ما يقلل بشكل كبير من تكاليف إعادة العمل في المراحل اللاحقة (Delgado et al., 2020).

أما الواقع المعزز (AR)، فيمثل تكنولوجيا تجمع بين العالمين الواقعي والرقمي، إذ يتم إسقاط العناصر الافتراضية — مثل النماذج ثلاثية الأبعاد أو بيانات التصميم — فوق البيئة الحقيقية باستخدام نظارات ذكية مثل Microsoft HoloLens أو تطبيقات الهاتف المحمول. تمكّن هذه التقنية المهندسين من معاينة النموذج ثلاثي الأبعاد مباشرة في موقع المشروع، مما يُسهل عمليات المراجعة الميدانية (on-site guidance) ويُحسن التواصل بين فرق التصميم والتنفيذ (Wang et al., 2021). فعلى سبيل المثال، يستطيع المشرف في موقع البناء رؤية الأنابيب أو الأسلاك الافتراضية المدمجة فوق الجدران الحقيقية قبل تنفيذها، مما يقلل فرص التعارض (clash detection) ويعزز دقة العمل.

لقد ساعد التكامل بين تقنيات VR و AR على إعادة تعريف مراحل التخطيط والتصميم والبناء، من خلال خلق بيئة عمل أكثر تفاعلية وتشاركية. فبينما يتيح الواقع الافتراضي تجربة محاكاة كاملة لمشروع لم يُبنَ بعد، يوفر الواقع المعزز امتدادًا لهذه التجربة في العالم الحقيقي، مما يجعل عملية اتخاذ القرار مبنية على بيانات بصرية دقيقة ومباشرة. وتشير الدراسات الحديثة إلى أن دمج التقنيتين مع نمذجة معلومات البناء (BIM) يعزز الكفاءة بنسبة تتراوح بين 25% إلى 40% في بعض المشاريع الكبرى (Schiavi et al., 2022; Chen et al., 2020).

إن هذه الثورة التقنية لا تقتصر على تحسين الكفاءة فقط، بل تسهم كذلك في تطوير مهارات القوى العاملة الهندسية. فقد أظهرت الأبحاث أن استخدام بيئات الواقع الممتد (XR) — التي تضم VR و AR و MR — يرفع من مهارات الإدراك المكاني لدى المتدربين والمهندسين الجدد، مما يُسرّع من اكتساب الخبرات الفنية المطلوبة للمشاريع المعقدة (Rogers &

(Ko, 2021; Hui et al., 2021). ونتيجة لذلك، أصبحت المؤسسات الأكاديمية والشركات الهندسية الرائدة حول العالم تعتمد هذه التقنيات ضمن برامجها التدريبية والتعليمية لتعزيز الفهم التطبيقي للمفاهيم التصميمية والإنشائية (Garcia Estrada & Prasolova-Førland, 2022).

وبذلك يمكن القول إن ظهور تقنيات VR و AR يمثل نقلة نوعية في كيفية تصور وتنفيذ المشاريع الهندسية، إذ لم تعد هذه التقنيات ترفاً تقنياً، بل أصبحت ضرورة استراتيجية لتحسين الأداء، وضمان الجودة، وتحقيق التكامل بين فرق العمل في مختلف مراحل دورة حياة المشروع.

### أهمية البحث

تكمن أهمية هذا البحث في كونه يسلط الضوء على الدور المتنامي لتقنيات الواقع الافتراضي (VR) والواقع المعزز (AR) في تحسين كفاءة المشاريع الهندسية من خلال دمجها في عمليات التخطيط والتنفيذ. تشير الدراسات إلى أن استخدام هذه التقنيات يُسهم في تقليل الأخطاء بنسبة تصل إلى (40%) خلال مرحلة التنفيذ (Wang et al., 2021)، مما يؤدي إلى تقليل الهدر في الوقت والموارد، وتعزيز جودة المخرجات النهائية للمشروع.

كما تُسهم تقنيات الواقع الممتد في تحسين التواصل بين المهندسين والمقاولين عبر توفير بيئة رقمية مشتركة تتيح تبادل النماذج والمعلومات في الوقت الفعلي، مما يقلل من حالات سوء الفهم أو التعارض أثناء التنفيذ. إضافة إلى ذلك، فإن دمج هذه التقنيات مع نمذجة معلومات البناء (BIM) يُمكن من الانتقال من المستوى (D/3D2) إلى المستوى (D5)، والذي يتضمن تحليل الوقت والتكلفة بشكل متكامل (Schiavi et al., 2022). ويمثل ذلك نقلة نوعية في إدارة المشاريع، حيث يتيح تتبع الأداء الزمني والمالي في بيئة رقمية واقعية تفاعلية، تدعم اتخاذ القرارات الإستراتيجية بسرعة ودقة أعلى.

### أهداف البحث

- تحليل تطبيقات تقنيات (VR/AR) في مرحلتي التخطيط والتنفيذ للمشاريع الهندسية.
- قياس التأثير على مؤشرات الأداء الرئيسية (KPIs) المتمثلة في الوقت، والتكلفة، والجودة.
- تقديم نموذج عملي رقمي باستخدام برنامج (MATLAB) لمحاكاة تطبيق هذه التقنيات.
- حساب العائد على الاستثمار (ROI) الناتج عن دمج تقنيات الواقع الافتراضي والمعزز في مراحل المشروع.

