التوأم الرقمي كأداة مبتكرة في تطوير التصميم الداخلي

Digital Twin as an Innovative Tool in Interior Design Development

ميرنا محمود التوني [١]* نجلاء عزت أحمد [٢] أميمة إبراهيم قاسم [٣]

١* معيد بقسم التصميم الداخلي والأثاث، كلية الفنون التطبيقية، جامعة ٦ أكتوبر، مصر
٢ أستاذ مساعد بقسم التصميم الداخلي والأثاث، كلية الفنون التطبيقية، جامعة ٦ أكتوبر، مصر
٣ أستاذ بقسم التصميم الداخلي والأثاث ووكيل كلية الفنون التطبيقية لشئون التعليم والطلاب، كلية الفنون التطبيقية، جامعة ٦ أكتوبر، مصر

Submit Date:2025-04-19 14:06:20 | Revise Date:2025-06-1214:16:13 | Accept Date: 2025-06-12 17:31:18

DOI:10.21608/jdsaa.2025.376969.1477

ملخص البحث:-

يشهد العالم تطورًا تكنولوجيًا متسارعًا بفضل التحولات الرقمية، ويُعد التوأم الرقمي (Digital Twin) من بين أبرز التقنيات الحديثة التي أحدثت تحولًا نوعيًا في مختلف المجالات، ومن ابرزها التصميم الداخلي والعمارة، حيث أصبح التوأم الرقمي أحد الأدوات الرائدة التي توفر بيئة افتراضية ديناميكية تتيح للمستخدمين التفاعل الفوري مع النماذج الرقمية. تعتمد هذه التقنية على إنشاء نسخة رقمية متطابقة للفراغات الداخلية، تعكس تفاصيل التصميم بدقة عالية، وذلك عبر توظيف النمذجة ثلاثية الأبعاد، الذكاء الاصطناعي (AI)، وإنترنت الأشياء (IoT). ورغم التطورات الملحوظة في استخدام التوأم الرقمي، لا تزال هناك تساؤلات حول كيفية تأثير دمج التوأم الرقمي مع تقنيات الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء (IoT) لتطوير عمليات التصميم الداخلي.من هذا المنطلق، يهدف البحث إلى القاء الضوء على مفهوم التوأم الرقمي واستكشاف دوره في تطوير التصميم الداخلي. وتتمثل فرضية البحث في أن التوأم الرقمي قد يكون قادرًا على تحسين جودة التصميم الداخلي من خلال توفير أدوات تحليلية وتفاعلية تدعم عملية اتخاذ القرارات التصميمية بدقة وكفاءة. ولتحقيق ذلك، يعتمد البحث على المنهج الوصفي التحليلي من خلال دراسة نماذج من تطبيقات التوأم الرقمي في التصميم الداخلي والعمارة، مع تسليط الضوء على الإيجابيات والسلبيات المرتبطة بتوظيف هذه التقنية. وتشير النتائج أن التوأم الرقمي يمثل أداة واعدة في مجال التصميم الداخلي، حيث يوفر إمكانيات كبيرة في تحسين كفاءة التصميم، مما يجعله عنصرًا أساسيًا في تطور التصميم الداخلي.

الكلمات المفتاحية:-

التوأم الرقمي ، الذكاء الاصطناعي ، إنترنت الأشياء ، الواقع الافتراضي ، التصميم الداخلي.

المقدمة :

في ظل التطور المتسارع للتقنيات الرقمية، يشهد العالم المعاصر تطورًا تكنولوجيًا متسارعًا مدفوعًا بالتحولات الرقمية السريعة، حيث برزت تقنيات متقدمة أحدثت تأثيرات جذرية في مختلف المجالات، من أبرزها تقنية التوأم الرقمي .(Digital Twin) وتُعد هذه التقنية من الابتكارات الرائدة التي ساهمت في تغيير أنماط التصميم والتفاعل مع البيئات الافتراضية، لا سيما في مجالي التصميم الداخلي والعمارة. إذ يُوفر التوأم الرقمي بيئة رقمية ديناميكية تفاعلية، تُمكّن المستخدمين من محاكاة الفراغات الداخلية والتفاعل معها في الزمن الحقيقي، اعتمادًا على تقنيات النمذجة ثلاثية الأبعاد(3D Modeling) ، الذكاء الاصطناعي(AI) ، وإنترنت الأشياء.(IoT)

تقوم فكرة التوأم الرقمي على الدمج المتكامل بين النمذجة ثلاثية الأبعاد، تقنيات الذكاء الاصطناعي، وإنترنت الأشياء، لتوفير بيئة رقمية قادرة على محاكاة وتحليل أداء الفراغات الداخلية بدقة وكفاءة. وبفضل هذه الإمكانيات، أصبح من الممكن للمصممين والمهندسين الاستفادة من البيانات الفورية التي تساعد في اتخاذ قرارات تصميمية أكثر وعيًا واستجابة للسياقات الوظيفية والجمالية. ومن هنا، يهدف هذا البحث إلى تحديد المفهوم العلمي للتوأم الرقمي، وتحليل دوره في تطوير عمليات التصميم الداخلي.

ورغم التقدم الملحوظ في تطبيق التوأم الرقمي في مجالات متعددة، إلا أن توظيفه في التصميم الداخلي لا يزال يواجه تحديات تقنية ومنهجية. ويُعزى ذلك إلى قصور في الدراسات التطبيقية التي تبحث في كيفية تفعيل هذه التقنية داخل البيئات الداخلية، إلى جانب تعقيد التكامل بين النظم الذكية، والحاجة إلى مهارات متخصصة.

انطلاقًا من ذلك، تبرز أهمية هذا البحث في كونه يسعى إلى سد الفجوة المعرفية والتطبيقية في فهم آليات دمج التوأم الرقمي في التصميم الداخلي، واستكشاف مدى تأثيره على جودة الفراغات الداخلية، وتقليل الفاقد في الموارد، وتعزيز الاستدامة والكفاءة التشغيلية. ولتحقيق هذه الأهداف، يعتمد البحث على المنهج الوصفي التحليلي، من خلال جمع المعلومات وتحليلها، وتحليل النماذج التطبيقية، وصولًا إلى بناء إطار نظري يُسهم في تطوير التصميم الداخلي في ظل هذا التحوّل الرقمي العميق.

مفهوم التوأم الرقمي : (Digital Twin)

التوأم الرقمي هو تمثيل افتراضي أو نسخة رقمية مطابقة لكيانات مادية أو عمليات أو أنظمة أو كيانات حقيقية. ويتم إنشاء هذه النماذج الرقمية بالاعتماد على البيانات الفورية المستمدة من أجهزة الاستشعار، وتقنيات إنترنت الأشياء(IoT) ، ومصادر بيانات أخرى، وذلك لمحاكاة خصائص وسلوكيات ووظائف نظيرها الواقعي. (Javaid et al. ,2023, pp.72)

وتتميز هذه النسخ الرقمية بكونها أكثر من مجرد نماذج ثابتة، إذ إنها تقوم بجمع البيانات بشكل مستمر من العالم الفيزيائي، مما يمكّنها من محاكاة التغيرات والظروف الواقعية في الزمن الحقيقي أو شبه الحقيقي .ويتيح هذا النوع من المحاكاة المعتمدة على البيانات إمكانيات واسعة للرصد والتحليل والتحسين المستمر للأصول أو الأنظمة المادية التي تمثلها.

يتم تطبيق التوائم الرقمية في طيف واسع من المجالات، مثل التصنيع، والرعاية الصحية، والمدن الذكية، وقطاع الطيران، وغيرها .وتُعد أداة قوية للتحليل التنبؤي، ومراقبة الأداء، ودعم اتخاذ القرار، وتعزيز الابتكار من خلال السماح بتجريب السيناريوهات المختلفة واختبارها دون التأثير على الكيانات الواقعية. (Farhadi, 2024)

تاريخ ونشأة تكنولوجيا التوأم الرقمي : (History of Digital Twin Technology)

شهد مفهوم التوأم الرقمي (Digital Twin) تطورًا تدريجيًا، انطلق من جذور علمية وصناعية تعود إلى مطلع القرن الحادي والعشرين، وارتبط ظهوره ارتباطًا وثيقًا بتطورات الثورة الصناعية الرابعة، التي تمحورت حول التكامل بين العوالم الواقعية والافتراضية، من خلال تكنولوجيا إنترنت الأشياء (IoT) والذكاء الاصطناعي (AI). (IBM, 2021)

يرجع الفضل في طرح مفهوم التوأم الرقمي إلى مايكل غريفيس (Michael Grieves)، الذي طرح الفكرة لأول مرة عام 2002 أثناء عمله بجامعة ميشيغان في الولايات المتحدة الأمريكية. وقد جاء ذلك في إطار محاضرة تناولت إدارة دورة حياة المنتج (Product Lifecycle Management - PLM)، حيث اقترح إمكانية إنشاء نموذج افتراضي مطابق لمنتج مادي حقيقي، يتيح تتبع أدائه وتحديثه بصورة مستمرة استنادًا إلى بيانات حية.

