دور التوائم الرقمية في تعزيز استدامة الأبنية التاريخية

الدكتورة: علا خيطو *

ملخص البحث

تتبوأ تقنية التوائم الرقمية (Digital Twins) مكانة محورية متسارعة الأهمية في قطاع الهندسة المعمارية، والمدنية، والإنشاءات، وإدارة المرافق .إذ تعمل كنسخ افتراضية ديناميكية تحاكي الأصول والأنظمة المادية في بيئة لحظية مدعومة بالبيانات الاستشعارية. وينسجم هذا التطور التكنولوجي مع التوجهات العالمية نحو إرساء قواعد المدن الذكية الشاملة وتحقيق أهداف التنمية المستدامة. حيث تتسع تطبيقات هذه التقنية لتشمل ترشيد استهلاك الطاقة، وإدارة الحركة المرورية، وتحسين كفاءة تشغيل المباني وصيانتها، مع التركيز على المنشآت التاريخية لما تحمله من قيمة مضافة.

تُعرّف المباني التاريخية بأنَّها ثروة عمرانية وحضارية تعكس تطوراً إنسانياً بارزاً أو ترتبط بأحداث مفصلية في الماضي. وتتفرد هذه المنشآت غالباً بخصائص بيئية ومناخية محلية مميزة، نظراً لاعتماد تصميمها الأصلي على آليات طبيعية كفؤة للتدفئة، والإضاءة، والتهوية، فضلاً عن كونها تتميز بمواقع جغرافية استراتيجية.

تكمن الأهمية الجوهرية للتقنيات الرقمية في قدرتها على ترشيد استهلاك الطاقة والموارد، وابتكار نظم مستدامة، ومراقبة أهداف التنمية المستدامة بفاعلية، لا سيما في قطاع البناء عبر توفير أدوات متقدمة لنمذجة المنشآت ودعم اتخاذ القرار. وفي هذا الإطار، استقصى البحث إمكانات التحوُّل الرقمي في تعزيز الاستدامة الحضرية، مع التركيز على الأبنية التاريخية؛ إذ تشير الدراسة إلى وجود فجوات معرفية في فهم الإسهامات بعيدة المدى لهذه التقنيات في رفع كفاءة إدارة موارد تلك الأبنية وتعزيز قدرتها على الصمود أمام التحديات البيئية. وقد خلص البحث إلى أنَّ الاستدامة هي التطبيق الراهن والأبرز لتقنية لتوائم الرقمية (Digital Twins) في قطاع التشييد، وتتركز جلّ الممارسات المستدامة في المباني التاريخية والتي يمكن تعزيزها من خلال هذه التقنية على تقليص استهلاك الطاقة، وصون طاقتها الكامنة، وتبني نهج دورة الحياة الشامل.

الكلمات المفتاحية: التوأمة الرقمية، الاستدامة، الظلّ الرقمي، نمذجة معلومات البناء التاريخي **HBIM**، الأبنية التاريخية، مدينة دمشق.

* مدرس –كلية الهندسة المعمارية– قسم التصميم المعماري، جامعة دمشق،
ola.khito@damascusuniversity.edu.sy

The role of digital twins in promoting the sustainability of historic buildings

Dr. Ola Khito *

Abstract

Digital twin technology is rapidly becoming a pivotal force in the architecture, civil engineering, construction, and facilities management sectors. It functions as dynamic virtual replicas that simulate physical assets and systems in a real-time environment, supported by sensor data. This technological advancement aligns with global trends toward establishing comprehensive smart cities and achieving sustainable development goals. Applications of this technology extend to energy conservation, traffic management, and improving the operational and maintenance efficiency of buildings, with a particular focus on historical structures due to their added value.

Historical buildings are defined as architectural and cultural treasures that reflect significant human development or are associated with pivotal events in the past. These structures often possess unique local environmental and climatic characteristics, given that their original design relied on efficient natural mechanisms for heating, lighting, and ventilation, in addition to their strategic geographical locations.

The fundamental importance of digital technologies lies in their ability to optimize energy and resource consumption, create sustainable systems, and effectively monitor sustainable development goals, particularly in the construction sector, by providing advanced tools for building modeling and decision support. Within this framework, the research explored the potential of digital transformation in enhancing urban sustainability, with a focus on historic buildings. The study indicates knowledge gaps in understanding the long-term contributions of these technologies to improving resource management efficiency in these buildings and enhancing their resilience to environmental challenges. The research concluded that sustainability is the current and most prominent application of digital twins in the construction sector, and most sustainable practices in historic buildings that can be enhanced through this technology focus

on reducing energy consumption, preserving their latent energy, and adopting a comprehensive lifecycle approach.

Keywords: Digital twins – sustainability – digital shadow –Historic Building Information Modeling (**HBIM**), historic buildings, Damascus city
*Doctor, Faculty of Architecture, Department of Architectural Design, Damascus University, ola.khito@damascusuniversity.edu.sy

- **مقدمة:**

تُعدّ المباني التاريخية ركناً أساسياً من أركان التراث الثقافي لكل أمة، إذ تُجسّد الذاكرة الجماعية من خلال الأشكال والقصص المعمارية، ويُعدّ الحفاظ على هذه المعالم واستعادتها أمراً ضرورياً للحفاظ على هذه الذاكرة. تمثل عمليات التوثيق والنمذجة الرقمية للتراث المعماري حدوداً تلتقي فيها التكنولوجيا والثقافة لضمان معرفة الماضي والحفاظ عليه. بالنسبة للمباني التاريخية، يتطلب جمع الأرشيفات والمعلومات التاريخية، واحترام التفاصيل المعمارية الأصيلة، نهجاً مُصمماً خصيصاً لتطوير نمذجة حاسوبية، قادرة على تقديم صورة واضحة عن الأهمية التاريخية، ومراعاة الجوانب الأثرية.

يُجسّد إدخال التقنيات الرقمية، مثل نمذجة معلومات البناء H–BIMونماذج البيانات الرقمية DTs، تقدماً متطوراً، إذ يُقدّم منهجيات مُحسّنة لاستعادة التراث الثقافي وصيانته، ويُمثّل أفقاً جديداً للعمليات التي تتم على البناء التاريخي وخاصةً العمليات التي تعزِّز خصائص الاستدامة المتأصلة فيه باستخدام التوائم الرقمية التي يتوسع دورها ليصل إلى التوثيق المستقبلي وإدارة عمليات الصيانة والتشغيل.

- **<u>إشكالية البحث</u>:** ندرة الالتزام بإطار عمل شامل للاستدامة قائم على التوائم الرقمية للمباني التاريخية ذات القيمة في مدينة دمشق في ظلّ الاهتمام العالمي بهذه الأداة ودورها في إدارة وتشغيل وصيانة هذا النوع من الأبنية.
- **<u>أهمية البحث</u>** تلزم أهمية الأبنية التاريخية بيئياً وجود أدوات تعزز استدامتها المتأصلة وتطيل عمرها الافتراضـــي لذلك تكمن أهمية هذا البحث في نهجه، الذي يُحدد الاتجاهات الناشـــئة، ويُقدم رؤى عملية لتوجيه تبني التوائم الرقمية ودورها المحوري في تعزيز مبادئ الاستدامة في البناء التاريخي.
- **هدف البحث:** يهدف البحث إلى إظهار قدرة التوأمة الرقمية في تعزيز اســـتدامة البناء التاريخي واستنباط مبادئ الاستدامة التي يتم تثقيلها أثناء استخدام هذه التقنية وتزيد من تقييم البناء التاريخي بيئياً.
- **<u>منهجية البحث</u>**، أتت المنهجية على الشكل التالي:

يعتمد البحث على منهجين للوصـــول إلى هدف البحث: **منهج نظري اســـتقرائي** ويتم من خلاله رصـــد مفهوم التوائم الرقمية ومجالات اســـتخدامها ومنها القطاع المعماري وامكانياتها في تعزيز اســـتدامة البناء التاريخي. **ثم منهج تحليلي:** يتم فيه اختبار قدرة هذه الإمكانيات على حالتين دراســـيتين عالميتين ولحظ أهمية تطبيق ذلك على حالة محلية لبناء العابد في

دمشق نظراً لاستدامة تصميمه.