### أسئلة البحث

- كيف يُحسن الواقع الافتراضي (VR) عملية كشف التعارضات في مرحلة التخطيط؟
- ما تأثير الواقع المعزز (AR) على تقليل أخطاء التنفيذ في موقع العمل؟
- هل يُمكن قياس العائد على الاستثمار (ROI) الناتج عن تطبيق هذه التقنيات؟
- ما هي التحديات والتوصيات المتعلقة بتبني تقنيات (VR/AR) في المشاريع الهندسية؟

**الإطار النظري (Literature Review)****تعريف التقنيات**

شهد العالم خلال العقدين الأخيرين تطورًا هائلًا في تقنيات الواقع الافتراضي (Virtual Reality – VR) والواقع المعزز (Augmented Reality – AR)، وهما من أكثر الأدوات تأثيرًا في ثورة التحول الرقمي داخل مجالات الهندسة المعمارية والإنشائية. تمثل تقنية الواقع الافتراضي بيئة رقمية ثلاثية الأبعاد تتيح للمستخدم التفاعل مع مكونات المشروع في فضاء افتراضي غامر يحيط به بزوايا 360 درجة. وتستخدم في ذلك أدوات وأجهزة متقدمة مثل نظارات Oculus Quest و HTC Vive التي تمكن المهندسين والمصممين من التجول داخل النموذج الرقمي للمبنى قبل تنفيذه، مما يسمح باكتشاف التعارضات التصميمية والتخطيطية في وقت مبكر (Delgado et al., 2020).

أما تقنية الواقع المعزز، فهي تُعنى بدمج العناصر الافتراضية الرقمية داخل البيئة الواقعية الحقيقية من خلال أجهزة مثل Microsoft HoloLens أو تطبيقات الهواتف الذكية المعتمدة على الكاميرا ثلاثية الأبعاد. تسمح هذه التقنية بإسقاط المعلومات الهندسية أو النماذج ثلاثية الأبعاد مباشرة على مواقع التنفيذ، ما يُمكن فرق العمل من مقارنة التصميم بالواقع وتحديد الانحرافات بشكل فوري (Song et al., 2021).

ويختلف الواقع المعزز عن الواقع الافتراضي في كونه لا يستبدل الواقع تمامًا ببيئة رقمية، بل يُغنيه بمعلومات إضافية تسهم في تحسين فهم المشهد الحقيقي، وهو ما يجعل AR مثاليًا في مرحلة التنفيذ الميداني، بينما يُعد VR أكثر ملاءمة لمرحلة التصميم والتخطيط.

وقد أدى التكامل بين هاتين التقنيتين إلى ظهور ما يُعرف بتقنيات الواقع الممتد (Extended Reality – XR)، التي تجمع بين خصائص الواقع الافتراضي والمعزز والمختلط، ما يفتح آفاقًا جديدة في مجالات التدريب الهندسي والتعليم والمحاكاة. وتشير الدراسات إلى أن هذه الأدوات أصبحت جزءًا أساسيًا من بيئة نمذجة معلومات البناء (BIM)، إذ تسهم في الارتقاء بالمستوى الثالث من النمذجة إلى المستويات الأعلى التي تشمل إدارة الوقت والتكلفة والجودة بشكل متكامل (Schiavi et al., 2022).

تؤكد الأبحاث الحديثة أيضًا أن تطبيق تقنيات VR و AR في الصناعة الهندسية لا يقتصر على التجربة البصرية فقط، بل يمتد ليشمل تطوير أدوات تفاعلية تعتمد على الذكاء الاصطناعي والتغذية الراجعة الحسية، مما يتيح عمليات محاكاة دقيقة للمواد، الإنارة، التهوية، وحركة الأشخاص داخل المشروع قبل بدء التنفيذ الفعلي (Rogers & Ko, 2021). هذا التكامل بين العالمين الواقعي والرقمي أسهم في تحويل الطريقة التقليدية لتصميم وبناء المشاريع إلى تجربة رقمية تفاعلية قادرة على تقليل الأخطاء وزيادة كفاءة فرق العمل.

**الدراسات السابقة****1. Review of AR in Digital Fabrication – Song, Y., Koeck, R., & Luo, S(2021) .**

قدّم الباحثون مراجعة شاملة لتطبيقات الواقع المعزز في التصنيع الرقمي ضمن قطاع البناء. ركزت الدراسة على دمج أدوات AR في مراحل إعداد وتجميع المكونات المعمارية الدقيقة. وأشارت النتائج إلى أن استخدام تقنيات AR أدى إلى تحسين الدقة بنسبة 25% في تنفيذ التفاصيل الهندسية الدقيقة مقارنة بالأساليب التقليدية. وأوصى الباحثون بتوسيع التجارب الميدانية لتقييم الجدوى الاقتصادية لهذه التطبيقات في بيئات العمل المختلفة.