وانطلاقًا من هذه الأرضية النظرية، جاءت الخطوة التالية نحو التطبيق العملي في الفترة ما بين عام (٢٠١٠-٢٠١٢)، حين قام جون فيكرز(John Vickers) ، الباحث في وكالة الفضاء الأمريكية (NASA)، بتطبيق مفهوم التوأم الرقمي ضمن بيئة الفضاء. وقد تمثّل هذا التطبيق في محاكاة أداء المركبات الفضائية باستخدام نماذج رقمية افتراضية ترتبط بمجموعة من الحساسات والمستشعرات المدمجة في الكيان الفيزيائي. مكّنت هذه التقنية ناسا من رصد وتحليل حالة المركبات أثناء الطيران في الزمن الحقيقي، مما اعتُبر آنذاك أول تطبيق عملي حقيقي لتكنولوجيا التوأم الرقمي، والذي وضع المفهوم في إطار عملي متكامل خارج نطاق التصورات النظرية. (Negri, Fumagalli and Macchi, 2017, pp.942)

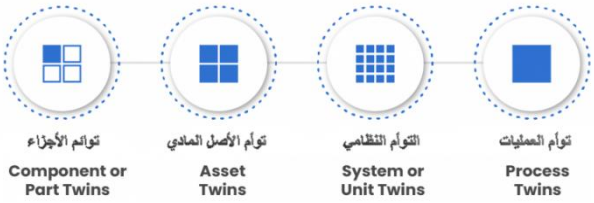
في أعقاب نجاح النموذج الفضائي، بدأ القطاع الصناعي في تبني مفهوم التوأم الرقمي على نطاق واسع، لا سيما منذ منتصف العقد الثاني من القرن الحادي والعشرين. وقد لعبت شركات رائدة مثل شركة (General Electric) في مجال مراقبة وإدارة توربينات الرياح والطاقة، شركة (Tesla) في محاكاة الأداء الواقعي للمركبات الكهربائية، شركة (Siemens وDassault Systems) في تطوير المنتجات الذكية وإدارة دورة حياتها، وقد لعبت هذه التطبيقات دورًا

محوريًا في ترسيخ استخدام التوأم الرقمي كأداة فعّالة لتحسين كفاءة التصنيع، تقليل تكاليف التشغيل والصيانة، والتنبؤ المسبق بالأعطال.

وفي سياق التطور السريع لهذا المفهوم، جاء الاعتراف المؤسسي الدولي حين أدرجت مؤسسة (Gartner) للأبحاث تقنية التوأم الرقمي ضمن قائمة أهم ١٠ توجهات تقنية استراتيجية لعام 2017. وقد ساهم هذا التصنيف في منح التقنية زخمًا عالميًا، مما أدى إلى اتساع نطاق استخدامها عبر قطاعات متعددة، شملت التعليم، الرعاية الصحية، البنية التحتية، والتصميم المعماري، والتصميم الداخلي. الأمر الذي يدل على أهمية التوأم الرقمي كأحد المكونات الأساسية للتحول الرقمي الشامل في مختلف المجالات. (مجلد، ٢٠٢٣، ص.٢٠٨)

أنواع التوائم الرقمي :

يمكن تصنيف التوائم الرقمية إلى أربعة أنواع رئيسية، لكل منها خصائصه ووظائفه الخاصة، كما يوضح شكل رقم (١) :



الشكل رقم (١) يوضح أربعة أنواع رئيسية للتوأم الرقمي.
Source: Tributech. (n.d.). The 4 Types of Digital Twins. [online] Tributech.io. Available at: https://www.tributech.io/blog/the-4-types-of-digital-twins [Accessed 3 Mar. 2025].

١. توائم الأجزاء: (Component Twin)

يُعد هذا النوع نسخة افتراضية لعنصر واحد أو جزء من نظام أكبر. وتتمثل مهمته الأساسية في تتبع وتحليل البيانات المرتبطة بذلك الجزء تحديدًا، مثل المحركات أو الحساسات أو الأنظمة الفرعية.

يوفر هذا النوع من التوأم الرقمي معلومات تفصيلية حول كيفية أداء الأجزاء المختلفة، مما يسهم في تحديد توقيت الصيانة المطلوبة، وتحسين الإجراءات التشغيلية، ورفع الكفاءة العامة. (Podmurnyi,2022)

٢. توأم الأصل المادي : (Asset Twin)

يمثل هذا التوأم الافتراضي نسخة رقمية تتكون من عدة أقسام إما تُحاكي عناصر واقعية معينة من الأصل الفعلي أو تستخدم البيانات الناتجة عن تلك الأجزاء حيث يُوفّر هذا النوع رؤية شاملة لأداء الأصل ككل. مما يُساعد في تحسين كفاءة التشغيل وتقليل التكاليف التشغيلية.

على سبيل المثال، في قطاع الهندسة، يوفر هذا النوع للمهندسين فهمًا لكيفية تفاعل الأجزاء المختلفة مع بعضها البعض ضمن النظام الواحد، ويتيح تقييم كيفية تحسين الأداء، تقليل الاخطاء، وترشيد استخدام الموارد. (Andrade, 2024)

٣. التوأم النظامي : (System Twin)

يُستخدم هذا النوع لإنشاء نسخ رقمية على مستوى النظام الكامل، مما يتيح للمؤسسات تحليل الأصول كوحدات مترابطة داخل نظام متكامل. وتساعد هندسة التوأم الافتراضي لهذا النوع في اختبار تكوينات مختلفة للنظام بهدف الوصول إلى أقصى كفاءة ممكنة أو اكتشاف فرص جديدة لزيادة الأرباح. (Podmurnyi,2022)

٤. توأم العمليات : (Process Twin)

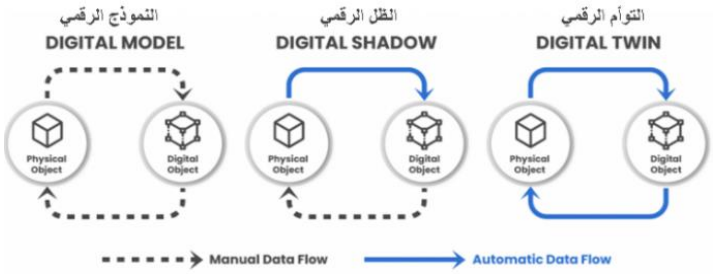
يشير مصطلح "توأم العمليات" إلى تمثيل رقمي لأنظمة مترابطة على شكل شبكة. وتُستخدم هذه النسخة الافتراضية لتقييم مدى تزامن تلك الأنظمة ومدى فاعليتها في العمل كوحدة واحدة.

يُتيح هذا النوع من التوأم الرقمي رؤى شاملة ومعمّقة لعمليات المؤسسة وسير العمل الداخلي، مما يُساعد في تحسين الخدمات والمنتجات. (IBM, 2021).

مستويات التوائم الرقمية :

تتميز مستويات التوائم الرقمية استنادًا إلى درجة تطور العلاقة بين النموذج الرقمي والواقع الفيزيائي، أي إلى أي مدى يتم تبادل البيانات بين النموذج الرقمي والفيزيائي كما وضح شكل رقم (٢).

وبناءً على ذلك، يمكن تصنيف النماذج إلى ثلاثة أنواع رئيسية :



الشكل رقم (٢) يوضح ثلاثة مستويات التوائم الرقمية
Source: Andrade, A. (2024). The 4 Levels of the Digital Twin Technology. [online] Vidya Technology. Available at: https://vidyatec.com/blog/the-4-levels-of-the-digital-twin-technology/ [Accessed 4 Mar. 2025].

١. النموذج الرقمي : (Digital Model)

هذا النوع هو أبسط شكل من الأشكال الرقمية، ، لا يتم تبادل البيانات بين الأصل الفيزيائي و النموذج الرقمي بشكل تلقائي. يتم إنشاؤه يدويًا عبر برامج النمذجة مثل AutoCAD ، Revitأو SketchUp ، دون وجود اتصال مباشر بالواقع المادي. أي أن أي تغيير يحدث في الأصل الواقعي لا ينعكس تلقائيًا على النموذج الرقمي، والعكس

صحيح. يُستخدم عادة في التصميم المبدئي أو التوثيق فقط. (Fuller et al., 2020, pp.2)

٢. الظل الرقمي : (Digital Shadow)

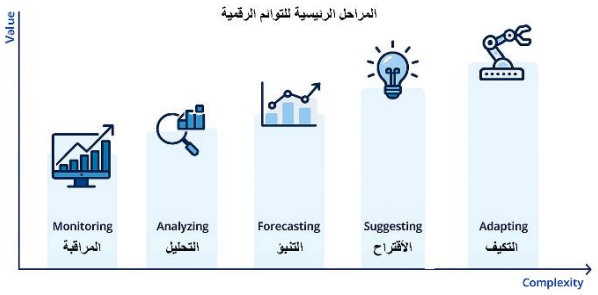
يختلف هذا النموذج عن النموذج الرقمي في أنه مرتبط باتجاه واحد من الواقع الفيزيائي إلى العالم الرقمي. وبذلك، فإن التغيرات التي تطرأ على العنصر الواقعي تنعكس على التمثيل الرقمي، لكن التغيرات في النموذج الرقمي لا تؤثر على الأصل الفيزيائي. فهو يحتوي على بيانات حية (مثل درجة الحرارة أو استهلاك الطاقة)، من خلاله يمكن مراقبة درجات الحرارة، عدد الأشخاص في الغرفة، جودة الهواء... لكن لا يمكن إرسال أوامر لتغيير الإضاءة أو التهوية من النموذج الرقمي.

٣. التوأم الرقمي : (Digital Twin)

يمثل هذا النموذج هو أعلى مستوى تكامل بين العالمين الرقمي والمادي. حيث يوجد تدفق البيانات بين العنصر الفيزيائي والتوأم الرقمي ، ويُعد هذا التفاعل المتبادل والمستمر هو ما يُميز التوأم الرقمي الحقيقي عن الأنواع الأخرى. وبناء علي ذلك، فيمكنه التنبؤ بسلوك النظام، محاكاة السيناريوهات، والتحكم بالواقع، ويُستخدم في التحسين المستمر والتشغيل الذكي. علي سبيل المثال يمكن ضبط الإضاءة والتكييف في الفراغ الداخلي للمباني في الزمن الحقيقي بناءً على بيانات الاستخدام والتحليل من التوأم الرقمي. (Grieves and Vickers, 2016, pp. 93)

المراحل الرئيسية للتوائم الرقمية:

يُعد التوأم الرقمي أداة حيوية ومتقدمة تقوم على تفسير وتحليل البيانات المجمعة من الحساسات وأجهزة الاستشعار المتوزعة في البيئة الفيزيائية، مما يمكنه من تتبع الأداء والوظائف في الزمن الحقيقي و في شكل رقم (٣) يوضح المراحل الرئيسية الخمسة للتوأم الرقمي.