1- التقنية الرقمية:

تُعرَّف بأنَّها محاكاة احتمالية متعددَّة المستويات ومتكاملة فيزيائياً لنظام ما، تستخدم أحدث النماذج الفيزيائية وأجهزة الاستشعار للحصول على بيانات آنية وسجل تاريخي لمحاكاة دورة حياة نظيرها. (Karatzas, S., Lazari, V., Fouseki, K., Natalia Pracchi, V. & Balaskas, E. (2024),p155)يُحدث مفهوم التوأم الرقمي ثورة في البيئة المبنية من خلال دمج البيانات في الوقت الفعلي، على عكس النماذج الرقمية الثابتة يمثل النموذج الرقمي A digital model أصلًا دون تبادل بيانات آلي بين البيئتين المادية والافتراضية، يشير الظل الرقمي a digital shadow إلى نموذج رقمي ذي تدفق بيانات أحادي الاتجاه من البيئة المادية إلى البيئة الافتراضية، بينما يتضمن التحكم الرقمي digital control تدفقًا أحادي الاتجاه من البيئة الافتراضية إلى البيئة المادية **يتميز التوأم الرقمي Digital Twin بتدفق بياناته ثنائي الاتجاه، مما يتيح تبادلًا شاملًا بين البيئتين المادية والافتراضية.** Hosamo, H. (2023), p16,

2- التوائم الرقمية:

2-1- تعريفها:

هي تمثيلات افتراضية للأصول أو العمليات المادية، ويمكن تحديثها بشكل دوري، مما يوفر بيئة واقعية قوية لدعم عملية اتخاذ القرارات في مختلف مراحل دورة حياة المنتج المادي Pr´edhumeau, M, p1 ، ويمكن لدمج البيانات الحقيقية وتحليلات النموذج الافتراضي أن يمنع حدوث المشكلات قبل وقوعها، ويقلل من التكاليف، ويضع خططًا للأنشطة المستقبلية من خلال المحاكاة Karatzas, S., Lazari, V., Fouseki, K., Natalia Pracchi, V. & Balaskas, E. (2024), p155, p156

في البداية، استُخدم هذا المصطلح في الهندسة والمنتجات المصنعة، ولكنه يشير الآن بشكل عام إلى أي نموذج لأي نظام مزود بتصور ثلاثي الأبعاد وبيانات آنية Batziou, E. & others, (2025),p.96

2-2- مكوناتها:

يتكون مفهوم التوأم الرقمي من ثلاثة أجزاء رئيسية: كيان مادي في الفضاء الحقيقي، وهو "التوأم المادي (PT) وكيان افتراضي في الفضاء الافتراضي، وهو "التوأم الرقمي (DT) "وتدفق ثنائي

الاتجاه للمعلومات والبيانات بين الفضاء المادي والفضاء الافتراضي. Standardization Council Industrie 4.0), (2024),p10

2-3- تاريخ نشوء المصطلح وتطوره:

نشأ مفهوم التوائم الرقمية في صناعة الطيران والفضاء، حيث استخدم برنامج أبولو التابع لوكالة ناسا مركبة فضائية "توأم" على الأرض لمحاكاة الظروف التي يواجهها رواد الفضاء وتشخيص أعطالها ثم تطورت التوائم الرقمية إلى نماذج افتراضية معقدة قادرة على محاكاة الظروف الآنية في قطاعات متنوعة، بما في ذلك التصنيع والرعاية الصحية، مما يدعم التحليل التنبؤي والصيانة وجهود التحسين. وقد مكّنت التطورات الحديثة، ولا سيما دمج إنترنت الأشياء والذكاء الاصطناعي، التوائم الرقمية من تمثيل البيئات المادية، وتوسيع تطبيقاتها من النسخ الثابتة إلى الأنظمة التكيفية في الوقت الحقيقي، مما يعزز الدقة واتخاذ القرارات في مختلف المجالات. Akyol, G.& Berkay Avci, A. (2025),p81,p82

2-4- التوائم الرقمية للأبنية:

يتكون التوأم الرقمي للمبنى من ثلاثة أجزاء أساسية :**نموذج للمبنى، ومجموعة بيانات متطورة تتعلق به، وطريقة لتحديث النموذج ديناميكياً بالبيانات** .يمكن تصنيف النماذج المستخدمة في الدراسات السابقة إلى ثلاث فئات: النماذج الهندسية ثلاثية الأبعاد، ونماذج المعلومات، والنماذج البارامترية .يعيد النموذج الهندسي ثلاثي الأبعاد بناء بنية المبنى باستخدام تقنيات مثل الرسومات الحاسوبية ثلاثية الأبعاد، والتصوير المساحي، والمسح الليزري .ينشئ نموذج المعلومات قاعدة بيانات تحتوي على خصائص مكونات المبنى، مثل المواد، والوصلات، والهندسة ثلاثية الأبعاد . يركز النموذج البارامتري على تحديد ووصف الخصائص والسلوكيات الرئيسية للمبنى. بينما توثق النماذج الهندسية والمعلوماتية ثلاثية الأبعاد في المقام الأول الجوانب الثابتة للمباني، **وتُعد مفيدة في إدارة وترميم المباني التاريخية، تستفيد النماذج البارامترية من تحديثات البيانات المستمرة لتحليل البيانات والصيانة الوقائية** (NI, Z. & others, (2025),p3373, Yang, p.& others, (2020)البيانات المتعلقة بالمباني التاريخية غير متجانسة ومتعددة التخصصات، مما يستلزم خبرة في مجالات متنوعة مثل تكنولوجيا المعلومات والتاريخ والهندسة المعمارية. لذلك، من الضروري وصف هذه البيانات بشكل متسق لضمان قابلية التشغيل البيني بين الأدوات والتطبيقات. Wright, L. & Davidson, S., (2020),p12

في سياق الحفاظ على المباني التاريخية، يمكن إنشاء توأماً رقمياً من خلال دمج بيانات مثل الهندسة، والملاحظة البصرية، وعملية البناء، وخصائص المواد. بعدها تتم معايرة النموذج باستخدام قياسات ديناميكية لتقييم السلامة الهيكلية ودعم الصيانة الوقائية للبناء التاريخي. يمكن هذا النموذج تحسين الرطوبة النسبية في المواقع التراثية وتصور البيانات البيئية، والتحكم في المراوح، وتمثيل BIM وغيرها. NI, Z. & others, (2025),p3374 مع انخفاض تكلفة التوائم الرقمية، يسعى مالكو المباني و(البلديات والوزارات) إلى تبنيها لتمثيل مبانيهم من خلال الوصول إلى البيانات في الوقت الفعلي، ومحاكاة النتائج والحلول، وتنفيذ العديد من المهام التشغيلية بكفاءة وإثراء ودعم المبادرات المتعلقة بالحفظ والصيانة والترميم. Karatzas, S., Lazari, V., Fouseki, K., Natalia Pracchi, V. & Balaskas, E. (2024),p157 ويُضاف إلى ذلك تعدد وظائف هذه التقنيات في الحفاظ على الموروث الثقافي بشكل عام من خلال الرقمنة وتحليل الصور وإدارة البيانات ونمذجة العمليات والمحاكاة وصياغة الفرضيات. سليمان (2026) ص23/21.

2-5- تصنيف التوائم الرقمية:

يمكن تصنيف التوائم الرقمية بناءً على مدى تعقيدها وحجم المعلومات التي تتعامل معها إلى خمس تصنيفات، يساعد ذلك في فهم إمكانيات وقيود تطبيقات التوائم الرقمية المختلفة في قطاع البناء:

-**التوأم الرقمي الوصفي Descriptive** ويوفر تمثيلاً ثابتاً للمبنى، حيث يلتقط معلومات تفصيلية عن التصميم والهيكل .يُستخدم هذا النوع من التوائم الرقمية بشكل أساسي لأغراض التوثيق والتصور ويتضمن نماذج ثلاثية الأبعاد مفصلة تم إنشاؤها باستخدام نمذجة معلومات المباني (BIM)أو أية تطبيقات أخرى .لا تتضمن التوائم الرقمية الوصفية بيانات في الوقت الفعلي أو تغييرات ديناميكية، مما يحد من استخدامها في التحليل الثابت والتحقق من التصميم.

-**التوأم الرقمي المعلوماتيInformative** يدمج التوأم الرقمي المعلوماتي البيانات الآنية لتوفير رؤى حول حالة المبنى وأدائه. يتجاوز هذا النوع من التوائم الرقمية التمثيلات الثابتة من خلال دمج بيانات المستشعرات التي تعكس الظروف الآنية داخل المبنى. مثل توفير بيانات حول درجة الحرارة والرطوبة والإشغال واستهلاك الطاقة وتحسين أنظمة التدفئة والتهوية والتكييف، وضمان بيئة مريحة لشاغلي المبنى. Lemian, D. & Bode, F. (2025),p.6,7,8

-**التوأم الرقمي التنبؤي: Predictive** يستخدم التوأم الرقمي التنبؤي البيانات التاريخية والمحاكاة للتنبؤ بالأداء المستقبلي من خلال تحليل بيانات الأداء السابقة وتشغيل سيناريوهات محاكاة متنوعة، والتنبؤ بالمشاكل المحتملة وتحسين عمليات المبنى استباقياً Lemian, D. & Bode, F. (2025),p.6,7,8

-**التوأم الرقمي الشامل: Comprehensive**يجمع التوأم الرقمي الشامل بين مصادر بيانات متنوعة وتحليلات متقدمة لتقديم رؤية شاملة لدورة حياة المبنى، بما في ذلك الأثر البيئي والكفاءة التشغيلية .يوفر رؤية تفصيلية ومترابطة لأداء المبنى حول كفاءة الطاقة، ومؤشرات الاستدامة.

-**التوأم الرقمي المستقل: Autonomous**يستخدم التوأم الرقمي المستقل الذكاء الاصطناعي وخوارزميات التعلم الآلي لإدارة عمليات المباني وتحسينها ذاتياً .يتميز هذا النوع المتقدم بقدرته على اتخاذ القرارات وإجراء التعديلات دون تدخل بشري، ويضبط إعدادات التدفئة والتهوية وتكييف الهواء لتحسين استهلاك الطاقة والحفاظ على الراحة. Lemian, D. & Bode, F. (2025),p.6,7,8

2-6- تطبيقات التوائم الرقمية في الأبنية:

أدت التطورات الحديثة في تقنية التوأم الرقمي إلى تطبيقها في العديد من المجالات ضمن قطاع البناء، وتعزيز إمكانيات التوأم الرقمي لتحسين جوانب مختلفة من إدارة وتشغيل المباني، مما يعزز الكفاءة والاستدامة.