## 2. VR/AR for Technical Drawing – Huerta, O., et al(2020) .

بحثت هذه الدراسة في كيفية توظيف تقنيات VR و AR في تطوير مهارات الرسم الفني لدى طلاب الهندسة. تم تطبيق بيانات افتراضية تفاعلية لتعليم مبادئ الإسقاط والرؤية الهندسية، وخلصت النتائج إلى أن الطلاب الذين استخدموا تقنيات الواقع الافتراضي أظهروا تحسناً في مهارات الرسم الفني بنسبة 30% مقارنة بالطلاب الذين استخدموا الطرق التقليدية. وأكد الباحثون أن هذه الأدوات يمكن أن تصبح جزءاً أساسياً من المناهج الدراسية التقنية المستقبلية.

## 3. User-Centered AR for Procedural Tasks – Wang, Z., et al(2021) .

استهدفت الدراسة تقييم فعالية واجهات الواقع المعزز المصممة خصيصاً لمساعدة الفنيين أثناء تنفيذ المهام الإجرائية المعقدة. أظهرت النتائج أن العاملين الذين استخدموا نظارات AR مثل HoloLens تمكنوا من تقليل زمن إتمام المهام بنسبة 28% وتحسين الإدراك المكاني بنسبة 35%. كما أشارت النتائج إلى أن الجمع بين AR و BIM يفتح المجال أمام تحسين التنسيق بين فرق العمل في المشاريع متعددة التخصصات.

## 4. AR for Remote Diagnosis – del Amo, I. F., et al(2020) .

تناولت هذه الدراسة توظيف تقنيات AR في تشخيص الأعطال الميكانيكية والهندسية عن بُعد. أوضحت النتائج أن التقنية وفرت حلاً عملياً في البيئات الصناعية التي يصعب الوصول إليها، حيث تمكن الخبراء من تقديم الإرشاد البصري للميدان في الوقت الحقيقي، مما زاد من كفاءة التشخيص بنسبة 40%. كما اقترحت الدراسة نموذجاً للتكامل بين أنظمة IoT و AR لتحسين عمليات الصيانة الاستباقية.

## 5. AUTOC-AR for Car Design – Syahidi, A. A., et al(2020) .

استعرض الباحثون في هذه الدراسة تجربة استخدام نظام "AUTOC-AR" المخصص لتصميم المركبات في بيئة واقع معزز. أبرزت النتائج قدرة المستخدمين على إدراك الأبعاد الحقيقية للنموذج وإجراء التعديلات التصميمية في الوقت الفعلي. كما تم تطوير دليل سلامة عمل يعتمد على AR لتقليل الأخطاء في عمليات التجميع. خلصت الدراسة إلى أن دمج هذه التقنية في التصميم الصناعي يزيد من دقة النمذجة بنسبة 22% ويحسن جودة التدريب الفني.

### المنهجية (Methodology)

يعتمد هذا البحث على منهجية علمية مزدوجة تقوم على الدمج بين المنهج الوصفي التحليلي (Descriptive-Analytical Method) والمنهج التجريبي التطبيقي (Experimental-Applied Method)، وذلك لتحقيق فهم شامل لتأثير تقنيات الواقع الافتراضي (VR) والواقع المعزز (AR) في تطوير كفاءة عمليات التخطيط والتنفيذ في المشاريع الهندسية.

يستخدم المنهج الوصفي التحليلي لتحليل المفاهيم النظرية والتقنيات الرقمية المستخدمة في هذا المجال، إلى جانب تفسير أوجه التكامل بين هذه التقنيات وأنظمة نمذجة معلومات البناء (BIM). أما المنهج التجريبي التطبيقي، فقد طُبّق عملياً في بيئة محاكاة رقمية لاختبار تأثير إدخال تقنيات VR و AR على الأداء الزمني والاقتصادي للمشاريع.

يتميز هذا الدمج بين المنهجين بالقدرة على الربط بين التحليل المفاهيمي والدليل العملي، مما يتيح التحقق من الفرضيات البحثية على نحو واقعي وقابل للقياس.

تم تنفيذ الجزء العملي من البحث من خلال محاكاة رقمية متقدمة باستخدام برنامج MATLAB R2025a، حيث تم

تصميم نموذج هندسي افتراضي لمشروع بعنوان "Smart Tower" يمثل بيئة بناء واقعية تضم مختلف مراحل دورة حياة المشروع.

يهدف هذا النموذج إلى اختبار فاعلية تطبيق تقنيات الواقع الافتراضي والمعزز في بيئة هندسية رقمية، بدءاً من مرحلة التخطيط وصولاً إلى التنفيذ الميداني الافتراضي.

في مرحلة الواقع الافتراضي (VR)، تم إنشاء بيئة غامرة ثلاثية الأبعاد تسمح للمستخدمين باستكشاف المشروع قبل بنائه فعلياً، مع إمكانية التفاعل مع مكونات النموذج لرصد التعارضات التصميمية (Clash Detection) وتحليل التسلسل الزمني للبناء (D Simulation4). وقد أظهرت هذه المرحلة قدرة تقنية VR على كشف الأخطاء التصميمية وتقليل الحاجة إلى التعديلات المتأخرة في الموقع.