الشكل رقم (٣) يوضح المراحل الرئيسية للتوائم الرقمية.
Source: Podmurnyi, S. (2022). Digital Twin Development Benefits and Costs - Visartech Blog. [online] Visartech. Available at: https://www.visartech.com/blog/digital-twin-solution-development-guide [Accessed 3 Mar. 2025].

١. المراقبة: (Monitoring)

في المرحلة الأولى، يقوم التوأم الرقمي بعملية مراقبة مستمرة ودقيقة للعناصر المادية والبيئية داخل الفضاءات الداخلية، وذلك من خلال البيانات التي توفرها الحساسات المثبتة في المكان. وتشمل هذه البيانات درجات الحرارة، مستويات الإضاءة، معدلات الرطوبة، حركة الأشخاص، وتوزيع الأثاث. إن التحديث اللحظي لهذه المعلومات يسمح للمصممين والمستخدمين بفهم الأداء الفعلي للمساحة، واتخاذ قرارات تصميمية فورية عند الحاجة.

٢. التحليل: (Analyzing)

استنادًا إلى البيانات المجمعة، يستخدم التوأم الرقمي تقنيات التحليل الذكي وخوارزميات التعلم الآلي لاكتشاف الأنماط الخفية في كيفية استخدام المساحات الداخلية. على سبيل المثال، يمكنه تحليل تكرار استخدام مناطق معينة في المراكز التجارية ، وتحديد أوقات الذروة في الاستخدام. يسهم هذا التحليل في فهم تفاعل المستخدم مع البيئة المصممة، وتحديد نقاط القوة والضعف في التخطيط أو التأثيث، مما يعزز عملية اتخاذ القرار التصميمي على أسس موضوعية. (محمد، ٢٠٢٤، ص.٦)

٣. التنبؤ: (Forecasting)

من خلال التحليل المتقدم للبيانات، يصبح التوأم الرقمي قادرًا على التنبؤ بسلوك المستقبل القريب للبيئة الداخلية، مثل توقع زيادة الحمل الحراري في غرفة معينة بسبب موقعها أو سلوك المستخدمين فيها. في هذا الإطار، يمكن للتوأم الرقمي أن يُستخدم لتخطيط توزيع الإضاءة أو التهوية وفقًا لتوقعات استخدام الفضاء، مما يُمكّن المصمم من تعديل التصميمات مسبقًا بما يتناسب مع الاستخدام المتوقع ويُقلل من الهدر ويُعزز الراحة.

٤. الاقتراح: (Suggesting)

يُتيح التوأم الرقمي تنفيذ سيناريوهات "ماذا لو؟" مما يساعد في اختبار تأثير قرارات تصميمية مختلفة دون الحاجة لتنفيذها فعليًا. فعلى سبيل المثال، يمكن تقييم تأثير تغيير نوع الإضاءة، أو إعادة توزيع الأثاث على جودة التهوية أو الإضاءة الطبيعية داخل الغرفة. من خلال هذه المقترحات المستندة إلى البيانات، يتمكن المصمم من اختيار الحل الأمثل الذي يُحقق توازنًا بين الوظيفة والجمال والراحة، بناءً على معايير أداء قابلة للقياس.

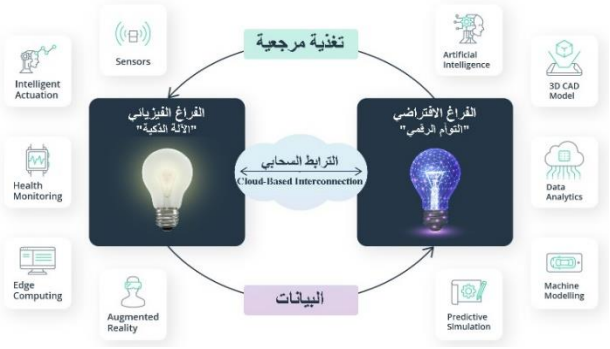
٥. التكيف: (Adapting)

يتميز التوأم الرقمي بقدرته على التكيّف مع المتغيرات، مما يجعله مناسبًا للبيئات الداخلية الديناميكية والمتغيرة باستمرار. يمكن للتوأم الرقمي في التصميم الداخلي أن يتفاعل تلقائيًا مع المتغيرات البيئية أو السلوكية، مثل خفض الإضاءة تلقائيًا استجابةً للضوء الطبيعي، أو تغيير توزيع التهوية وفقًا لكثافة التواجد البشري. هذه القدرة على

التكيف تُعتبر أحد أبرز مظاهر التصميم الذكي والمستدام في ظل التحولات الرقمية الحديثة.

التقنيات الرئيسية للتوأم الرقمي :

إن التوائم الرقمية ليست مجرد تكنولوجيا رقمية مستقله ، بل يعتمد على تكامل مجموعة من التقنيات المتقدمة التي تعمل بشكل تكاملي. يمكن تشبيه ذلك بتكوين فريق من التكنولوجيات المختلفة، يتبادل أعضاؤه البيانات والمعلومات باستمرار، كما موضح في شكل رقم (٤)، مما يسمح باتخاذ قرارات مبنية على معطيات واقعية ودقيقة. فيما يلي أبرز تلك التقنيات:



شكل رقم (٤) يوضح التقنيات الرئيسية للتوأم الرقمي.
Source: Intellias. (n.d.). Creating Digital Replicas Using IoT: How Digital Twin Technology Works in Practice. [online] Available at: https://intellias.com/creating-digital-replicas-using-iot-how-digital-twin-technology-works-in-practice [Accessed 3 Mar. 2025].

١. إنترنت الأشياء : (Internet of Things - IoT)

يُعد إنترنت الأشياء (IoT) العمود الفقري لجمع البيانات في التوأم الرقمي، حيث يتم تثبيت حساسات وأجهزة استشعار في المساحات الداخلية لجمع معلومات حية حول الظروف البيئية مثل درجة الحرارة، الإضاءة، وجودة الهواء، وقادرًا على مراقبة الحالة التشغيلية للمباني أو الأجهزة أو أنظمة المدينة الذكية .تُستخدم هذه البيانات في التوأم الرقمي لإنشاء نموذج دقيق للمساحة، مما يسمح للمصممين بمحاكاة تأثير التغييرات التصميمية قبل تنفيذها فعليًا، وبالتالي تحسين جودة وفعالية التصميمات الداخلية. (Arkiste, 2024)

٢. البنية التحتية السحابية: (Cloud Infrastructure Development)

تُعد البنية التحتية السحابية أحد المكونات المحورية في دعم نظم التوأم الرقمي، حيث توفر بيئة مرنة وآمنة لتخزين ومعالجة كميات ضخمة من البيانات التي يتم جمعها عبر الحساسات والمستشعرات المرتبطة بالكيان الفيزيائي. وتُوظف شركات تطوير التوائم الرقمية تقنيات الحوسبة السحابية لتمكين الوصول الفوري إلى المعلومات والبيانات من أي موقع جغرافي، مما يُعزز من إمكانات التفاعل اللحظي مع النموذج الافتراضي عبر الشبكات الرقمي. (Podmurnyi,2022)

٣. الذكاء الاصطناعي :(Artificial Intelligence - AI)

يشكل الذكاء الاصطناعي المحرك الأساسي لتمكين التوأم الرقمي من الانتقال من مجرد نموذج رقمي إلى نظام تحليلي ذكي وتنبؤي، حيث يضفي "الوعي الذاتي" على التوأم الرقمي، مما يعزز من قدرته على اتخاذ قرارات مبنية على البيانات. من خلال تحليل البيانات الضخمة المستمدة من البيئات الداخلية، مما يمكّن من تقديم مقترحات تصميمية مستندة إلى البيانات، واستخراج أنماط سلوكية، والتنبؤ بالأعطال، واقتراح تحسينات التصميم، على سبيل المثال، يمكن استخدام الذكاء الاصطناعي لتحليل تفضيلات المستخدمين وسلوكهم داخل المساحات، مما يساعد في تخصيص التصميمات لتلبية احتياجاتهم بشكل أكثر دقة .هذا التكامل يؤدي إلى تحسين تجربة المستخدم وزيادة كفاءة استخدام المساحات الداخلية. (محمد،٢٠٢٤، ص.7)

٤. تعلم الآلة : (Machine Learning - ML)

يمثل تعلم الآلة الذراع التحليلي الأكثر تقدمًا في النظام الرقمي، حيث يمكن من خلاله تعليم التوأم الرقمي كيفية التعلم من التجربة السابقة . عبر خوارزميات تعلم الآلة ، يمكن للتوأم الرقمي تحسين توقعاته بمرور الوقت، وتكييف سلوكه استنادًا إلى البيانات التاريخية والتفاعلات المتكررة. وفي مجال العمارة، مثلًا، يمكن لتوأم رقمي تعلم الأنماط السلوكية لمستخدمي المبنى وتحسين انظمة التهوية بناءً على الاستخدام الفعلي. (Fuller et al., 2020,pp.9)

٥. النمذجة ثلاثية الأبعاد : (3D Modeling)

تُعد النمذجة ثلاثية الأبعاد (3D Modeling) الأساس الذي يقوم عليه التوأم الرقمي، حيث إنها تُوفّر البنية البصرية التي يتم بناء كافة التحليلات والوظائف الأخرى عليها. وفي مجال العمارة والتصميم الداخلي، من خلال برامج مثل Revit، Rhino، SketchUp، أو ArchiCAD، يتم إنشاء نموذج رقمي واقعي يمثل الشكل الهندسي والتفاصيل الدقيقة للكيان المادي. بما يشمل الجدران، الأثاث، الإضاءة، والمواد المستخدمة، مما يسمح بإنشاء نسخة افتراضية دقيقة للمساحة الحقيقية. تُعتبر هذه النماذج أساسًا للتكامل مع الواقع الافتراضي(VR) ، الواقع المعزز(AR) ، والذكاء الاصطناعي (AI)، إذ تمكّن هذه التقنيات من التفاعل مع البيئة الرقمية بطريقة مرئية وتفاعلية. (Boje et al., 2020, pp.5)

٦. الواقع الافتراضي : (Virtual Reality - VR)

يسمح الواقع الافتراضي بعرض التوأم الرقمي في بيئة محاكاة ثلاثية الأبعاد، حيث يحوّل التوأم الرقمي من مجرد نموذج على الشاشة إلى تجربة غامرة ، تتيح للمستخدمين التفاعل معه وكأنهم داخل النموذج نفسه. وهذا مفيد في مراحل التصميم الداخلي أو المعماري، حيث يمكن استكشاف المساحات المستقبلية، اختبار توزيع الأثاث، والتفاعل مع العناصر المختلفة قبل التنفيذ.