1. **إدارة الطاقة** تُستخدم النماذج الرقمية بشكل متزايد لتحسين استهلاك الطاقة في المباني، فمن خلال محاكاة سيناريوهات مختلفة، تُمكّن هذه النماذج من تطبيق استراتيجيات الطاقة الأكثر كفاءة وضبط أنظمة التكييف والتهوية، والإضاءة، للحفاظ على مستويات الراحة .
2. **الصيانة التنبؤية:** تُعدّ الصيانة التنبؤية أو الاستشرافية تطبيقاً بالغ الأهمية لتقنية التصميم الرقمي في قطاع البناء، إذ تستطيع هذه التقنية التنبؤ بأعطال المعدات المحتملة مما يقلل من وقت التوقف عن العمل والتكاليف التشغيلية.
3. **الاستدامة:** تُسهم تقنيات التصميم الرقمي إسهاماً كبيراً في جهود الاستدامة في قطاع البناء من خلال نمذجة الأثر البيئي للمواد وممارسات البناء، بدءاً من مرحلة تصميم المبنى وحتى مرحلة هدمه وإعادة تأهيله، ويمكن لهذه التقنيات محاكاة دورة حياة مواد البناء، من استخراجها وتصنيعها إلى استخدامها والتخلص منها، مما يوفر رؤى ثاقبة حول بصمتها البيئية، من خلال تقييم انبعاثات الكربون المرتبطة بمواد وتقنيات البناء المختلفة، مما يساعد المعماريين والبنائين

في خيارات أكثر استدامة، ويمكن لتقنيات التصميم الرقمي محاكاة الأثر البيئي طويل الأجل لخيارات التصميم المختلفة، مثل أنواع العزل، ومواقع النوافذ، الطاقة المتجددة، وتساعد هذه المعلومات في تصميم مبانٍ تتسم بكفاءة الطاقة ومراعاتها للبيئة.

4. **السلامة والصحة:** يُعدّ ضمان سلامة وصحة شاغلي المباني أولوية قصوى، وتلعب أنظمة التحليل الرقمي دوراً محورياً في مراقبة السلامة الإنشائية للمباني والامتثال لمعايير السلامة. Lemian, D. & Bode, F. (2025),p.9,10

3- الأبنية التاريخية:

تشكّل المباني التاريخية جزءاً من المباني القائمة، وتتميز بحسب تعريفها، بثلاث سمات: القدم، والأصالة، والأهمية. L. Webb, A. (2017), p.1 وتشير إلى المباني والمنشآت القيّمة، والتي شهدت تطوراً حضارياً أو أحداثًا تاريخية معينة. تتميز المباني التاريخية بمناخ محلي خاص نظراً لارتفاع قدرتها على الاحتفاظ بالحرارة، مما قد يستدعي استخدام أنظمة ميكانيكية للتحكم في البيئة. W.H. Fung, I., Tsang, Y., W.Y. Tam, V., Xu,Y. & C.K. Mok, E. (2017),p.1,2

تُعدّ المباني التاريخية ثروة ثقافية بسبب خصائصها المادية، ودورها في تشكيل الذاكرة الجماعية والاستمرارية المكانية لذا ينبغي صيانتها كاستراتيجية لضمان استدامة التراث الثقافي. يتطلب ذلك الحفاظ على المباني التاريخية جمعاً دقيقاً لكميات هائلة من البيانات، معالجتها وتحليلها، وتوثيقها ونهج متعددة التخصصات، وخبراء في مجالات عديدة منها الهندسة المعمارية والمدنية وعلوم المواد والتكنولوجيا المتقدمة كأساس لاستراتيجية صيانة فعّالة. KAKDAŞ ATEŞ, D. & AKALP, (S.), (2025),p212

3-1- الاستدامة في الأبنية التاريخية:

تتمتع هذه المباني بمزايا الطاقة الكامنة، بُنيت بحرفية عالية ومواد تدعم عمراً مادياً طويلاً، كما أنَّها ما صُممت بشكل جيد من حيث التدفئة والإضاءة والتهوية الطبيعية، وغالباً ما تقع في مواقع مميزة. تم بنائها على مبدأ الإدارة الرشيدة لإطالة العمر الافتراضي، بما في ذلك إعادة تدويرها لاستخدامات بديلة M. Okba, E. &E. Embaby, M. (2013),1686 تظهر الاستدامة في سياق المباني التاريخية في:

- **الحفظ:** أي حماية المبنى التاريخية والمعمارية، ويسعى الحفاظ المستدام إلى تقليل استخدام المواد والطاقة مع ضمان الاستقرار الهيكلي .
- **كفاءة الطاقة:** يمكن لتحديث المباني التاريخية بأنظمة حديثة موفرة للطاقة أن يقلل من انبعاثاتها الكربونية، وتحديث أنظمة التدفئة والتبريد والإضاءة.
- **اختيار المواد:** يتضمن الحفاظ المستدام استخدام مواد صديقة للبيئة ومحلية، ويمكن دمج المواد المستصلحة والمعاد تدويرها مع جهود الترميم.
- **التكيُّف وإعادة الاستخدام:** يمكن لإعادة توظيف المباني التاريخية لأغراض حديثة أن تطيل عمرها وتقلل الحاجة إلى إنشاءات جديدة .
- **اعتبارات الموقع والمناظر الطبيعية:** يشمل زراعة النباتات المحلية، وترشيد استهلاك المياه ecclesiastical.ca, (2023),p.2

3-2- الاستدامة ودرجة التدخل في الأبنية التاريخية:

يخضع المبنى التاريخي لضوابط تهدف إلى حمايته من التطوير غير المناسب، وتسهيل صيانته، الذي يُعرّفه المجلس الدولي للمعالم والمواقع (ICOMOS) بأنَّه "عمليات العناية بمكان ما لحماية قيمته التاريخية يوضح الشكل 1 ارتباط أنواع التدخلات على الأبنية التاريخية بمفهوم الاستدامة حيث يكون بالنسبة الأعلى في مستوى الحفاظ والنسبة الأقل في مستوى إعادة البناء. M. Okba, E. &E. Embaby, M. (2013),p.1684, 1685



الشكل (1): العلاقة بين الاستدامة ودرجات التدخل على البناء التاريخي M. Okba, E. &E. Embaby, M. (2013),p.1684, 1685 (تعديل الباحثة)

3-3- تدابير تعزيز الاستدامة في الأبنية التاريخية:

فيما يلي تدابير الاستدامة التي ينبغي مراعاتها لوضع استراتيجيات تصميم مناسبة لتحسين كفاءة الطاقة وتكامل الاستدامة في المباني التاريخية.

- ترشيد الطاقة الكامنة**EEC**[1] [2]، يُعرف مخزون المباني القائمة عالمياً بأنَّه مصدر هام لاستهلاك الطاقة، يسهم الحفاظ على المباني التراثية القائمة في ترشيد الطاقة الكامنة، ويُحقق وفورات كبيرة في استهلاك الطاقة، مثل مواد البناء التقليدية، الخشب والطوب.
- تحسين أداء المباني التاريخية[3]OHBP يُسهم تحسين أداء هذه المباني في تحقيق كفاءة الطاقة وأهداف الاستدامة، كما أنَّ صيانة وترميم المباني التاريخية يُساعد في ضمان استمرار المكان وتعزيز استدامته.
- خفض استهلاك الطاقة في المباني [4]REEB تساهم تدابير استدامة جديدة، مثل أنظمة التدفئة والمياه الساخنة الموفرة للطاقة، وخزانات المياه، أو غيرها من الأنظمة في تخفيض الاستهلاك.
- تعظيم كفاءة الطاقة والمياه في أعمال التجديد للمباني التاريخية[5] MEWE.عند اقتراح أعمال تجديد لمبنى تاريخي قائم، ينبغي أن تشكل تدابير كفاءة الطاقة واستدامة المياه جزءاً أساسياً من عملية التصميم، ويمكن مراعاة ما يلي:

1. التوجيه: (O) توجيه النوافذ والفتحات الأخرى، لتحقيق أقصى استفادة من التصميم السلبي.
2. مواد البناء:(M) يمكن لهذه المواد أن تعزز كفاءة الطاقة والقيمة التراثية للمكان.
3. وسائل التظليل: المظلات، وأغطية النوافذ، والشرفات، أو المداخل.
4. كفاءة الطاقة المقترحة لأنظمة التدفئة والتبريد .