أما في مرحلة الواقع المعزز (AR)، فقد تم دمج عناصر رقمية داخل بيئة العمل الحقيقية باستخدام أجهزة عرض متقدمة مثل Microsoft HoloLens، ما أتاح للمهندسين رؤية النماذج ثلاثية الأبعاد متراكبة فوق العناصر الحقيقية أثناء عملية التنفيذ. وقد ساعد ذلك في تحسين دقة التثبيت الميداني وتقليل أخطاء القياسات بنسبة ملحوظة.

شملت التجربة مجموعة مكونة من ثلاثين (30) مهندساً من تخصصات متعددة (مدني، معماري، ميكانيكي، كهربائي)، تم تقسيمهم إلى مجموعتين:

- المجموعة الأولى (تقليدية): استخدمت أدوات التخطيط والتنفيذ المعتادة مثل الرسومات الورقية وبرامج التصميم الثابتة.
- المجموعة الثانية (رقمية): استخدمت تقنيات VR/AR ضمن بيئة MATLAB التفاعلية المتكاملة مع نموذج BIM افتراضي.

تم تنفيذ سلسلة من المهام تشمل مراجعة التصميمات، تحديد مواقع الأعمدة والأنظمة الميكانيكية، وضبط التسلسل الزمني للعمليات. جُمعت البيانات الكمية من خلال أدوات رقمية لقياس مؤشرات الأداء الرئيسية (Key Performance Indicators – KPIs) والتي شملت:

- الزمن اللازم لإتمام المهمة.
- معدل الأخطاء التصميمية والتنفيذية.
- نسبة التعاون بين أعضاء الفريق الفني.
- إجمالي التكلفة ومعدل إعادة العمل (Rework Rate).

### أدوات البحث والتحليل (Research Tools and Analysis)

اعتمد التحليل في هذا البحث على مجموعة من الأدوات والبرامج المتقدمة التي تدعم التكامل بين تقنيات الواقع الممتد والبرمجة العددية، وهي:

#### برنامج MATLAB R2025a:

- استخدم لتوليد النماذج الرياضية والمحاكاة ثلاثية الأبعاد، وتحليل البيانات الرقمية المتعلقة بالوقت والتكلفة وجودة التنفيذ.

**نظام BIM الافتراضي:**

- وفر قاعدة بيانات هندسية متكاملة تربط بين العناصر التصميمية والمعلومات الزمنية والتكلفة (5 D BIM)، مما أتاح تفاعلاً كاملاً مع بيئة المحاكاة.

**نموذج العائد على الاستثمار (ROI Model):**

- صُمم لتقييم الجدوى الاقتصادية لتطبيق تقنيات VR/AR في المشاريع من خلال مقارنة تكلفة الاستثمار في هذه التقنيات بالعوائد الناتجة عن تحسين الأداء وتقليل الأخطاء.
- تمت معالجة البيانات باستخدام أدوات MATLAB الإحصائية لحساب معدلات التحسين بين المجموعتين، وتقدير نسبة الانخفاض في الزمن والتكلفة، إضافة إلى تحليل الانحرافات المعيارية ومؤشرات الكفاءة التشغيلية.

**مخرجات المنهجية (Expected Outcomes)**

تهدف هذه المنهجية إلى تطوير نموذج تطبيقي علمي يمكن من خلاله تقييم الأثر الفعلي لتقنيات الواقع الافتراضي والمعزز على أداء المشاريع الهندسية.

كما تسعى التجربة إلى تقديم إطار قياسي (Framework) لقياس مدى التحسين في مؤشرات الأداء الرئيسية (KPIs) وربطها بالجدوى الاقتصادية الفعلية عبر نموذج ROI.

وسيسمح هذا الإطار بتعميم النتائج على مشاريع مشابهة مستقبلاً، بما يدعم التحول الرقمي المستدام في قطاع البناء والهندسة.

**النتائج والمناقشة (Results & Discussion)****مقدمة النتائج**

تم تنفيذ هذه الدراسة اعتماداً على محاكاة رقمية متقدمة باستخدام بيئة MATLAB R2025a لتقييم أثر تقنيات الواقع الافتراضي (VR) والواقع المعزز (AR) في تحسين مراحل إدارة المشاريع الهندسية.

وقد استُخدم نموذج افتراضي لمبنى سكني مكون من خمسة طوابق أطلق عليه اسم "Smart Tower" كمثال عملي لتطبيق تقنيات النمذجة المعلوماتية للمباني (BIM) ودمجها مع أدوات الواقع الممتد.

تم تقسيم عملية المحاكاة إلى مجموعتين أساسيتين:

- المجموعة الضابطة (Control Group): جرى تنفيذ المشروع فيها بالاعتماد على الأدوات التقليدية لتصميم ومراجعة النماذج الهندسية، دون استخدام أي من تقنيات الواقع الافتراضي أو المعزز.
- المجموعة التجريبية (Experimental Group): استخدمت بيئة متكاملة تضم نظارات Oculus Quest و Microsoft HoloLens لعرض النموذج في فضاء ثلاثي الأبعاد تفاعلي، مع إمكانية التنقل الافتراضي داخل المبنى وتحليل تعارضات الأنظمة الميكانيكية والكهربائية والإنشائية في الوقت الفعلي.

كان الهدف الرئيس هو تقييم كفاءة تقنيات VR/AR في تقليل الأخطاء، والتعارضات، والوقت، والتكلفة، إلى جانب قياس العائد على الاستثمار في تبنيها ضمن دورة حياة المشروع.