٧. الواقع المعزز : (Augmented Reality - AR)

تسمح الواقع المعزز بإسقاط عناصر التوأم الرقمي على الواقع الحقيقي، يُتيح الواقع المعزز (AR) عرض العناصر الرقمية فوق البيئة الحقيقية، مما يسمح للمصممين والعملاء برؤية التعديلات والتحديثات التصميمية في الوقت الحقيقي داخل المساحة الفعلية .هذا يُسهم في تحسين عملية اتخاذ القرار وزيادة دقة التنفيذ. في مجالات العمارة والتصميم الداخلي، يمكن للمستخدمين استعراض المكونات الرقمية مباشرة فوق المساحات الواقعية، ما يساعد في فهم التعديلات، التنقل داخل الفراغات، أو إجراء صيانة ذكية للمباني.

٨. الميتافيرس : (Metaverse)

يمثل الميتافيرس امتدادًا افتراضيًا للعالم الواقعي، ويوفر بيئة رقمية ثلاثية الأبعاد يعيش فيها الأفراد ويتفاعلون من خلال شخصياتهم الافتراضية. وعند دمج التوأم الرقمي مع الميتافيرس، يمكن خلق نسخ رقمية تفاعلية من المدن والمباني والأحياء، يتم التحكم بها وتحليلها والتفاعل معها من أي مكان في العالم. مثلًا، يمكن لمستثمر أن يتفاعل مع نموذج حي لمجمع سكني ضمن بيئة الميتافيرس، ويختبر تجربة السكان داخله قبل الاستثمار. هذا يفتح آفاقًا جديدة للتصميم التشاركي عن بُعد، حيث يمكن للمصممين والعملاء التفاعل مع التصميمات في بيئة افتراضية مشتركة، مما يُعزز من كفاءة وفعالية عملية التصميم. (Sai et al., 2024, pp.9)

تطبيقات التوأم الرقمي في مختلف المجالات: (Applications of Digital Twins)

يُعد التوأم الرقمي تحولًا جذريًا في مختلف القطاعات، من خلال دمج البيئات الفيزيائية والرقمية ضمن إطار تفاعلي متكامل. وتُبرز الأمثلة التالية مدى تنوع تطبيقات التوأم الرقمي وأثره الواسع في تحسين الكفاءة، والابتكار، والتفاعل الذكي مع البيانات عبر مجالات مختلفة:

١. مجال الصناعة:

نظرًا لأن التوائم الرقمية تُصمم لتعكس دورة حياة المنتج بالكامل، فقد أصبحت منتشرة في جميع مراحل التصنيع، حيث تُستخدم لتوجيه المنتج من التصميم الأولي وحتى المنتج النهائي، مع تضمين كل خطوة من خطوات التصنيع. حيث يسهم في تحسين كفاءة أرضية الإنتاج، وإجراء الصيانة التنبؤية، وتعزيز التصميم التوليدي، والتدريب عبر الواقع الافتراضي. (Shahzad et al., 2022, pp.10)

2. مجالات توليد الطاقة:

في البيئات المفتوحة التي تنتشر فيها مزارع توربينات الرياح، يُوظَّف التوأم الرقمي كأداة تحليلية متقدمة لتقييم الأداء البيئي والتشغيلي لهذه الأنظمة. وتُسهم هذه النماذج الرقمية في تعزيز كفاءة استغلال موارد الطاقة المتجددة من خلال تحليل بيانات الرياح، وحالة المعدات، وجدولة الصيانة، والتنبؤ بالأعطال المحتملة، مما يُسهم في تحسين الأداء العام وتقليل التكاليف التشغيلية. (IBM, 2021).

3. مجالات العمارة والبناء:

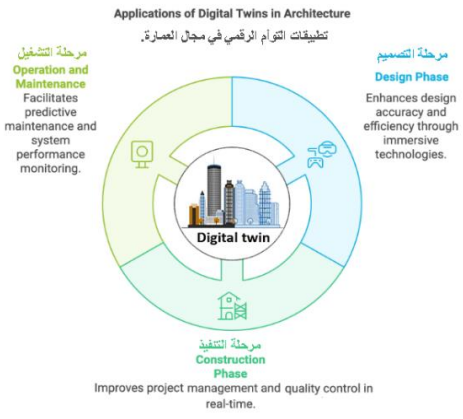
في ميدان العمارة و البناء، يُوظَّف التوأم الرقمي لتحسين أداء المباني المتوقع قبل تنفيذها على أرض الواقع، من خلال محاكاة بيئية وتشغيلية دقيقة. كما يُستخدم بعد اكتمال البناء في عمليات المراقبة الذكية، والكشف المبكر عن الأعطال، وإدارة كفاءة الطاقة. ويُعد مشروع "مركز سوتشو" مثالًا بارزًا على تبني هذه التقنية، حيث ساهم التوأم الرقمي في تحقيق مستويات عالية من الاستدامة والكفاءة البصرية والبيئية للمبنى. (Farhadi, 2024)

4. التعليم: بيئات التعلم الافتراضية

أحدثت التوائم الرقمية تحولًا في ميدان التعليم من خلال إنشاء بيئات تعليمية افتراضية تفاعلية. وتُتيح هذه البيئات للطلاب محاكاة الظواهر المعقدة، والمشاركة في تجارب غنية تُعزز الفهم العميق والتعلّم الذاتي. (ندا وداود, ٢٠٢٢, ص.٩)

تطبيقات التوأم الرقمي في مجال التصميم الداخلي و العمارة:

يمثّل التوأم الرقمي نقلة نوعية في طرق إدارة البيئة المبنية، حيث يوفّر إطارًا متكاملاً يُسهم في تحسين الكفاءة التشغيلية وتعزيز الاستدامة عبر مختلف مراحل دورة حياة المنشآت. ومن خلال قدرته على دمج البيانات اللحظية بالنماذج التصميمية والتحليلية، يمكّن التوأم الرقمي المعماريين والمهندسين ومديري المشاريع من اتخاذ قرارات دقيقة ومستنيرة ترتكز إلى محاكاة الواقع. وتتجلى فوائده بشكل واضح في ثلاث مراحل رئيسية كما موضح في شكل رقم (٥) وهي: التصميم، والتنفيذ، والتشغيل. (Çavdar and Karabak, 2024, pp. 49)



شكل رقم (٥) يوضح تطبيقات التوأم الرقمي في مجال التصميم الداخلي و العمارة.
Source: Arkiste. (2024). The Impact of Digital Twins in Architecture and Design: A Comprehensive Guide for Architects. [online] Available at: https://arkiste.com/blog/the-impact-of-digital-twins-in-architecture-and-design-a-comprehensive-guide-for-architects [Accessed 3 Mar. 2025].

١. مرحلة التصميم :

في مرحلة التصميم، يُعد التوأم الرقمي أداة استراتيجية تدعم التفكير الاستباقي والتصميم المستند إلى البيانات .إذ يُتيح محاكاة سيناريوهات تصميمية متنوعة، وتحليل أدائها ضمن بيئات افتراضية تفاعلية تحاكي الظروف الواقعية. ومن خلال هذه الإمكانية، يتمكّن المصممون من اختبار تأثير القرارات المتعلقة باختيار المواد، توزيع الفضاءات، وأنماط الإنشاء، ما يؤدي بدوره إلى تحسين جودة التصاميم وتقليل احتمالية الأخطاء أثناء التنفيذ .كما يُعزز ذلك من قابلية التصميم للتنفيذ الفعلي بكفاءة أعلى.

٢. مرحلة التنفيذ :

عند الانتقال إلى مرحلة التنفيذ، يبرز التوأم الرقمي كأداة فعّالة لدعم إدارة عمليات الإنشاء وتحقيق التكامل بين الفرق الهندسية .فمن خلال الرصد اللحظي والتحديث المستمر للمعلومات، يُمكن اكتشاف التحديات المحتملة في وقت مبكر، سواء على صعيد الجدولة الزمنية أو في سلاسل التوريد. وتُتيح هذه الرؤية الشمولية اتخاذ إجراءات تصحيحية استباقية، تساهم في تقليل التأخيرات، والحد من الهدر، وتحقيق تنسيق أفضل بين الجهات المختلفة المعنية بعملية البناء.

٣. مرحلة التشغيل :

أما في مرحلة التشغيل، فإن التوأم الرقمي يتحوّل إلى منظومة ديناميكية لرصد الأداء الفعلي للمنشأة، حيث يُمكّن من تحليل الأنظمة الميكانيكية والكهربائية والبيئية بشكل مستمر .ومن خلال هذا التتبع الدقيق، يمكن تعزيز كفاءة استخدام الموارد، وتخفيض التكاليف التشغيلية، وتقليل البصمة الكربونية للمبنى. كما يُسهم التوأم الرقمي في تنفيذ الصيانة الوقائية بشكل ذكي، عبر التنبؤ بالأعطال المحتملة قبل وقوعها، مما يُقلل من حالات التوقف غير المخطط لها ويطيل عمر المنشآت.(Akila, 2023) .