[1] Embodied Energy Conservation

[2] ويشمل ذلك استخراج وتصنيع المواد والمعدات، . هي الطاقة المستهلكة في جميع العمليات المرتبطة بإنتاج مبنى ونقل المواد، والوظائف الإدارية

[3] Optimizing of Heritage building Performance

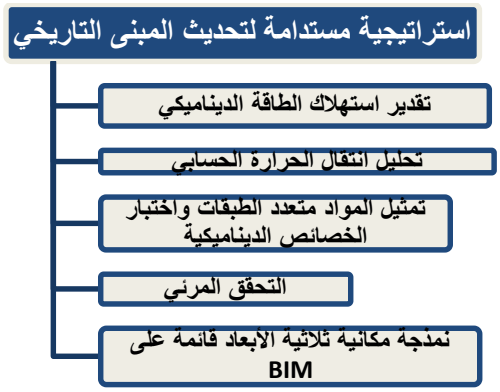
[4] Reducing Energy in Existed buildings

[5] Maximizing Energy and Water Efficiencies

5. تدابير ترشيد استهلاك المياه. مراقبة استهلاك الطاقة والمياه[6] MEWC إنَّ وضع خطة إدارة لمراقبة استهلاك الطاقة والمياه مستقبلا في المبنى القائم، يُسهم في تحقيق نتائج إيجابية M. Okba, E. &E. Embaby, M. (2013),p.1686

3-4- التوأمة الرقمية كأداة إيكوتكنولوجية لتحقيق الاستدامة في الأبنية التاريخية:

يُعتبر التوأم الرقمي أداة فعّالة لمحاكاة وتحسين أداء الطاقة في المباني، فمن خلال دمج مصادر البيانات، مثل نمذجة معلومات المبان (BIM) ، والمراقبة البيئية الآنية، ومحاكاة انتقال الحرارة الحاسوبية، يمكن للتوائم الرقمية توفير تمثيل افتراضي ديناميكي لسلوك الطاقة في المبنى، يتيح هذا النهج تقييماً أكثر دقة قائماً على الفيزياء لانتقال الحرارة واستهلاك الطاقة وأداء أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء، ما يساعد في وضع استراتيجيات مستدامة لتحديث المباني التاريخية، ضمن إطار متعدّد المستويات: Batziou, E. & others, (2025),p.99



الشكل (2): استراتيجية تحديث البناء التاريخي رقمياً. Batziou, E. & others, (2025),p.97 – تعديل الباحثة

4- التوأمة الرقمية والاستدامة: يتم ذلك من خلال أربع نقاط أساسية:

1. نهج دورة الحياة للاستدامة تُمكّن التوائم الرقمية من رؤية شاملة للبنية التحتية، تربط بين التخطيط والتصميم والإنشاء والتشغيل والصيانة، ومن خلال توفير نموذج واحد متطور، تُساعد فرق المشاريع على اختبار استراتيجيات الاستدامة مبكراً والتَّحقق من صحتها بمرور الوقت . كما تكشف عن أوجه القصور في المواد والطاقة والعمليات، مما يسمح للمالكين بتقليل الهدر، وتحسين استخدام الموارد، وإطالة عمر الأصول.

[6] Monitoring of Energy and Water Consumption

2. الكربون الكامن وكفاءَة الطاقة يُعدّ حساب الكربون وتحسين استهلاك الطاقة من أبرز التطبيقات الناشئة حيث يمكن للتوائم الرقمية محاكاة خيارات المواد وأساليب البناء، واختبار السيناريوهات لاختيار بدائل أقل تأثيرًا. Envision & institute for Sustainable infrastructure, (2025), p.5

يرتبط بند كفاءة الطاقة بـ:

- **تحسين التصميم:** يساهم التعديل على الخصائص الحرارية للمواد إلى زيادة كفاءَة المبنى القائم، مما يسفر عن انخفاض في استهلاك الطاقة وتحليل إضافي محاكاة لإنتاج الطاقة الذي يمكن الحصول عليه من استخدام تقنية الخلايا الكهروضوئية الشمسية التي تغطي 60% من مساحة السطح.
- **راحة شاغلي البناء:** توفير الطاقة وتحسين مستوى الراحة، ورضا المستخدمين. مثل معايرة التوأم الرقمي لعنصر واجهة تدفئة إشعاعية متعددة الوظائف مسبقة الصنع، تُعتبر درجة حرارة الغرفة معياراً مهماً لتوصيف الراحة الحرارية، ورضا المستخدمين.
- **تشغيل وصيانة المبنى:** استخدام تصميم التوأم الرقمي لتحسين كفاءَة الطاقة في المباني، وتحقيق كفاءَة عالية للمعدات.
- **محاكاة استهلاك الطاقة:** اقتراح إطار عمل رقمي للمباني التاريخية باستخدام تقنيات مثل إنترنت الأشياء (IoT) والحوسبة والذكاء الاصطناعي لإنشاء نماذج رقمية للمباني التاريخية. Bortolini, r. & others, (2022),p.2
- **المراقبة والتحكم في الوقت الفعلي:** من خلال الاستفادة من مستشعرات إنترنت الأشياء، تُمكّن من الإدارة الاستباقية لأنظمة الطاقة، بما في ذلك أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء والإضاءة.
- **النمذجة والمحاكاة التنبؤية:** تستخدم التوائم الرقمية خوارزميات متقدمة للتنبؤ باحتياجات الطاقة ومُحاكاة السيناريوهات المستقبلية.
- **دمج الطاقة المتجددة:** تُسهّل التوائم الرقمية اعتماد الطاقة المتجددة من خلال استخدام موارد الطاقة الشمسية وطاقة الرياح. وتختبر النماذج الافتراضية المقترنة بمحاكاة BIM سيناريوهات طاقة متنوعة.

- **الصيانة التنبؤية:** تفيد البيانات الآنية والتاريخية، في كشف الأعطال المحتملة، ويجعل الصيانة أكثر موثوقية واستدامة.
- **الحفاظ على المباني التاريخية:** تجمع التوائم الرقمية بين التحديث واحترام القيود المعمارية، فهي تُتيح تحسين كفاءة الطاقة والسلامة الإنشائية، ما يضمن الإدارة المستدامة للبناء التاريخي Sghiri, A. & others, (2025)p.3,4

3. **المرونة المائية وإدارة الموارد:** تلعب التوائم الرقمية دوراً حاسماً في إدارة المخاطر وموارد المياه.
4. **إشراك أصحاب المصلحة والشفافية،** توفر التوائم الرقمية منصة لصنع قرارات شفافة وعرض بدائل للمشاريع، وبناء الثقة، وتعزيز التعاون Envision & institute for Sustainable infrastructure, (2025),p.5 .

4-1- التوأمة الرقمية والاقتصاد الدائري:

يتركّز تطبيق التوأم الرقمي في قطاع البناء في مرحلتي التصميم والصيانة، بينما يُستخدم نادراً في مرحلة الهدم، يمكن تقسيم تطبيق التوأم الرقمي في قطّاع البناء إلى تطبيقات في مراحل التصميم والصيانة والتحويل والهدم، وذلك وفقاً لمراحل دورة حياة المبنى، تناولت عدّة دراسات التوأم الرقمي في مرحلة التصميم، وهو ما يمثل أكثر من 50% من الأبحاث المتعلقة بالتوأم الرقمي في البناء . تشمل هذه الدراسات محاكاة التوأم الرقمي وتحسين الألواح الكهروضوئية للمباني تشمل الدراسات المتعلقة بالصيانة معالجة الجسور وأطر الكشف عنها، وأنظمة اتخاذ قرارات صيانة الجسور في مرحلة الهدم. Chen, Z. & Huang, L. (2020),p.3,4

5- الحفاظ المعماري في ظل الحقبة الرقمية:

تتيح تقنية التوائم الرقمية في التراث المعماري إنشاء نموذج رقمي من خلال دمج المعلومات الثابتة والبيانات الآنية، ويُمكّن من التفاعل ثنائي الاتجاه بين الأنظمة الافتراضية والحقيقية، ما يسمح بإدارة النظام وتحليله والتنبؤ بأدائه، طُبقت تقنية التوائم الرقمية في المباني التاريخية والتراثية.

يُعدّ تقييم الأداء الهيكلي للتراث والتنبؤ به أمراً بالغ الأهمية للحفاظ على سلامته، من خلال نماذج رقمية، أو تطوير إطاراً لتقييم المخاطر الهيكلية في نماذج إعادة البناء ثلاثية الأبعاد في نقاط زمنية مختلفة. تبيّن أنَّ معايير البيئة الفيزيائية داخل المباني، مثل درجة الحرارة والرطوبة، تؤثر على

الحفاظ على التراث، وبالتالي، فإنَّ تحسين أداء الطاقة في المباني يعزِّز كفاءة الطاقة بالهيكل الداخلي للمباني Liu, N.F.; Liang, X.X.; Zhang, Y. (2024),p.4 .