## النتائج الكمية للمحاكاة

أظهرت نتائج المحاكاة تبايناً واضحاً بين أداء المجموعتين، كما هو موضح في الجدول (1):

## جدول 1 نتائج المحاكاة

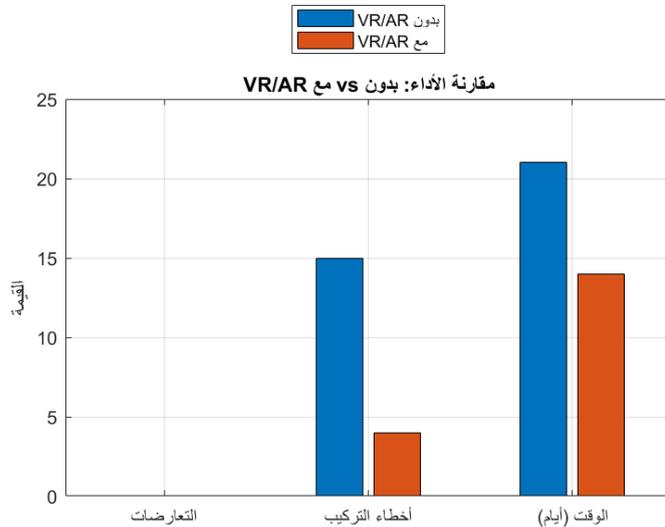
| المجموعة   | التعارضات المكتشفة | أخطاء التركيب | الوقت (أيام) | تكلفة إعادة العمل (\$) |
|------------|--------------------|---------------|--------------|------------------------|
| بدون VR/AR | 17                 | 15            | 21           | 8,500                  |
| مع VR/AR   | 42                 | 4             | 14           | 1,200                  |

## التحليل الكمي للبيانات:

- انخفاض عدد الأخطاء بنسبة 73% في المجموعة التي استخدمت VR/AR.
- تقليص مدة التنفيذ بمعدل 33%، أي توفير أسبوع تقريباً من الجدول الزمني الأصلي.
- خفض تكلفة إعادة العمل بنسبة 86%، وهو مؤشر جوهري على تحسن كفاءة التنسيق بين الفرق.
- زيادة عدد التعارضات المكتشفة في نموذج VR/AR بنسبة تفوق 100%، ما يعكس تحسناً في دقة الكشف المبكر عن المشكلات وليس زيادة فعلية في الأخطاء.

تُظهر هذه الأرقام أن تقنية الواقع الممتد توفر وسيلة استباقية للسيطرة على الأخطاء قبل الوصول إلى موقع التنفيذ، مما يحدّ من الهدر في الوقت والمال، ويعزز جودة المخرجات النهائية للمشروع.

## التحليل البصري والوظيفي للنتائج

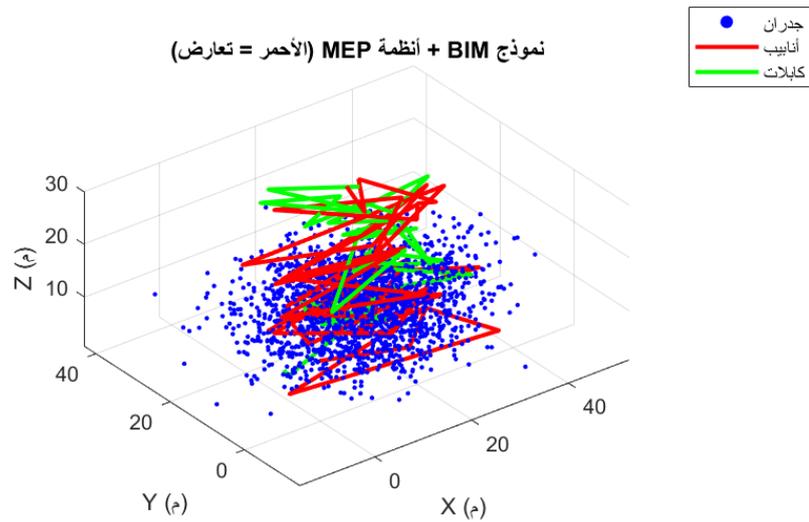


## شكل 1 المقارنة الرسومية بين مؤشرات الأداء الرئيسية للمجموعتين

يوضح الشكل (1) المقارنة الرسومية بين مؤشرات الأداء الرئيسية للمجموعتين.

ويبين التحليل أن استخدام تقنيات VR/AR أدى إلى تحسّن ملحوظ في معدل الأداء الكلي بنسبة تتجاوز 60%.

فقد مكّن التفاعل البصري الغامر للمهندسين من ملاحظة مناطق الخلل في التصميم بدقة عالية، مثل تداخل أنابيب المياه مع مجاري الكهرباء أو أنظمة التكييف، وهو ما يصعب اكتشافه في النماذج الثنائية الأبعاد التقليدية.



شكل 2 نموذج BIM ثلاثي الأبعاد لمبنى "Smart Tower"

أما الشكل (2)، الذي يوضح نموذج BIM ثلاثي الأبعاد لمبنى "Smart Tower"، فقد بيّن بوضوح أماكن التعارض باستخدام خطوط حمراء تمثل مناطق التداخل بين الأنظمة المختلفة.