آلية عمل التوأم الرقمي في التصميم الداخلي والعمارة:

يعتمد التوأم الرقمي في مجال التصميم الداخلي و العمارة على إنشاء نموذج رقمي يمثل الواقع المادي للمباني والمنشآت بدقة عالية، . ويتيح هذا النموذج الرقمي التفاعلي إمكانية تحليل الأداء المعماري، دعم اتخاذ القرار، وتحسين إدارة دورة حياة المبنى. وتعتمد بنية التوأم الرقمي على سلسلة من المراحل المترابطة كما في شكل رقم (٦)، يمكن توضيح هذه المراحل على النحو الآتي:

١. جمع البيانات : (Data Collection)

تعد عملية جمع البيانات الخطوة الأولى في تكوين التوأم الرقمي، حيث يتم استخراج المعلومات من مصادر متعددة تشمل المستشعرات الذكية (Sensors) ، وأجهزة إنترنت الأشياء (IoT) ، والسجلات التاريخية للمباني. توفّر هذه البيانات تمثيلاً دقيقاً للظروف الواقعية المحيطة بالمبنى، مثل الرطوبة، ودرجة الحرارة، وسلامة الهيكل، واستهلاك الطاقة، ما يضمن تكامل النماذج الرقمية مع الواقع الفعلي.

٢. النمذجة الرقمية : (Digital Modeling)

يتم استخدام البيانات المُجمّعة لتشكيل نموذج ثلاثي الأبعاد (3D) ديناميكي للمبنى، بحيث يُحدَّث النموذج بشكل مستمر عند إدخال بيانات جديدة. تتيح البرمجيات والمنصات المتقدمة المتخصصة في نمذجة المعلومات مثل (BIM) إنشاء تمثيلات دقيقة وعالية الواقعية للهياكل، ما يعزز من فاعلية التصميم وتحليل الأداء.

٣. التزامن في الوقت الحقيقي : (Real-time Synchronization)

يُعد التزامن الفوري من الخصائص الجوهرية في بنية التوأم الرقمي، حيث تنعكس التغييرات التي تطرأ على المبنى الفعلي بشكل مباشر في النموذج الرقمي. فعلى سبيل المثال، عند تركيب نظام جديد للتهواء، يتم رصد التغييرات فوراً داخل النموذج وتحديث محاكاته وسيناريوهاته التشغيلية.

٤. المحاكاة والتحليل : (Simulation and Analysis)

يُمكن من خلال النموذج الرقمي إجراء محاكاة متعددة للظروف البيئية والتشغيلية المختلفة التي قد تؤثر على المبنى. تشمل هذه المحاكاة اختبارات الإجهاد، وتحليل استهلاك الطاقة، وتقييم الأثر البيئي، مما يساعد على تحديد المخاطر المحتملة وتحسين أداء التصميم والعمليات.

٥. حلقة التغذية الراجعة : (Feedback Loop)

تُشكّل التغذية الراجعة حلقة مستمرة تُغذّى من البيانات الحيّة للمبنى الفعلي، ما يسمح بإجراء تحسينات دورية مستندة إلى الأداء الواقعي، وتحديث النماذج الرقمية بصورة ديناميكية على مدار دورة حياة المنشأة. (Ankitha, 2024)

شكل رقم (٦) يوضح آلية عمل التوأم الرقمي في التصميم الداخلي والعمارة.
Source: Ankitha. (2024). Digital Twin Architecture: Pros & Cons Explained. [online] Toobler. Available at: https://www.toobler.com/blog/digital-twin-architecture-pros-cons [Accessed 7 Mar. 2025].

فوائد استخدام التوأم الرقمي في مجال التصميم الداخلي:

يمثل التوأم الرقمي (Digital Twin) أحد أبرز الابتكارات التقنية التي أحدثت تحولًا نوعيًا في مجال التصميم الداخلي، حيث يوفّر بيئة رقمية تفاعلية تُحاكي الواقع المادي بدقة، مما يتيح للمصممين إمكانية تحليل الأداء الفعلي للمساحات وتوقع احتياجاتها التشغيلية بشكل استباقي. وتكمن أبرز فوائد استخدام التوأم الرقمي في هذا المجال في الآتي:

١. تحسين جودة التصميم واتخاذ القرار:

يُوفر التوأم الرقمي منصة تحليلية تساعد المصمم على اتخاذ قرارات مدروسة ترتكز إلى بيانات واقعية، مثل أنماط الحركة، وتوزيع الإضاءة، وتهوية الفراغات. هذا يسهم في تحسين الأداء الوظيفي والجمالي للفراغات الداخلية، وضمان توافقها مع سلوك المستخدمين واحتياجاتهم. (Farhadi, 2024)

٢. المحاكاة الواقعية والتجربة الافتراضية للفراغات:

يتيح التوأم الرقمي إمكانية محاكاة الفضاءات الداخلية قبل تنفيذها فعليًا، ما يُمكّن من اختبار تصميمات الأثاث، المواد، الإضاءة، والألوان ضمن بيئة افتراضية واقعية. هذا يُساعد في تقليل الأخطاء، وتحسين تجربة المستخدم، وتوفير الوقت والموارد في المراحل اللاحقة.

٣. تعزيز كفاءة استهلاك الطاقة والموارد:

من خلال ربط التوأم الرقمي بأنظمة المبنى الذكية، يمكن تحليل استخدام الطاقة داخل الفراغات الداخلية وتعديل الأنظمة وفقًا لأنماط الاستخدام الفعلي، مما يساهم في تحقيق الكفاءة التشغيلية وتقليل الهدر في الموارد.

٤. الصيانة التنبؤية وإدارة المرافق:

يُمكّن التوأم الرقمي من مراقبة أداء الأنظمة الداخلية مثل الإضاءة والتكييف والتهوية، والتنبؤ بالأعطال قبل وقوعها، ما يسمح بتنفيذ صيانة استباقية تُقلّل التكاليف وتُحافظ على جودة البيئة الداخلية وراحة المستخدمين.

٥. توفير منصة للتعاون بين التخصصات:

يساهم التوأم الرقمي في تسهيل التواصل والتنسيق بين المهندسين المعماريين، ومهندسي الأنظمة، من خلال نموذج رقمي موحد يعكس كل تفاصيل التصميم الداخلي، مما يعزز من تكامل العمل وتقليل التضارب في مراحل التنفيذ.

٦. دعم الاستدامة والتصميم البيئي:

من خلال تحليل الأداء البيئي للمواد والعناصر المستخدمة في التصميم، يمكن اختيار حلول أكثر استدامة، وتقليل البصمة الكربونية للفراغات الداخلية، بما ينسجم مع التوجهات الحديثة نحو المباني الخضراء والتصميم البيئي.

٧. تعزيز تجربة المستخدم:

يُوفر التوأم الرقمي وسيلة متقدمة لتحليل تفاعل المستخدمين مع البيئات الداخلية من خلال تتبع أنماط السلوك، واستخدام الفراغات، ومستويات الراحة. وبالاعتماد على هذه البيانات الدقيقة، يمكن للمصممين تطوير حلول تصميمية مخصصة ومرنة تستجيب بشكل ديناميكي لاحتياجات المستخدمين المتنوعة، سواء على المستوى الفردي أو الجماعي. ويسهم ذلك في تحسين جودة التجربة المكانية، وتعزيز الإحساس بالراحة، والارتقاء بالوظائف العملية والجمالية للبيئة الداخلية.(Subramanian, 2025)

التحديات والقيود في استخدام التوأم الرقمي في التصميم الداخلي:

على الرغم من الإمكانات الكبيرة التي توفرها تقنية التوأم الرقمي في تعزيز جودة التصميم الداخلي وتحقيق بيئات أكثر تكيفًا واستدامة، إلا أن تطبيقها العملي لا يخلو من تحديات تقنية وتنظيمية تتطلب معالجة دقيقة ومدروسة لضمان فاعليتها:

١. تدفق البيانات وصعوبة إدارتها:

تعتمد نظم التوأم الرقمي في التصميم الداخلي على جمع كميات ضخمة من البيانات المتعلقة بسلوك المستخدمين، وأنماط الحركة داخل الفراغات، والإضاءة، وجودة الهواء. هذا التدفق الهائل من المعلومات قد يُعقّد عمليات التحليل والتفسير، ما يستدعي أدوات متقدمة قادرة على تحويل البيانات إلى رؤية تصميمية ذات معنى وقابلة للتطبيق.

٢. التكاليف الأولية المرتفعة:

يتطلب بناء توأم رقمي متكامل للفراغات الداخلية تجهيزات مكلفة تشمل مستشعرات ذكية، وبرمجيات تحليل بيانات، وبيئة رقمية متزامنة. ويُشكّل هذا العبء المالي تحديًا خاصًا علي الشركات الصغيرة والمتوسطة. (Javaid, Haleem and Suman, 2023, pp.85)

٣. نقص الكفاءات:

يستلزم تطوير وتشغيل التوأم الرقمي في التصميم الداخلي توافر كفاءات متقدمة في مجالات مثل تحليل البيانات، والنمذجة الرقمية، والأمن السيبراني. مما يُحتّم على الشركات إما توظيف خبراء متخصصين أو استثمار الموارد في تدريب الموظفين.

٤. مخاطر الأمن السيبراني وحماية الخصوصية:

نظراً لاعتماد التوأم الرقمي على جمع وتبادل البيانات، فإنه عرضة للهجمات السيبرانية. لحماية هذه البيانات والأنظمة المرتبطة بها، تحتاج الشركات إلى استثمارات كبيرة في مجال الأمن السيبراني واستراتيجيات حماية محكمة للحفاظ على سلامة البيانات. (Sai et al., 2024, pp.12)

٥. محدودية قابلية التوسع:

مع تزايد حجم البيانات وتعقيد متطلبات التصميم، يصبح من الضروري أن تتمتع أنظمة التوأم الرقمي بالمرونة والتوسع الكافي لتلبية هذه الاحتياجات دون المساس بالأداء. عدم كفاءة النظام في التوسع قد يُضعف قدرته على محاكاة وتحديث نماذج التصميم باستمرار.