5-1- مثال على نموذج توأم رقمي:

5-1-1- **نمذجة معلومات البناء (BIM):** هي تمثيل رقمي للخصائص المادية والوظيفية للمنشأة، وتُعدّ مورداً معرفياً مشتركاً للمعلومات حول المنشأة، مما يُشكل أساساً موثوقاً لاتخاذ القرارات خلال دورة حياتها؛ بمرحلة التصميم وحتى الهدم. تشمل فوائده خفض التكاليف وتقليل الأخطاء، وزيادة الكفاءة في التخطيط والبناء، والتعاون، وإدارة مرافق أكثر كفاءة، إذا كان تطبيق BIMعلى المباني الجاهزة أمراً صعباً، **فإن طبقة إضافية من التعقيد تصبح واضحة عندما يتم تطبيق نفس الأنظمة على المباني القائمة.**

5-1-2- **نمذجة معلومات البناء التاريخي (HBIM):**

ذُكر مصطلح " التاريخية لأول مرة عام ٢٠٠٩، وعُرِّف بأنه "حلٌّ مبتكرٌ تُبنى من خلاله عناصر معمارية تفاعلية، من بيانات تاريخية. تُرسم هذه العناصر بدقة على سحابة نقاط أو مسح قائم على الصور، توسّع نطاق المصطلح ليشمل البيئة التراثية بمجموعةً معقدة من القيم التاريخية والجمالية، ومُشاركة تخصصات مُتعددة. نظراً لأهمية الأبنية التاريخية، يُجسّد إدخال التقنيات الرقمية، مثل نمذجة معلومات البناء H-BIMونماذج التوائم الرقمية DTs، تقدماً متطوراً، إذ يُقدّم منهجيات مُحسّنة لاستعادة التراث الثقافي وصيانته، ويُمثّل أفقاً جديداً لعمليات البناء. Ewart, L. & Zuecco, V. (2019), p.2,3,4,

الجدول (1): الفرق بين BIMو HBIM. إعداد الباحثة بالاعتماد على المرجع: . Ewart, L. & Zuecco, V. (2019), p.2,3,4,

وجه الاختلاف	BIMالتقليدي	HBIMتاريخي
العناصر	مكتبة عناصر قياسية (أبواب، نوافذ جاهزة)	عناصر فريدة وغير منتظمة (نحت يدوي، جدران مائلة)
المعلومات	مواصفات المواد الجديدة	"سيرة ذاتية" للمادة (العمر، نسبة الرطوبة، المصدر)
الهدف	سرعة الإنشاء وتقليل التكلفة	الحفاظ على الأصالة والاستدامة الزمنية

6- <u>نتائج الدراسة النظرية: توصلت الباحثة من تحليل الجزء النظري إلى مجموعة من النتائج يمكن التعبير عنها وفق الأشكال التالية والتي ستكون محددات أساسية في البحث:</u>

1. أنَّ الاستدامة أهم تطبيق من تطبيقات التوائم الرقمية كما في الشكل 3 ص14
2. يوضح الشكل 4 مبادئ الاستدامة التي يمكن تحقيقها في الأبنية (ومنها التاريخية). ص14

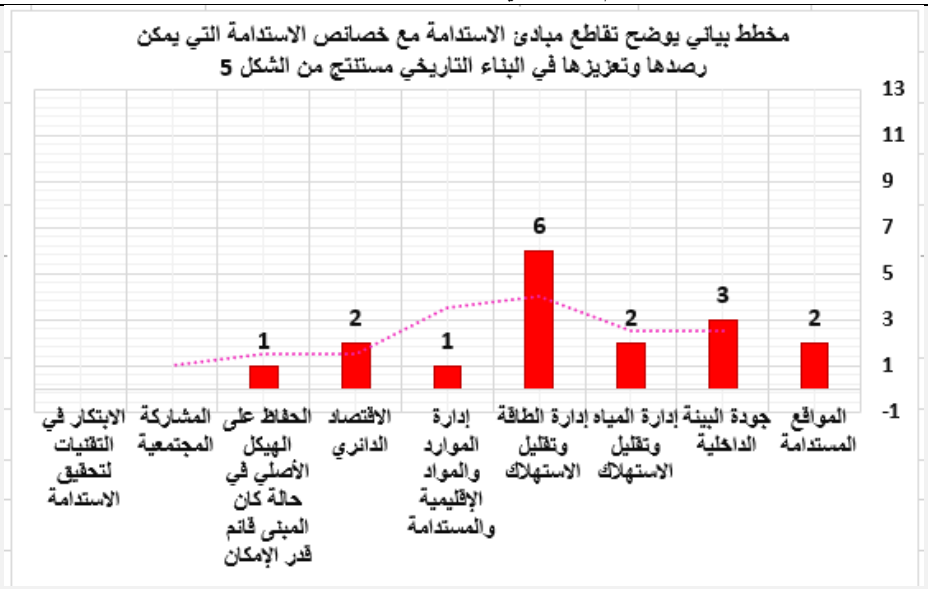


الشكل(3) يمين: تطبيقات التوائم الرقمية في الأبنية. إعداد الباحثة بالاعتماد على Lemian, D. & Bode, F. (2025),p.9,10– **الشكل (4) يسار:** مبادئ الاستدامة. إعداد الباحثة

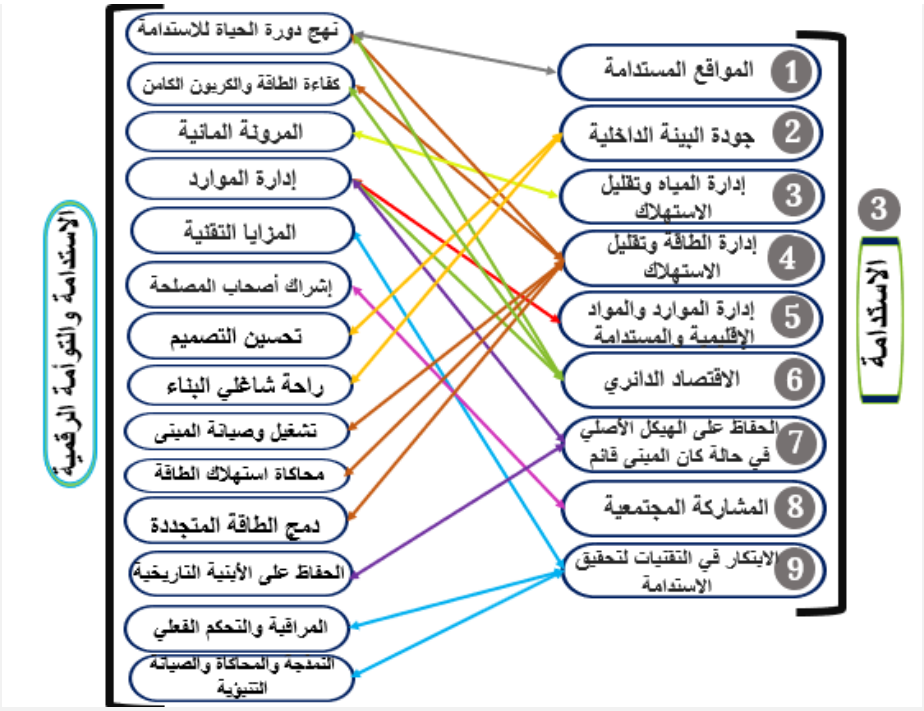
3. **يوضح الشكل 5 تقاطع مبادئ الاستدامة مع خصائص الاستدامة التي يمكن رصدها وتعزيزها في البناء التاريخي.**
4. **يوضح الشكل 6 تقاطع مبادئ الاستدامة مع خصائص الاستدامة التي يمكن تعزيزها من خلال التوائم الرقمية.**



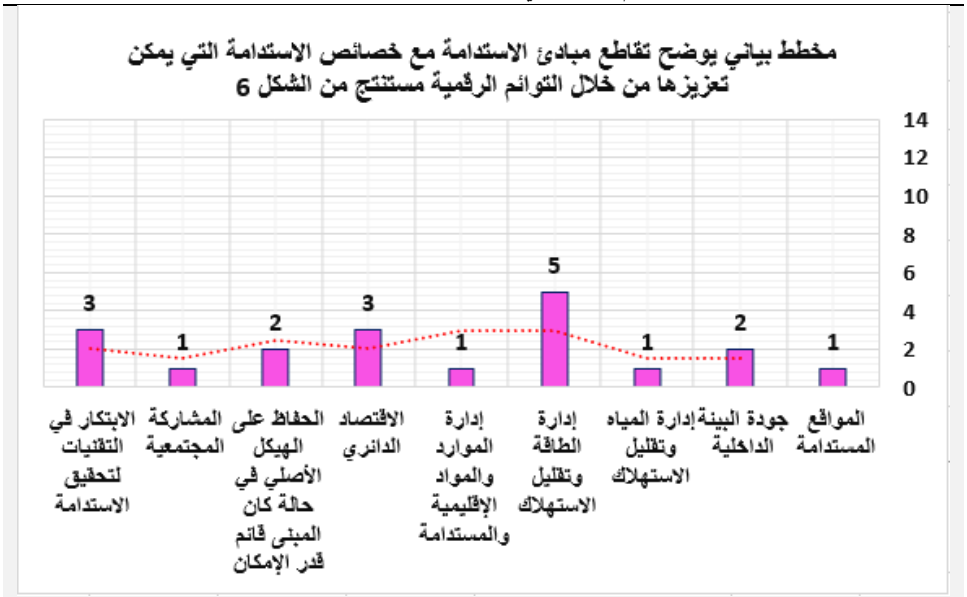
الشكل (5): تقاطع مبادئ الاستدامة مع خصائص الاستدامة في البناء التاريخي. إعداد الباحثة



المخطط (1): مخطط يوضح خلاصة الشكل 5 وعدد البنود فيه 13 ويشير إلى تثقيل مبدأ إدارة الطاقة وتقليل الاستهلاك إلى جانب جودة البيئة الداخلية. إعداد الباحثة



الشكل (6): تقاطع مبادئ الاستدامة مع خصائص الاستدامة التي يمكن تعزيزها من خلال التوائم الرقمية. إعداد الباحثة



المخطط (2): مخطط يوضح خلاصة الشكل 6 وعدد البنود 14 ويشير إلى تثقيل مبدأ إدارة الطاقة وتقليل الاستهلاك إلى جانب الاقتصاد الدائري بعد الاستعانة بالتوأمة الرقمية. إعداد الباحثة

7- **حالات دراسية:** سيتم في هذا الجزء دراسة وتحليل حالتان اثنتان عالميتان لاختبار صحة نتائج الدراسة النظرية. تمَّ اختيار الحالات الدراسية بحيث تكون أبنية تاريخية ذات قيمة وخضعت لعمليات تجديد وفق أدوات رقمية ورصد تعزيز الاستدامة فيها. ثمَّ تمَّت الإشارة إلى مبنى العابد في دمشق بتاريخ إنشاء مشابه لتاريخ الحالة الثانية ورصد خصائص الاستدامة المتوفرة فيه ثمَّ التوصل لآلية لدعم هذه الخصائص وفق تقنية رقمية مستقبلية.