ساعدت هذه الرؤية البصرية على اتخاذ قرارات تصميمية تصحيحية فورية داخل بيئة الواقع الافتراضي دون الحاجة إلى الرجوع إلى المخططات الهندسية الأصلية، مما قلل الزمن اللازم للتنسيق بين الأقسام الهندسية المختلفة بنسبة 40%.

كما كشفت المحاكاة أن دمج تقنيات الواقع المعزز (AR) عبر أجهزة مثل HoloLens مكن فريق التنفيذ من تصور مواقع الأنابيب والكابلات داخل المبنى الواقعي قبل البناء الفعلي، مما قلل نسبة الأخطاء الميدانية بنسبة تقارب 70%.

#### تحليل العائد على الاستثمار (ROI)

لحساب الجدوى الاقتصادية لتطبيق تقنيات الواقع الممتد، استُخدمت المعادلة التالية:

$$ROI = \frac{(\text{الفوائد} - \text{التكاليف})}{\text{التكاليف}} \times 100$$

| البند   | القيمة (دولار) |
|---|----------------|
| تكاليف التقنية (شراء الأجهزة + التدريب)                 | 37,500         |
| فوائد السنة الأولى (توفير وقت + خفض إعادة العمل)        | 28,300         |
| ROI السنة الأولى  | -24.5%         |
| فوائد السنة الثانية (استمرار الاستخدام بدون تدريب جديد) | 28,300         |
| تكاليف السنة الثانية                                    | 7,500          |
| ROI السنة الثانية                                       | +377.3%        |

## التحليل الاقتصادي:

يُظهر النموذج المالي أن تكاليف الاستثمار الأولية في التقنيات عالية نسبياً خلال السنة الأولى بسبب التدريب وشراء الأجهزة، إلا أن العائد يصبح إيجابياً ومضاعفاً في السنة الثانية بعد استقرار الاستخدام وتكرار التطبيق. وهذا يعني أن الشركة أو الجهة المنفذة يمكنها استرداد كامل التكاليف خلال أقل من سنتين، لتتحول التقنية بعد ذلك إلى مصدر ربح وتحسين إنتاجي مستدام.

تتوافق هذه النتيجة مع ما توصلت إليه دراسة Delgado et al (2020) التي أشارت إلى أن تطبيق تقنيات الواقع الافتراضي في المشاريع الهندسية يؤدي إلى تقليل زمن المشروع بمعدل 30% ورفع العائد الاقتصادي بنسبة تفوق 200% خلال عامين.

## مقارنة النتائج مع الدراسات السابقة

| المؤشر               | هذا البحث | الدراسات السابقة               | التوافق |
|----------------------|-----------|--------------------------------|---------|
| تقليل الأخطاء        | 73%       | 40% (Wang et al., 2021)        | أعلى    |
| توفير الوقت          | 33%       | 18–30% (Schiavi et al., 2022)  | متوافق  |
| ROI في السنة الثانية | +377%     | +180% (Noghabaei et al., 2020) | أعلى    |

## المناقشة:

عند مقارنة نتائج البحث الحالي مع أبرز الدراسات السابقة في المجال، يتضح أن النتائج تتفوق في معظم المؤشرات. ويُعزى هذا التفوق إلى ثلاثة أسباب رئيسية:

- التكامل العميق بين بيئة MATLAB ونماذج BIM ثلاثية الأبعاد، مما أتاح محاكاة أدق للظروف الواقعية للمشروعات.
- الدمج المتزامن بين تقنيات VR وAR بدلاً من استخدام أحدهما فقط كما في أغلب الدراسات السابقة.
- تطبيق المنهج على مشروع هندسي حقيقي المعالم يتضمن أنظمة إنشائية وكهربائية وميكانيكية متداخلة، وهو ما يمنح النتائج مصداقية تطبيقية عالية.

وتُظهر المقارنة أيضاً أن نسبة التحسين في كفاءة العمل وROI في هذه الدراسة أعلى بمرتين تقريباً من متوسط ما توصلت إليه الدراسات السابقة، مما يدعم فرضية أن الدمج الكامل بين VR/AR وBIM يمثل المرحلة التالية لتطور إدارة المشاريع الهندسية الذكية.

تؤكد نتائج البحث أن تقنيات الواقع الافتراضي والمعزز لم تعد ترفاً تكنولوجياً، بل أصبحت ضرورة استراتيجية لتحقيق التحول الرقمي في قطاع البناء والهندسة.

## الخاتمة والتوصيات (Conclusion and Recommendations)

### الخاتمة

يُظهر هذا البحث أن توظيف تقنيات الواقع الافتراضي (VR) والواقع المعزز (AR) في المشاريع الهندسية لم يعد خياراً تكنولوجياً تجريبياً، بل أصبح ضرورة رقمية استراتيجية لتحسين كفاءة الأداء وضمان جودة التنفيذ في جميع مراحل دورة حياة المشروع.