٦. مقاومة التغيير :

يُعد قطاع التصميم الداخلي بطبيعته قائمًا على الرؤية الإبداعية والخبرة الميدانية، ما يجعل بعض الممارسين مترددين في تبني الحلول الرقمية المتقدمة. وتُشكّل مقاومة التغيير، وقلة الوعي بجدوى التوأم الرقمي، عوائق أمام انتشاره على نطاق أوسع. ويتطلب تخطي هذه العقبة تنفيذ مبادرات توعوية ومشاريع تطبيقية تُظهر القيمة المضافة للتوأم الرقمي في رفع جودة التصميم وتحقيق الاستدامة.

نماذج تطبيقات التوأم الرقمي في التصميم الداخلي والعمارة:

شهدت مجالات العمارة والتصميم الداخلي خلال السنوات الأخيرة تطورًا ملحوظًا في تبني تقنيات التوأم الرقمي، حيث تم استخدامها في العديد من المشاريع الريادية حول العالم بهدف تحسين الأداء التشغيلي، تعزيز الكفاءة، وضمان الاستدامة. فيما يلي استعراض لعدد من الدراسات التطبيقية لمشاريع متميزة اعتمدت على هذه التقنية، والتي توضح الإمكانات الكبيرة التي توفرها في مجالات التصميم العمراني الحديث:

١. ناطحة السحاب "شارد"- لندن. The Shard, London

يُعد تشييد ناطحة سحاب في بيئة حضرية معقدة تحديًا هندسيًا ومعماريًا يتطلب توظيف أدوات رقمية متقدمة لضمان التناغم بين البنية التحتية القائمة ومتطلبات المشروع الجديد. وقد تجلّى ذلك بوضوح في مشروع ناطحة السحاب "شارد (The Shard) "في لندن، والتي يبلغ ارتفاعها ٣١٠ أمتار كما موضح في شكل رقم (٧)، حيث صممها المعماري الشهير رينزو بيانو عام ٢٠٠٠، وتم استكمال بنائها في عام ٢٠١٢.

منذ المراحل الأولى لتخطيط المشروع، تم اعتماد تقنيات نمذجة معلومات البناء (BIM) والتوأم الرقمي (Digital Twin) كأدوات أساسية في دعم عمليات التصميم والبناء والتشغيل. وقد ساهمت هذه التقنيات بشكل فعّال في تحسين جودة التنفيذ، وتعزيز الكفاءة التشغيلية للمبنى، وذلك عبر سلسلة من المراحل المتكاملة:

شكل رقم (٧) يوضح ناطحة السحاب "شارد"، لندن .
Source: Ankitha. (2024). Digital Twin in Construction: Best Practices & Examples. [online] Toobler. Available at: https://www.toobler.com/blog/digital-twin-in-construction [Accessed 6 Mar. 2025].

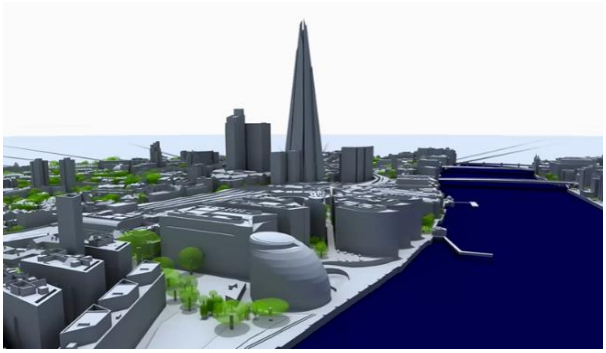
١. مرحلة التصميم والتصور:

في هذه المرحلة، تم تطوير نماذج ثلاثية الأبعاد دقيقة تمثل البيئة الحضرية المحيطة بموقع المشروع كما يوضح شكل رقم (٨)، مما أتاح جمع معلومات تفصيلية حول البنية التحتية المحلية. وتم دمج هذه النماذج مع التصاميم المعمارية والهندسية للمبنى وأنظمته الميكانيكية، ما مكّن من إنشاء توأم رقمي شامل يُحاكي بيئة المشروع قبل التنفيذ الفعلي. وقد أتاح هذا النهج تصورًا واقعيًا للمبنى داخل بيئته المستقبلية، الأمر الذي عزز من التنسيق بين الفرق المعنية وقلّل من الفجوات التواصلية خلال مراحل التصميم.

شكل رقم (٨) يوضح نموذج ثلاثية الأبعاد دقيقة تمثل البيئة الحضرية المحيطة بموقع ناطحة السحاب "شارد"، لندن.
Source: Missions, H. (2024). BIM & Digital Twins: 3 Real-World Examples. [online] Hammer Missions. Available at: https://www.hammermissions.com/post/bim-digital-twins-3-real-world-examples [Accessed 5 Mar. 2025].

٢. تخطيط البناء وإدارة اللوجستيات:

أُستخدمت تقنيات الـ (BIM) والتوأم الرقمي في وضع خطة دقيقة للبناء، شملت ترتيب الأنشطة الإنشائية، وتوزيع الموارد، وتنسيق الجداول الزمنية لعمليات التوريد. وبفضل المحاكاة الافتراضية، تمكنت الفرق من تحسين تدفق العمل في الموقع، وضمان مستويات أعلى من السلامة، والتقليل من الأثر البيئي على المناطق المجاورة خلال فترة التنفيذ.



شكل رقم (٩) يوضح نموذج ثلاثية الأبعاد للمنشاء المعماري وعلاقه بالمباني المحيطة.

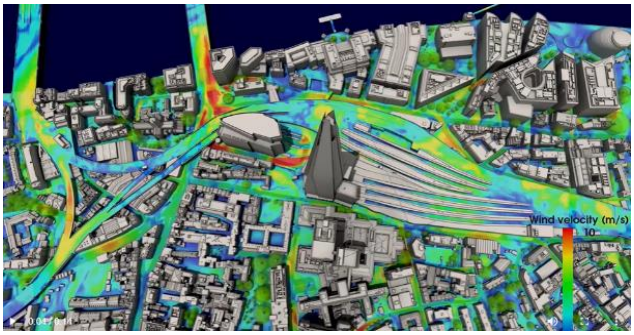
Source: Rics. (2022). How London's digital twin helps surveyors see the light. [online] Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS). Available at: https://ww3.rics.org/uk/en/modus/technology-and-data/harnessing-data/how-london-s-digital-twin-helps-surveyors-see-the-light.html [Accessed 8 Mar. 2025].

٣. اكتشاف التعارضات وحلّها:

أتاح التوأم الرقمي الكامل للمبنى إمكانية فحص النموذج الإنشائي وتحليل التداخلات المحتملة بين الأنظمة المختلفة، مثل العناصر الهيكلية، وأنظمة الميكانيكا والكهرباء والسباكة(MEP) ، والجوانب المعمارية. وقد أدى ذلك إلى الكشف المبكر عن التعارضات قبل ظهورها في الواقع، مما أسهم في تجنّب التأخيرات وتقليل التكاليف الناتجة عن أعمال إعادة التنفيذ.

٤. تعزيز التعاون والتنسيق بين الفرق:

شكّل التوأم الرقمي منصة موحدة جمعت مختلف أطراف المشروع من معماريين، ومهندسين، واستشاريين ضمن بيئة عمل رقمية مشتركة. كما موضح شكل رقم (١٠) تحليل التداخلات المحتملة بين الانظمة المختلفة. وقد ساعد هذا النهج التعاوني على تسهيل تدفق المعلومات، وتسريع عمليات اتخاذ القرار، وضمان اتساق التصميمات، مما ساهم في رفع جودة التنفيذ وتقليل الأخطاء الناتجة عن ضعف التنسيق.



شكل رقم (١٠) يوضح النموذج الإنشائي وتحليل التداخلات المحتملة بين الأنظمة المختلفة.

Source: Rics. (2022). How London's digital twin helps surveyors see the light. [online] Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS). Available at: https://ww3.rics.org/uk/en/modus/technology-and-data/harnessing-data/how-london-s-digital-twin-helps-surveyors-see-the-light.html [Accessed 8 Mar. 2025].

٥. مرحلة التشغيل وإدارة المرافق:

بعد اكتمال الإنشاء، استمر استخدام التوأم الرقمي كأداة فعالة في إدارة المنشأة. حيث وفر هذا النموذج الرقمي بيانات محدثة تتعلق بالحالة الهيكلية للمبنى، وأداء أنظمة (MEP)، واحتياجات الصيانة الدورية. وقد مكّن هذا النهج مديري المنشآت من اتخاذ قرارات مستنيرة تسهم في رفع كفاءة الطاقة، وتحسين أداء المرافق، وضمان بيئة صحية وآمنة لشاغلي المبنى. (Missions, 2024)

٢. متحف "المستقبل"- دبي. Museum of the Future, Dubai

يمثّل متحف المستقبل في دبي نموذجًا متقدّمًا لتكامل الابتكار الرقمي والهندسة المعمارية في قطاع البناء الحديث، ويُعد من أبرز الأمثلة على الاستخدام الفعّال لتقنيات نمذجة معلومات البناء (BIM) والتوأم الرقمي (Digital Twin) في بيئة حضرية متسارعة النمو.

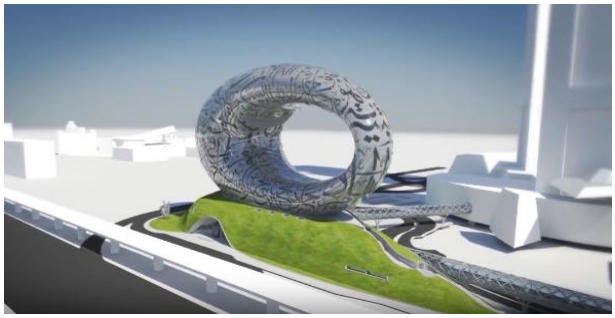
منذ المراحل الأولية للمشروع، تم تنفيذ جميع العمليات التصميمية من التصور المبدائي وحتى أعمال البناء – ضمن بيئة رقمية شاملة تعتمد على التوأم الرقمي. وقد مكّنت نماذج التوائم الرقمية من تمكين المعماريون والمصممين من التعاون الوثيق على مختلف عناصر المشروع، حيث عكس واقع المبنى بشكل ثلاثي الأبعاد، الأمر الذي عزز التكامل بين التصميم والتنفيذ.