<u>تتشابه الحالة الثانية والحالة المحلية في مايلي:</u>

- **الفترة الزمنية:** يواجه المبنيان تحديات "المباني الانتقالية" التي بُنيت بأساليب قديمة وتتطلب أنظمة تقنية حديثة (تكييف، كهرباء، عزل).
- **الوظيفة المعقدة:** كلاهما مبانٍ تشغيلية (تعليمية أو إدارية أو فندقية) تحتاج إلى موازنة بين "الحفاظ الأثري" و"الاستخدام اليومي المكثّف."

7-1- معهد الرياضيات في بولونيا- إيطاليا The Institute of Mathematics of Bologna يُعد معهد الرياضيات (Dipartimento di Matematica) التابع لجامعة بولونيا في إيطاليا حالة دراسية نموذجية في استخدام تقنية HBIMوالتوائم الرقمية (Digital Twins)للحفاظ على المباني التاريخية وتطويره. Massafra, A., Predari, G. & Gulli, R. (2022), p151

7-1-1- لمحة تاريخية: يُعد معهد الرياضيات في بولونيا، الذي صممه جيوفاني ميتشلوتشي، مثالاً قيّماً على العمارة الحديثة التي شُيّدت بين عامي 1955 و1965 يقع المبنى في المنطقة الجامعية في بولونيا بالقرب من الأسوار القديمة في العصور الوسطى.

7-1-2- معمارياً: يتألف من مبنيين يبلغ ارتفاع المبنى (أ) 24 مترًا ويمتد على عشرة طوابق متداخلة، بمساحة أرضية متوسطة تبلغ 490 مترًا مربعًا .ويضم مكاتب للأساتذة والباحثين، وقاعات دراسية صغيرة، ومكتبة، ومستودعًا للكتب .أما المبنى (ب) فهو برج يبلغ ارتفاعه 36 مترًا ويتكون من ثمانية طوابق بمساحة أرضية متوسطة تبلغ 365 مترًا مربعًا .ويضم قاعات دراسية كبيرة على شكل مدرجات وبعض المكاتب وتبلغ المساحة الإجمالية للمبنى 900 متر مربع Massafra, A., . Predari, G. & Gulli, R. (2022), p151 ويُعد الرواق، الذي يعكس طراز بولونيا المعماري في العصور الوسطى، العنصر المعماري الأكثر تميزًا في الواجهة الرئيسية. بأعمدته المتشعبة . Massafra, A., Costantino, C., Predari, G. & Gulli, R. (2024)p.77,

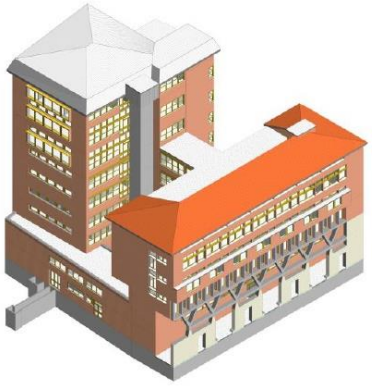


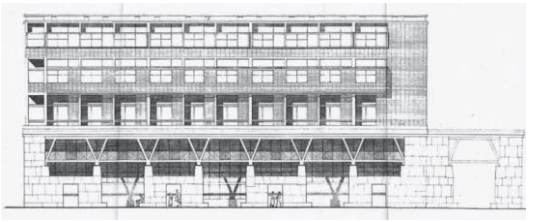
الصورة (1) يمين: مبنى معهد الرياضيات. المصدر :Michelucci, G. (2010),p. p.44 – **الصورة (2) يسار:** مبنى المعهد. المصدر موقع جامعة بولونيا- قسم الرياضيات.

7-1-3- سير العمل القائم على نمذجة معلومات المباني التاريخية:

في هذه الدراسة، تمّ تنظيم منهجية عمل قائمة على نمذجة معلومات المباني التاريخية (HBIM) لدعم التصميم الأولي لتدخلات تحسين كفاءة الطاقة، تمّ التركيز على نظام غلاف المبنى، إذ يُفترض أن تحسينه ضروري لخفض استهلاك الطاقة وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون أثناء التشغيل والصيانة. **تتطور هذه العملية وفقًا لمنهجية بحثية من أربع خطوات:**

1. **في المرحلة التوثيقية**، تُجمع المعلومات المتعلقة بالمبنى من خلال الدراسات التاريخية والأرشيفية، والمسوحات الرقمية، وعمليات البحث الميدانية، بالتشارك مع إدارة المبنى .
2. **المرحلة الحسابية** يتم إنشاء نموذج معلومات المباني التاريخية (HBIM) ونموذج طاقة المبنى (BEM) .
3. **في المرحلة التنبؤية**، تُحدد تدابير التدخل في مجال الطاقة، وتُحسب تكاليف البناء باستخدام بياناتBIM ، ويتم التنبؤ بالفوائد من حيث الطلب الحراري وتكاليف الطاقة للتدفئة ثم يُجري تحليل سريع متعدد المعايير مقارنة بين مجموعات التدخل المختلفة، ويُشير إلى الحل الأمثل لتحسين كفاءة الطاقة في المبنى.
4. **المرحلة التشغيلية** تراقب المعايير الديناميكية المتعلقة بإجراءات التدخل المختارة، وبالتالي إنشاء توأم رقمي ديناميكي Massafra, A., Predari, G. & Gulli, R. (2022), p152





الصورة (3): يمين، نموذج رقمي للمعهد وفق.HBIM – المصدر: Massafra, A., Predari, G. & Gulli, R. (2022), p153 – **الصورة (4): يسار**، الواجهة الأساسية للمعهد مطلة على الساحة – Michelucci, G. (2010),p. p.60,

-بالرجوع إلى دراسة الحالة المُحللة، تُظهر نتائج البحث أن تدخلات تحديث الطاقة بالغة الأهمية ليس فقط لتقليل الطلب على الطاقة، بل أيضًا لتقليل تكاليف التشغيل خلال دورة حياة المبنى. وتبين أنَّ ارتفاع تكاليف التدخل يُمكن أن يُقلل بشكل كبير من تكاليف الطاقة.

-يقدم التحليل السابق مجموعة من الحلول المصنفة ضمن استراتيجيتين رئيسيتين .(أ) تدخلات ذات أداء طاقة ممتاز، وتكاليف دورة حياة متوسطة، وتكاليف استثمار عالية .أما (ب) فتتألف من أداء طاقة متوسط، وتكاليف دورة حياة منخفضة، وتكاليف استثمار متوسطة.

— تم اختيار حلول يكون فيها استهلاك الطاقة بين 55 و75% وتنخفض تكاليف دورة الحياة بين 24 و43 %. أداء الطاقة الفعلي للمبنى لا يتطابق في كثير من الأحيان مع التوقعات. (تحليل الباحثة)

7-2- فندق قصر الريتز- اسبانيا، مدريد:

هو فندق فخم في مدينة مدريد الإسبانية، يقع في رقم 5 بلازا دي لا ليلتاد، في منطقة ريتيرو، تم افتتاحه عام 1910، وتديره حالياً سلسلة فنادق ماندارين أورينتال ويصنف بفندق خمس نجوم. (المصدر: ويكيبيديا)



الصورة (5): يمين، واجهة فندق الريتز بمدريد (إسبانيا) .تم تصميمه في عام 1908 من قبل تشارلز فريديريك مويس (1858-1914) وتم بناؤه في الفترة من 1908 إلى 1910 تحت إشراف لويس دي لانديتشو-1852)-1941) **الصورة (6): يسار**، العقار وساحة لاليلتاد. مرجع رقم [32]

7-2-1- لمحة تاريخية:

تمَّ افتتاح المبنى من قبل الملك ألفونسو، في موقع يُعتبر الأكثر صحة وهدوء في مدريد. كان الموقع المختار سابقًا عبارة عن حقل مفتوح، تشغله بعض الثكنات (التابعة لسيرك ميدان سباق

الخيل)، بالإضافة إلى حدائق مسرح تيفولي القديم، وكانت جميع هذه الأراضي في السابق تابعة لحدائق بوين ريتيرو في مدريد. يُعتبر أحد المباني الأولى في مدريد التي تستخدم الخرسانة المسلحة في بنائه. تم الانتهاء من أعمال البناء في 14 مايو 1910، وساهمت أشهر الشركات الإسبانية والأجنبية في ذلك الوقت في زخرفة غرفه. تغيَّرت وظيفته إلى سكن تقليدي عام 1975.

7-2-2- معمارياً:

يتكون المبنى من ستة طوابق بواجهات بسيطة على الطراز الفرنسي .مع 137 غرفة و30 جناحاً، وصالات كبيرة وحديقة محاطة بسياج حديدي ويمكن الوصول إليها من عدة مواقع، أحدها من مطعم.Goya [7] أُعيد افتتاح الفندق بعد تجديده بالكامل على يد المهندس المعماري رافائيل دي لاهوز والمصممين جيل وبواسييه [8] عام 2021. يقع داخل "المثلث الذهبي للفنون"، وهي منطقة تحددها أهم المتاحف في المدينة .المدخل الرئيسي يواجه بلازا دي لا ليلتاد .يحتوي الفندق على مطعمين أحدهما ذو طبيعة غير رسمية يقع في الحديقة والآخر من فئة أعلى يسمى جويا ويمتد إلى الطابق العلوي من التراس,hotel group, (2018),p2 .