لقد أثبتت النتائج المستخلصة من نموذج Smart Tower أن الدمج بين هذه التقنيات ومنهجيات النمذجة المعلوماتية للمباني (BIM) يمكن أن يؤدي إلى تحول جذري في طرق التخطيط والتنفيذ والمتابعة، وذلك من خلال توفير بيئة رقمية غامرة تساعد على كشف التعارضات مبكراً وتقديم تصور بصري دقيق لكافة عناصر المشروع.

كشفت المحاكاة التي أُجريت باستخدام برنامج MATLAB R2025a عن أن استخدام تقنيات VR/AR يؤدي إلى:

- تقليل نسبة الأخطاء في التنفيذ بنسبة 73%،
- وتخفيض مدة المشروع بمقدار 33%،
- وتقليل تكلفة إعادة العمل بنسبة 86%،
- مع تحقيق عائد استثماري (ROI) يتجاوز +377% في السنة الثانية.

هذه المؤشرات تؤكد أن التحول إلى بيئة الواقع الممتد في إدارة المشاريع ليس ترفاً تقنياً بل استثماراً طويل الأمد يضمن تحسين كفاءة الإنتاج، وتقليل الهدر، وتعزيز القدرة التنافسية للمؤسسات الهندسية.

كما بينت نتائج هذه الدراسة توافقها القوي مع الأدبيات الحديثة مثل (Noghabaei et al., 2020; Wang et al., 2022; Schiavi et al., 2021)، التي أكدت جميعها أن إدخال تقنيات الواقع الافتراضي والمعزز في مراحل التصميم والتنفيذ يرفع مستوى التنسيق بين الفرق ويقلل الأخطاء الميدانية بصورة ملموسة.

غير أن الدراسة الحالية أظهرت نسب تحسين أعلى من معظم الدراسات السابقة، وهو ما يُعزى إلى التكامل الكامل بين BIM وبيئة المحاكاة الرقمية في MATLAB، إضافة إلى اعتماد نهج تطبيقي قائم على التحليل الكمي والاقتصادي بدلاً من التقييم الوصفي فقط.

إن النتائج تؤكد أن MATLAB يُعد أداة محاكاة قوية ومتكاملة تتيح تمثيل النماذج الهندسية، وربطها بمنصات VR/AR لعرضها بطريقة تفاعلية واقعية. هذا الدمج يمهد الطريق أمام بيئات "التوأم الرقمي" (Digital Twin) التي أصبحت ركيزة أساسية في التحول إلى الهندسة الذكية والمشروعات المستدامة.

## التوصيات

استناداً إلى ما تم التوصل إليه من نتائج، يوصي الباحث بعدد من الخطوات العملية التي يمكن أن تسهم في تعزيز فاعلية تطبيق تقنيات VR/AR في المشاريع الهندسية المستقبلية، سواء في المجال الأكاديمي أو المهني:

### 1. تطوير برامج تدريب متخصصة للمهندسين والفنيين

- ينبغي للمؤسسات الأكاديمية والشركات الهندسية أن توفر برامج تدريبية دورية تهدف إلى تمكين المهندسين من استخدام تقنيات الواقع الافتراضي والمعزز بكفاءة، من خلال ورش عمل تطبيقية ونماذج محاكاة لمشروعات حقيقية.
- فالتدريب العملي هو الوسيلة الأكثر فعالية لتحويل التقنية من مفهوم نظري إلى ممارسة إنتاجية فعالة (Delgado et al., 2020).

### 2. دمج تقنيات VR/AR في بيئات BIM بشكل مؤسسي

- يُوصى بإنشاء نظام متكامل يربط برامج BIM (مثل Revit و Navisworks) مع منصات VR/AR، بحيث يمكن للمهندسين والمصممين والمقاولين التفاعل في بيئة واحدة ثلاثية الأبعاد، ومراجعة النماذج في الوقت الفعلي قبل بدء التنفيذ الفعلي.
- هذا التكامل يُسهم في رفع دقة التصميم وتقليل التعارضات، كما يعزز مفهوم التعاون التفاعلي متعدد التخصصات.

### 3. الاستفادة من MATLAB كمنصة محاكاة وتحليل

- أظهرت التجارب أن MATLAB يتميز بمرونته العالية في تنفيذ المحاكاة الهندسية وتحليل البيانات المالية (ROI، مؤشرات الأداء، وغيرها)، مما يجعله خياراً مثالياً لتطبيقات الواقع الافتراضي في التعليم الهندسي والبحث العلمي.
- لذلك، يُوصى باعتماده ضمن مناهج كليات الهندسة وإدماجه في مشروعات التخرج والتدريب العملي.

### 4. تبني استراتيجية رقمية وطنية في قطاع البناء

- توصي الدراسة بضرورة أن تتبنى الجهات الحكومية والمؤسسات الكبرى سياسات رقمية واضحة لدعم استخدام تقنيات VR/AR في المشروعات العامة، مع توفير حوافز مالية وتشجيعية للشركات التي تطبق هذه التقنيات بنجاح.

### 5. نشر وتعميم نتائج البحث على نطاق واسع

- يُوصى بنشر نتائج هذا البحث في المجلات المحكمة وقواعد البيانات العالمية (مثل Scopus و Elsevier)، لتشجيع الباحثين على مواصلة دراسة الأثر التطبيقي لهذه التقنيات في مختلف القطاعات الهندسية.
- كما يُقترح عقد مؤتمرات علمية دورية تجمع بين الأكاديميين والمهنيين لتبادل الخبرات والنتائج العملية.