تسبب الشكل الغير تقليدي للمبنى وتميزه بواجهة منحنية مغطاة بألواح فولاذية تحمل خطوطًا عربية في العديد من التحديات لفريق العمل كما موضح في شكل رقم (١١)، فقد واجه فريق الاستشارات الهندسية "بورو هابولد" تحديات تقنية بالغة التعقيد. حيث استعان الفريق بتقنيات النمذجة البارامترية من أجل تصور التفاصيل الدقيقة للهيكل الفولاذي المعقد، وضمان تكامل الألواح الخارجية دون إظهار الأجزاء الهيكلية (ما يُعرف بـ "عظام" المبنى)، بما يحافظ على جماليات التصميم ودقته.

شكل رقم (١١) يوضح متحف "المستقبل"- دبي.

Source: Buro Happold. (n.d.). Museum of the Future – Timings & Location | Plan Your Visit. [online] Available at: https://www.burohappold.com/projects/museum-of-the-future [Accessed 15 Mar. 2025].

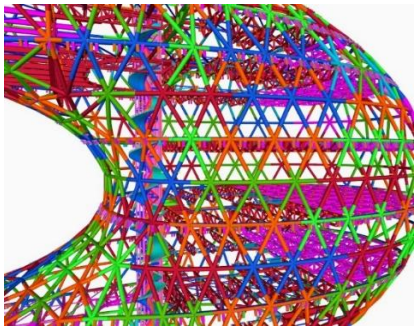
من جهة أخرى، قامة الشركة التنفيذية الرئيسي للمشروع، شركة BAM International، بتوسيع نطاق استخدام التوأم الرقمي من خلال تطوير نماذج ثلاثية الأبعاد تسهم في برمجة وتسلسل العمليات الإنشائية. ويوضح نماذج ثلاثية الأبعاد تمثل البيئة المحيطة بالموقع كما في شكل (١٢)، وقد مكّنهم هذا التوجّه من محاكاة كل خطوة من خطوات التنفيذ بدقة عالية، ما ساعد في تعزيز سلامة العمال في الموقع، وتحقيق الالتزام الصارم بالجداول الزمنية لكل مرحلة إنشائية.



شكل رقم (١٢) يوضح نموذج ثلاثية الأبعاد دقيقة تمثل البيئة ا المحيطة بموقع متحف "المستقبل"- دبي.
Source: Buro Happold. (n.d.). Museum of the Future – Timings & Location | Plan Your Visit. [online] Available at: https://www.burohappold.com/projects/museum-of-the-future [Accessed 15 Mar. 2025].

علاوة على ذلك، تم تطوير نماذج رقمية إضافية لدمج أنظمة الطاقة والميكانيكا الداخلية ضمن بيئة عمل موحّدة. كما يوضح التوأم الرقمي التفاصيل لإنشائية الدقيقة للهيكل الفولاذي المعقد الواضح في شكل رقم (١٣).

وفي هذا السياق، أوضح فريق "بورو هابولد" أنه تم تصميم نموذج رقمي ثلاثي الأبعاد خاص بالطاقة، أتاحت بيئته التفاعلية لأكثر من ١٢ تخصصًا هندسيًا العمل في الوقت الفعلي، ما أسفر عن اتخاذ ما يزيد عن ٥٠ قرارًا تصميميًا مستدامًا. وقد انعكست هذه القرارات في نتائج ملموسة، شملت خفض استهلاك المياه بنسبة ٤٥٪ وتوفير ما يقرب من ٢٥٪ من إجمالي استهلاك الطاقة. (Henriksen, 2023)

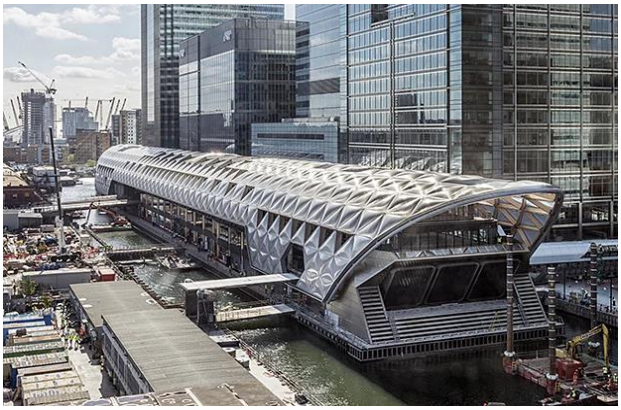


شكل رقم (١٣) يوضح التوأم الرقمي لمتحف "المستقبل" و التفاصيل لإنشائية الدقيقة للهيكل الفولاذي المعقد.
Source: ArchDaily. (n.d.). Overcoming Design Challenges with Technology: Museum of the Future in Dubai. [online] Available at: https://www.archdaily.com [Accessed 16 Mar. 2025].

أن الدور الذي لعبته تقنيات التوأم الرقمي لم يتوقف عند حدود التصميم والتنفيذ فحسب، بل امتد ليشمل مراحل تشغيل المبنى وإدارة مرافقه وصيانته على المدى الطويل، مما يعكس توجهًا مستقبليًا نحو اعتماد التوائم الرقمية كأداة استراتيجية في دورة حياة المباني الذكية والمستدامة. (Missions, 2024)

٣. مشروع كروسريل – لندن. Crossrail, London

يُعد مشروع كروسريل (Crossrail) المعروف حاليًا باسم إليزابيث لاين (Elizabeth Line) من أضخم وأعقد مشاريع البنية التحتية في المملكة المتحدة، حيث يمثل نموذجًا رياديًا في توظيف تقنيات التوأم الرقمي لإدارة مشاريع النقل الحضري المعقدة كما في شكل رقم (١٤). وقد تم دمج التوأم الرقمي ضمن منظومة المشروع بهدف مراقبة تقدم العمل في الوقت الفعلي، بالإضافة إلى التنبؤ بالمشكلات المحتملة قبل تحولها إلى عوائق تؤثر على الجدول الزمني أو الميزانية. (Ankitha , 2024)

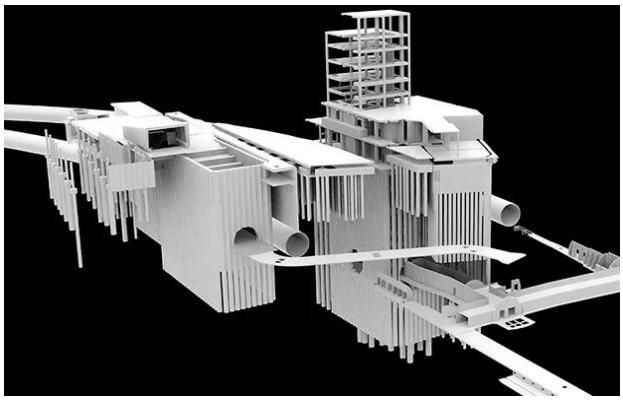


شكل رقم (١٤) يوضح مشروع كروسريل - لندن Crossrail, London.
Source: Ankitha. (2024). Digital Twin in Construction: Best Practices & Examples. [online] Toobler. Available at: https://www.toobler.com/blog/digital-twin-in-construction [Accessed 12 Mar. 2025].

من خلال استخدام نماذج رقمية تفصيلية للمسارات، والأنفاق، والمحطات تحت الأرض، استطاع فريق المشروع محاكاة عمليات البناء بدقة عالية، مما مكّن من اتخاذ قرارات مبنية على بيانات واقعية. وقد ساهم ذلك في تحسين تخصيص الموارد، وجدولة الأعمال الإنشائية، وتنسيق فرق العمل متعددة التخصصات بطريقة متكاملة. ولقد كانت البيئة التحتية المعقدة، التي تضم شبكة أنفاق ممتدة تحت العاصمة البريطانية، تتطلب أعلى درجات الدقة في التخطيط والتنفيذ. وهنا لعبت تكنولوجيا التوأم الرقمي دورًا حاسمًا في التنسيق بين مختلف التخصصات (الهندسة المدنية، والإنشائية، والكهروميكانيكية) كما موضح في شكل رقم (١٥)، ما ساعد في تقليل التعارضات وتحقيق تدفق سلس للأنشطة.

وبفضل اعتماد هذه التقنيات الرقمية المتقدمة، تم تحقيق تحسين ملحوظ في الكفاءة التشغيلية للمشروع، سواء من حيث التكلفة أو الوقت. كما ساعدت نماذج التوأم الرقمي في توفير تصور متكامل للبنية التحتية

المستقبلية، مما مهّد الطريق لإدارة ذكية ومستدامة لعمليات التشغيل والصيانة بعدتنفيذ المشروع. (Darya, 2023)



شكل رقم (١٥) يوضح التوأم الرقمي لمشروع كروسريل و دمج خطوط القطارات الجديدة في البنية التحتية القائمة.

Source: Ackerman, E. (2016). London's Crossrail Is a £21 Billion Test of Virtual Modeling. [online] IEEE Spectrum. Available at: https://spectrum.ieee.org/londons-crossrail-is-a-21-billion-test-of-virtual-modeling [Accessed 11 Mar. 2025].