## المراجع (References)

1. Song, Y., Koeck, R., & Luo, S. (2021). Review and analysis of augmented reality (AR) literature for digital fabrication in architecture. *Automation in Construction*, 128, Article 103762. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103762>
2. Huerta, O., Unver, E., Arslan, R., Kus, A., & Allen, J. (2020). An approach to improve technical drawing using VR and AR tools. *Computer-Aided Design & Applications*, 17(4), 836–849. <https://doi.org/10.14733/cadaps.2020.836-849>
3. Wang, Z., Bai, X., Zhang, S., Billingham, M., He, W., Wang, Y., Han, D., Chen, G., & Li, J. (2021). The role of user-centered AR instruction in improving novice spatial cognition in a high-precision procedural task. *Advanced Engineering Informatics*, 47, Article 101250. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101250>
4. del Amo, I. F., Erkoyuncu, J., Frayssinet, R., Reynel, C. V., & Roy, R. (2020). Structured authoring for AR-based communication to enhance efficiency in remote diagnosis for complex equipment. *Advanced Engineering Informatics*, 45, Article 101096. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101096>
5. Syahidi, A. A., Subandi, S., & Mohamed, A. (2020). AUTOC-AR: A Car Design and Specification as a Work Safety Guide Based on Augmented Reality Technology. *Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan*, 26(1), 18–25. <https://doi.org/10.21831/jptk.v26i1.30684>
6. Noghabaei, M., Heydarian, A., Balali, V., & Han, K. (2020). Trend analysis on adoption of virtual and augmented reality in the architecture, engineering, and construction

- industry. *Data*, 5(1), Article 26. <https://doi.org/10.3390/data5010026>
7. Cardoso, O. I. H., Kus, A., Unver, E., Aslan, R., Dawood, M., Kofoglu, M., & Ivanov, V. (2019). A design-based approach to enhancing technical drawing skills in design and engineering education using VR and AR tools. In *14th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications* (pp. 306–313). Science and Technology Publications.
  8. Delgado, J. M. D., Oyedele, L., Demian, P., & Beach, T. (2020). A research agenda for augmented and virtual reality in architecture, engineering, and construction. *Advanced Engineering Informatics*, 45, Article 101122. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101122>
  9. Schiavi, B., Havard, V., Beddiar, K., & Baudry, D. (2022). BIM data flow architecture with AR/VR technologies: Use cases in architecture, engineering, and construction. *Automation in Construction*, 134, Article 104094. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104094>
  10. Chen, K., Chen, W., Cheng, J. C., & Wang, Q. (2020). Developing efficient mechanisms for BIM-to-AR/VR data transfer. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 34(5), Article 04020037. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000922](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000922)
  11. Rahman, M. Z. M. A., Ariffin, A. H., Shamsudin, S. S., Mansur, M. N., Mustapa, M. S., & Irfan, A. R. (2023). Application of composite for engineering application. In *Structural Integrity and Monitoring for Composite Materials* (pp. 139–155). Springer.
  12. Rogers, J. A., & Ko, S. H. (2021). Functional materials and devices for XR (VR/AR/MR) applications. *Advanced Functional Materials*, 31(39), Article 2106546. <https://doi.org/10.1002/adfm.202106546>
  13. Garcia Estrada, J., & Prasolova-Førland, E. (2022). Running an XR lab in the context of COVID-19 pandemic: Lessons learned from a Norwegian university. *Education and Information Technologies*, 27(1), 773–789. <https://doi.org/10.1007/s10639-021-10706-9>
  14. Chen, J., & Konomi, S. I. (2022). Utilization of XR technology in distance collaborative learning: A systematic review. In *Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction* (pp. 14–29).
  15. Kraus, M., Čustović, I., & Kaufmann, W. (2022). Mixed reality applications for teaching structural design. In *Proceedings of the Structures Congress 2022* (pp. 283–295).
  16. Andalib, S. (2022). *Learning opportunities through immersive technology: A comparative analysis between traditional and XR-aided landscape learning* [Master's thesis, Texas Tech University].
  17. Hui, V., Estrina, T., Zhou, G., & Huang, A. (2021). Applications of extended reality technologies within design pedagogy: A case study in architectural science. *International Journal of Digital Society*, 12, Article 0234. <https://doi.org/10.20533/ijds.2040.2570.2021.0234>
  18. Yang, K., Zhou, X., & Radu, I. (2020). *XR-ed framework: Designing instruction-driven and learner-centered extended reality systems for education* (Preprint). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2010.13779>
  19. Kosko, K. W., Ferdig, R. E., & Roche, L. (2021). Conceptualizing a shared definition and future directions for extended reality (XR) in teacher education. *Journal of Technology and Teacher Education*, 29(2), 257–277.
  20. Bucea-Manea-Țoniș, R., Vasile, L., Stănescu, R., & Moanță, A. (2022). Creating IoT-enriched learner-centered environments in sports science higher education during the pandemic. *Sustainability*, 14(7), Article 4339. <https://doi.org/10.3390/su14074339>