المصطلحات العلمية:

١. مصطلح "النمذجة المعلوماتية للبناء" (Building Information Modeling - BIM):

يشير مصطلح (Building Information Modeling – BIM) إلى "نمذجة معلومات البناء"، وهو نهج متكامل لإدارة وتصميم مشاريع البناء، ويعتمد على إنشاء نموذج رقمي ثلاثي الأبعاد يحتوي على جميع البيانات والمعلومات المتعلقة بجميع عناصر المشروع طوال دورة حياته. يشمل هذا النموذج المعلومات التفصيلية عن الخصائص الفيزيائية، والكيميائية، والميكانيكية للمواد والمكونات، بالإضافة إلى الجوانب الزمنية (الجدولة)، والتكلفة، والصيانة والتشغيل. (Azhar, Khalfan and Maqsood, 2012, PP.16)

٢. مصطلح " MEP- Mechanical, Electrical And Plumbing"

يشير مصطلح (MEP- Mechanical, Electrical And Plumbing) الي هندسة الأنظمة الميكانيكية والكهربائية والصحية (MEP)، وهو علم تخطيط وتصميم وإدارة هذه الأنظمة المسؤولة عن توفير بيئة داخلية مريحة وقابلة للاستخدام في المباني. تشمل هذه الأنظمة: التكييف والتهوية والتدفئة (ME) ، الأنظمة الكهربائية بما في ذلك الطاقة والإضاءة وأنظمة التحكم، وأنظمة السباكة بما في ذلك إمدادات المياه والصرف الصحي ونظم مكافحة الحريق. ويُعد هذه النظام ضرورياً في جميع مراحل عمليات البناء، حيث يساهم في دعم اتخاذ القرار، وتقدير التكاليف، وإدارة التنفيذ، وتوثيق المشاريع، بالإضافة إلى إدارة وصيانة المباني. (Dugasa, Gutu, 2022, pp.1)

نتائج البحث:

١. أظهرت نتائج الدراسة أن التوأم الرقمي يُعد أداة مبتكرة وفعالة في تطوير التصميم الداخلي، من خلال توفير بيئة افتراضية تفاعلية تسمح بمحاكاة دقيقة للفراغات، وتحليل الأداء التصميمي قبل التنفيذ الفعلي.
٢. بينت الدراسة أن دمج التوأم الرقمي مع تقنيات الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء يسهم في تعزيز دقة التمثيل والتحليل، مما يتيح إمكانيات متقدمة في التنبؤ بالمشكلات التصميمية، واقتراح حلول بديلة بناءً على البيانات اللحظية والسلوكيات الفعلية للمستخدمين.
٣. أظهرت النتائج أن التوأم الرقمي يوفر بيئة تفاعلية تدعم المصممين ببيانات مرئية وتحليلية دقيقة، مما أدى إلى تحسين عملية اتخاذ القرار، وتقليل نسب الخطأ، وزيادة مرونة التعديلات أثناء المراحل المختلفة للتصميم.
٤. أثبتت التطبيقات العملية أن التوأم الرقمي يُمكن أن يدعم مفاهيم التصميم المستدام من خلال مراقبة استهلاك الطاقة، وتحليل الظروف البيئية الداخلية، مما يعزز الكفاءة التشغيلية للمباني.
٥. رغم الإمكانيات الواسعة للتوأم الرقمي، رُصدت تحديات تتعلق بارتفاع تكاليف التطبيق، والحاجة إلى مهارات تقنية متقدمة، إضافة إلى محدودية الوعي بأهمية هذه التقنية لدى بعض العاملين في مجال التصميم.

وبناءً على ما سبق، توصي الدراسة بضرورة تعزيز دمج التوأم الرقمي في التعليم والممارسة التصميمية من خلال بإدراج مفاهيم وتقنيات التوأم الرقمي ضمن مناهج كليات التصميم الداخلي والعمارة، بهدف تأهيل المصممين لاستخدامها بكفاءة، وتشجيع المؤسسات والشركات المتخصصة على الاستثمار في البنية الرقمية، بما يشمل تقنيات النمذجة ثلاثية الأبعاد والذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء، إلى جانب ضرورة إجراء بحوث تطبيقية وميدانية لقياس تأثير التوأم الرقمي في مشاريع التصميم الداخلي الواقعية، بهدف توثيق النتائج وتطوير نماذج قابلة للتعميم.

مراجع البحث :

أولا : المراجع العربيه:

ندا، أسامة علي السيد، وداود، مينا إسحق توفيلس.(2022) . التوأم الرقمي: منهجيات نمذجة بيئة العمل أثناء عمليات التصميم والتطوير . مجلة التصميم الدولية، ١٢(٥)، ص. ٢٢٥–٢٤٩. الجمعية العلمية للمصممين. متاح عبر قاعدة بيانات المنظومة: https://search.mandumah.com/Record/1336188

محمد، هيثم محمد خلال .(2024). التوأم الرقمي وأثره في تصميم المنتج وعمره الافتراضي .مجلة التراث والتصميم، ٤(٢٠)، ص. ٣٢٣–٣٤١. متاح عبر قاعدة بيانات المنظومة: https://search.mandumah.com/Record/1459640/Description

مجلد، أ. ط. (٢٠٢٣). 'التوأم الرقمي بين الواقع والمستقبل: مراجعة منهجية لاستخدام تقنية التوأم الرقمي ورؤية مستقبلية لتوظيفها في عمليتي التعليم والتعلم .'مجلة البحث العلمي في التربية، ٢٤(10)، ص. ٢٠٤–٢٢٥. متاح عبر: https://doi.org/10.21608/jsre.2023.239203.1606.

ثانيا: المراجع الأجنبيه :

References:

Arkiste (2024): The Impact of Digital Twins in Architecture and Design: A Comprehensive Guide for Architects - Arkiste. [online] Arkiste.com. Available at: https://arkiste.com/blog/the-impact-of-digital-twins-in-architecture-and-design-a-comprehensive-guide-for-architects [Accessed 8 Apr. 2025].

Azhar, S., Khalfan, M. and Maqsood, T. (2012). Building Information Modeling (BIM): Now and Beyond. Australasian Journal of Construction Economics and Building, 12(4), pp.15–28. doi: 10.5130/ajceb.v12i4.3032. Available at: https://epress.lib.uts.edu.au/journals/index.php/AJCEB/article/view/3032 (Accessed 2 Apr. 2025).

Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S. and Rezgui, Y. (2020): Towards a Semantic Construction Digital Twin: Directions for Future Research. Automation in Construction, 114(114), p.103179. doi: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179.

Çavdar, A.A. and Karabak, E.Ş. (2024): Digital Twin Technology in Architecture. In: Y. Aksoy, ed., Contemporary Issues in Architecture and Urban Planning 2024: Architecture, Environment, and Interdisciplinarity. [online] Istanbul: DAKAM Publications, p.47. Available at: https://www.researchgate.net/publication/387754944_Digital_Twin_Technology_in_Architecture [Accessed 10 Apr. 2025].

Dugasa, Gutu. (2022). What Is MEP Engineering. [online] Scribd, pp.6 Available at: https://www.scribd.com/document/744058101/What-is-MEP-Engineering [Accessed 2 Apr. 2025].

Fuller, A., Fan, Z., Day, C. and Barlow, C. (2020): Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. [online] ResearchGate. Available at: https://www.researchgate.net/publication/341717861_Digital_Twin_Enabling_Technologies_Challenges_and_Open_Research [Accessed 22 Mar. 2025].

Grieves, M. and Vickers, J. (2016): Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: F. Kahlen and S. Flumerfelt, eds., Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. [online] Springer International Publishing Switzerland: Springer Nature, pp.85–113. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4 [Accessed 3 Apr. 2025].

Javaid, M., Haleem, A. and Suman, R. (2023): Digital twin applications toward industry 4.0: A review. Cognitive Robotics, [online] 3, pp.72–73. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667241323000137 [Accessed 1 Apr. 2025].

Negri, E., Fumagalli, L. and Macchi, M. (2017): A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. Procedia Manufacturing, [online] 11, pp.939–948. doi: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198.

Sai, S., Sharma, P., Gaur, A. and Chamola, V. (2024): Pivotal role of digital twins in the metaverse: A review. Digital Communications and Networks, [online] (S2352-8648(24)00170-6). doi: https://doi.org/10.1016/j.dcan.2024.12.003.

Shahzad, M., Shafiq, M.T., Douglas, D. and Kassem, M. (2022): Digital Twins in Built Environments: An Investigation of the Characteristics, Applications, and Challenges. Buildings, [online] 12(2), p.120. Available at: https://www.mdpi.com/2075-5309/12/2/120 [Accessed 10 Apr. 2025].

ثالثا : مواقع الأنترنت :

Web sites:

Akila (2023). Digital twins for the built environment. [online] Akila. Available at: https://www.akila3d.com/blog/insights/digital-twins-built-environment/ [Accessed 4 Apr. 2025].

Andrade, A. (2024). The 4 Levels of the Digital Twin Technology. [online] Vidya. Available at: https://vidyatec.com/blog/the-4-levels-of-the-digital-twin-technology/ [Accessed 14 Mar. 2025].

Ankitha (2024). Digital Twin Architecture: Pros & Cons Explained | Toobler. [online] Toobler. Available at: https://www.toobler.com/blog/digital-twin-architecture-pros-cons [Accessed 12 Mar. 2025].

Ankitha (2024). Digital Twin in Construction: Best Practices & Examples. [online] Toobler. Available at: https://www.toobler.com/blog/digital-twin-in-construction [Accessed 18 Mar. 2025].

Dayra (2023). Digital Twins and BIM Management for Construction Projects. [online] Foundtech. Available at: https://foundtech.me/digital-twins-and-bim-management-for-construction-projects/?lang=en [Accessed 26 Mar. 2025].

Farhadi, F. (2024). 13 Inspiring Digital Twin Examples - Neuroject. [online] Neuroject. Available at: https://neuroject.com/digital-twin-examples/ [Accessed 5 Apr. 2025].

[7] Henriksen, M. (2023). Museum of the Future. [online] Buro Happold. Available at: https://www.burohappold.com/projects/museum-of-the-future/ [Accessed 16 Mar. 2025].

IBM (2021). What Is a Digital Twin? [online] Ibm.com. Available at: https://www.ibm.com/think/topics/what-is-a-digital-twin [Accessed 1 Apr. 2025].

Missions, H. (2024b). BIM & Digital Twins: 3 Real-World Examples. [online] Hammer Missions. Available at: https://www.hammermissions.com/post/bim-digital-twins-3-real-world-examples [Accessed 25 Mar. 2025].

Podmurnyi, S. (2022). Digital Twin Development Benefits and Costs - Visartech Blog. [online] Visartech. Available at: https://www.visartech.com/blog/digital-twin-solution-development-guide/ [Accessed 3 Apr. 2025]