7-2-3- سير العمل القائم على نمذجة معلومات المباني التاريخية: تجاوز مجرد الرسم ثلاثي الأبعاد إلى:

- دمج قنوات التكييف الحديثة (HVAC) وشبكات إطفاء الحريق دون اختراق السقوف المزخرفة أو الجدران الحاملة التاريخية.
- **تحليل الاستدامة** :محاكاة الأداء الحراري للمبنى المشيد قديماً لتحسين كفاءة الطاقة.
- **التوثيق الأثري** :تسجيل الحالة الإنشائية الدقيقة للواجهات الحجرية والقباب قبل البدء بأي تدخل جراحي معماري. يعمل نموذج الـ HBIM الآن كـ "توأم رقمي (Digital Twin) " لإدارة عمليات الصيانة والتشغيل للفندق من قبل شركة ماندارين أورينتال. يعتمد على المسح بالليزر (LiDAR) لتوثيق كل التفاصيل المعمارية الدقيقة.
- **إدارة التدهور الإنشائي** :استخدمت النماذج لتحليل الشقوق، الرطوبة، والتشوهات الهيكلية وربطها بقاعدة بيانات جغرافية (GIS) لاتخاذ قرارات ترميم دقيقة.

[7] https://es.wikipedia.org/wiki/Hotel_Ritz_(Madrid)
[8] https://en.wikipedia.org/wiki/Mandarin_Oriental_Ritz,_Madrid

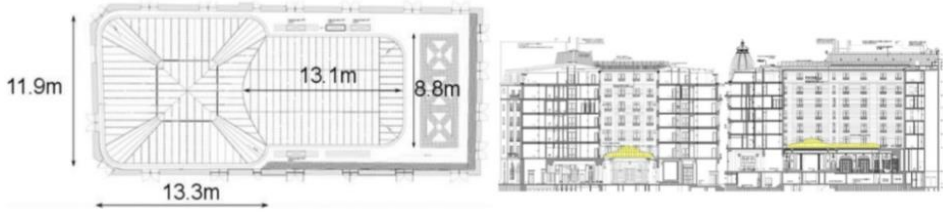
- **التكامل المعرفي** :دمج المعلومات التاريخية والأثرية داخل النموذج ثلاثي الأبعاد لدعم عمليات الصيانة المستقبلية. group sanjose[9], (2021),p.14& group sanjose, (2019),p.28,29

سيتم التعمق بتفصيل بناء القبة الزجاجية:

- **إعادة بناء القبة الزجاجية** :تمت استعادة القبة المركزية التاريخية التي كانت مخفية لأكثر من 80 عاماً. تم تصميم قبة جديدة خفيفة الوزن باستخدام قطاعات فولاذية منحنية على شكل حرف (T) لضمان أقصى درجات الشفافية ونفاذ الضوء الطبيعي. Bover, A., Torres, J.Hug Bitlloch, C. & Vilà,J.(2021), 276
- يتطلب فن العمارة الحديثة أشكالاً معمارية مبتكرة وهياكل أنيقة ذات تصميمات انسيابية، سعياً وراء الشفافية مع مراعاة العزل الحراري، كما يمثل تجديد المباني القائمة تحدياً كبيراً، حيث تُستخدم تقنيات جديدة ونماذج العناصر المتقدمة في البحث عن هياكل أكثر جمالية ذات تصميمات انسيابية، مع الحفاظ على جوهر المبنى.
- **مراحل العمل:**

تمَّ تحديد الأبعاد الرئيسية والحلول الهيكلية والمكونات .ثم وصف منهجية التحقق من الهيكل الفولاذي في القسم وتم وصف طريقة محاكاة الألواح الزجاجية. وتم تحديد وصف مقاومة العوامل الجوية، والمقاومة، والاستقرار بعد الكسر. Bover, A., Torres, J.Hug Bitlloch, C. & Vilà,J.(2021), 277

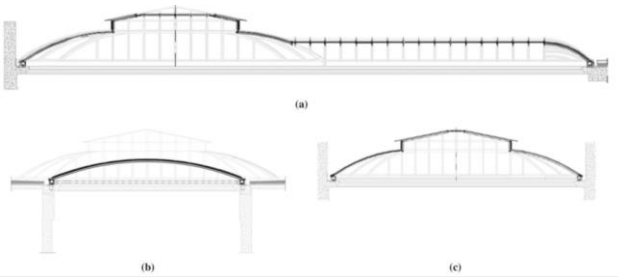
–وصف الهيكل:



الشكل (7): وصف تصميم النافذة السقفية .الأبعاد الرئيسية. Bover, A., Torres, J.Hug Bitlloch, C. & Vilà,J.(2021), 277

[9] تُعدّ مجموعة سان خوسيه، التي يقع مقرها الرئيسي في إسبانيا، شركة رائدة عالمياً في مجال الإنشاءات والهندسة، حيث تُنشر تقارير أنشطتها ومعلوماتها المؤسسية على موقعها الإلكتروني الرسمي. تتخصص الشركة في مشاريع البنية التحتية الكبرى، بالإضافة إلى ترميم المباني الحديثة والتاريخية.

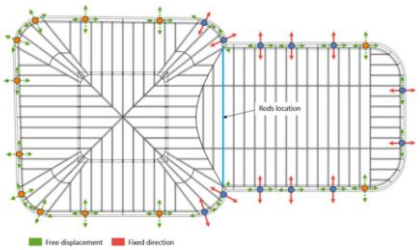
-الألواح الزجاجية:

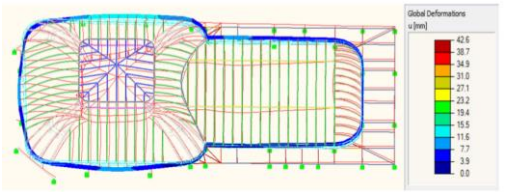


الشكل (8): الأجزاء الرئيسية للسقف الزجاجي – مقطع طولي ومقطعين عرضيين
Bover, A., Torres, J.Hug Bitlloch, C. & Vilà,J.(2021), 278

-التحقق من الهيكل (وصف النموذج)

-التحقق من الألواح الزجاجية (وصف النموذج)





الشكل (9)يمين: الانزلاقات المسموح فيها. Bover, A., Torres, J.Hug Bitlloch, C. & Vilà,J.(2021), 279

الشكل (10) يسار: أقصى انحراف للفتحة تحت أحمال التشغيل. Bover, A., Torres, J.Hug Bitlloch, C. & Vilà,J.(2021), 282

-اختبارات شاملة، اختبار مقاومة الماء، اختبار الصدمات

-عملية التصنيع والتجميع المسبق في ورشة عمل القاعة العليا والقاعة السفلى على التوالي، تركيب الألواح الزجاجية الهيكلية. اختبارات واسعة النطاق للفتحة السقفية: صُمم اختبارٌ شاملٌ مع مراعاة جزء تمثيلي من قاعة ألتو. أُجريت الاختبارات التالية ونجحت: • نفاذية الهواء ومنع تسرب الماء (الثابت) ,مقاومة أحمال الرياح وفقًا للمعيار • مقاومة أحمال الرياح المتزايدة تم تقييم تأثير ومقاومة ما بعد الكسر وكل ذلك وفق معايير عالمية معتمدة. over, A., Torres, J.Hug Bitlloch, C. & Vilà,J.(2021), 284

8- التقييم والتحليل: تمَّ توصيف الحالات الدراسية السابقة وسيتم اختبار نتائج القسم النظري وفق الحالتين السابقتين، يوضح **الجدول (2)** مبادئ الاستدامة المحققة في المثالين باستخدام التوائم الرقمية وبلغ عددها ستة من أصل 9. (إعداد الباحثة)

نقاط الاستدامة	مثال 1	مثال 2
المواقع المستدامة	-	√
جودة البيئة الداخلية	√	√
إدارة المياه وتقليل الاستهلاك	-	√
إدارة الطاقة وتقليل الاستهلاك	√	√
إدارة الموارد والمواد الإقليمية والمستدامة	-	-
الاقتصاد الدائري	√	√
الحفاظ على الهيكل الأصلي في حالة كان المبنى قائم قدر الإمكان	√	√
المشاركة المجتمعية	√	-
الابتكار في التقنيات لتحقيق الاستدامة	√	√
9	6	6

الجدول (2): مبادئ الاستدامة المحققة في المثالين وبلغ عددها ستة من أصل 9. (إعداد الباحثة)

يشير الجدول (3) إلى الخصائص المستدامة التي يتمتع بها البناء التاريخي وحققت 9 من أصل 13 في المثال الأول و10 من أصل 13 في المثال الثاني. ونلاحظ تثقيل لبند الطاقة بشكل عام (كفاءة الطاقة والطاقة الكامنة) والتوجيه والتكيف وإعادة الاستخدام. **ويشير الرمز√ وتكراره إلى عدد المبادئ المستدامة (أي عدد الأسهم وفق الشكل 5)** لينتج الجدول التالي:

الاستدامة في البناء التاريخي	مثال 1	مثال 2
الحفظ	–	√
كفاءة الطاقة	√	√
اختيار المواد	-	-
التكيف وإعادة الاستخدام	√√	√√
اعتبارات الموقع والمناظر الطبيعية	-	√

ترشيد الطاقة الكامنة	√√	√√
تحسين أداء البناء ومنها استدامة المكان	√	√
خفض استهلاك الطاقة في الأبنية	√	-
تعظيم كفاءة الطاقة والمياه	√	√
مراقبة استهلاك الطاقة والمياه	√	√
التوجيه	√	√√
وسائل التظليل	√	-
تدابير ترشيد استهلاك المياه	-	√
13	9	10

الجدول (3): الخصائص المستدامة المتوفرة في المثالين السابقين. إعداد الباحثة

يشير الجدول (4): الخصائص المستدامة المرتبطة باستخدام التوائم الرقمية وحققت 13 من أصل 14 في المثال الأول والثاني. ونلاحظ تثقيل لبند إدارة الطاقة بشكل عام إلى جانب نهج دورة الحياة والاستدامة إضافة لاستخدام تقنيات التوأمة الرقمية. **ويشير الرمز√ وتكراره إلى عدد المبادئ المستدامة (عدد الأسهم)** وفق الشكل (6) لينتج الجدول التالي:

نقاط التوأمة الرقمية والاستدامة	مثال 1	مثال 2
نهج دورة الحياة للاستدامة	√√	√√√
كفاءة الطاقة والكربون الكامن	√√	√√
المرونة المائية	–	√
إدارة الموارد	√√	√√
المزايا التقنية	√	√
إشراك أصحاب المصلحة	√	_
تحسين التصميم	√	√
راحة شاغلي البناء	√	√
تشغيل وصيانة المبنى	√	√
محاكاة استهلاك الطاقة	√	√
دمج الطاقة المتجددة	√	√
الحفاظ على الأبنية التاريخية	√	√
المراقبة والتحكم الفعلي	√	√

النمذجة والمحاكاة والصيانة التنبؤية	√	√
14	13	13

الجدول (4): الخصائص المستدامة المحققة والمرتبطة باستخدام التوائم الرقمية. (إعداد الباحثة)

9- نتائج الدراسة التحليلية السابقة:

- **القيمة البيئية التاريخية** :بينت نتائج تقييم الحالتين العالميتين في(الجدول 3) امتلاك المباني التاريخية لخصائص بيئية متميزة ناتجة عن حلولها التصميمية وموادها الإنشائية التقليدية.
- **دور التوأمة الرقمية** :أثبت التحليل السابق في الجدول رقم 4 قدرة التوائم الرقمية على دعم استدامة هذا الإرث المعماري عبر عدة محاور، تصدرها بند "كفاءة الطاقة" من خلال خفض الاستهلاك، محاكاة الطاقة المتجددة، وتطبيق نهج دورة الحياة الشامل وإدارة الموارد.
- **تحقق هدف البحث** :تؤكد هذه المؤشرات تحقق هدف الدراسة، والذي يرمي إلى أهمية اعتماد أداة تكنولوجية متقدمة تعزز كفاءة الأبنية التاريخية وتحافظ على استدامتها مستقبلاً.

10- حالة محلية بناء العابد في دمشق:

10-1- لمحة تاريخية:



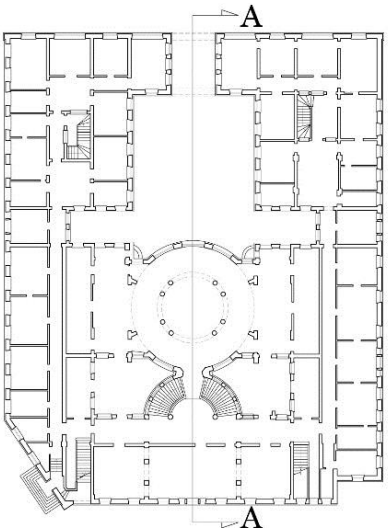
ينتمي هذا البناء للطراز الأوروبي المختلف شكلاً ونظاماً وهدفاً عن البناء المحلي (الخانات)، ويمثل مرحلة هامة في بناء الفنادق في دمشق. فقد أُنشئ هذا البناء ليكون فندقاً ولكن ظروف الحرب العالمية الأولى دفعت لاستخدامه مشفى عسكري ثم منزلاً للعساكر ومازال يحمل اسم المنزل.

الصورة (7): سرايا عزت باشا العابد سنة 1910م مكان قصر والي دمشق. [31]

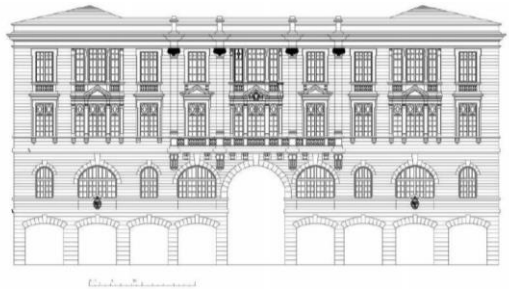
تعود ملكية البناء في الأساس إلى عزة باشا العابد، وبفضل نفوذه في البلاط السلطاني استقدم (داراندە)[10] الإسباني الأصل من تركيا للإشراف على البناء وفق طراز مباني القرن التاسع عشر الأوروبية وانتهى سنة 1910 ليكون فندقاً. الشيخ قاسم، رفاه.(1989-1990). انتهى بناؤه عام 1910. وهو عبارة عن بناء لا يقل أهمية عن قصر العظم في ذلك الوقت حيث شكل من خلاله الواجهة الجنوبية للساحة حيث يقوم دار الحكومة، أما الواجهة الشمالية جامع يلبغا وبناء العدلية والبرق والبريد والواجهة الغربية بناء البلدية والطبابة. الشيخ قاسم، رفاه.(1989-1990). يسيطر مبنى العابد على ساحة المرجة بأهميته وقدمه وطراز بنائه بالإضافة إلى حجمه وارتفاعه.

10-2- معمارياً:

-يحتوي الطابق الأرضي على المدخل الرئيسي وهو مسقوف ويؤدي إلى الباحة السماوية الشمالية الخاصة بالمبنى وفيها بحرة ماء ويمكن الوصول إلى هذه الساحة عبر مدخلين جانبيين مسقوفين أيضاً. يتضمن الطابق الأول مدخل من جادة رامي ذو مطلع حجري (ست درجات)، ويحتوي داخله 41 غرفة ومرتفقين وقاعة دائرية كبيرة وهو بارتفاع 550سم.



[10] Fernando de Aranda (Madrid 1878 Damascus 1968)was the son of the compouser Fernando de Aranda who served at the court of Abdül Hamid II between 1886 and 1909, he settled down in Damascus at the begining of the 20th century and also became homorary consul of Spain during World War 1st



يظهر المخطط المجاور المسقط الأفقي للطابق الأرضي لبناء العابد. ويشغل هذا الطابق فعاليات
عدة تتنوع بين تجارية وصناعية وإدرابة.
بالإضافة إلى مقطع طولي في البناء توضح عليه القبة المركزية لإنارة الجزء الوسطي للبناء .



الشكل (11): الطابق الأرضي لمبنى العابد.
– **الشكل (12):** مقطع في بناء العابد.
المصدر: مكتب عنبر بتصرف الباحثة **الشكل (13):** الواجهة الشمالية لمبنى العابد. المصدر: ورشة عمل في كلية الهندسة المعمارية 2026 .

–يحتوي الطابق الثاني على /76/غرفة للسكن وخمسة ممرات رئيسية وثلاثة مرتفقات، بالإضافة إلى وجود شرفة في الواجهة الرئيسية وبهو غير مسقوف مطل على الباحات السماوية الخلفية وأربع دورات مياه، ودرجين حجر يصلان إلى الطابق الثالث والأخير.

–يضم عدد من الغرف /44/ للسكن وثلاثة ممرات رئيسية وثلاثة مرتفقات وست دورات مياه بالإضافة إلى سطحين قرميد يغطيان الجزء الجنوبي من المبنى ويُستخدمان كمستودعات ويوجد. (الباحثة)

10–3– تحليل الاستدامة في البناء:

–يقع في مركز المدينة ويطل على ساحة عامة ويُعتبر سهل الوصول.

–مادة البناء الأساسية هي الحجر المعروف بخصائصه البيئية العالية بالحفاظ على الحرارة والكتامة ومقاومة عوامل الطقس الخارجية، إضافةً إلى الآجر والطين.

-تصل الإنارة الطبيعية إلى كافة الغرف في البناء صيفاً وتتناسب مساحة الغرف مع مساحة الفتح فيها. ويبلغ ارتفاع الأسقف 470-550 سم.

-تبلغ نسبة الفتح على الواجهة الشمالية 32%، والواجهة الجنوبية 16.02%، والواجهة الشرقية 19.29%، والواجهة الغربية. حوالي 25.39%. ع.

-الباحة السماوية الأساسية وتبلغ مساحتها 344م^2 ومساحة المرتفقين الجنوبيين 100م^2 وبالتالي نسبة الانفتاح للبناء 20.96%.

-السقف الأخير فهو سقف جمالوني من القرميد والخشب مائل يشكل الغلاف العلوي للبناء ويحميه من العوالق المحمولة في الهواء ومن تراكم تأثيرات العوامل الجوية (أمطار وثلوج).

-يساهم استعمال هذه الأسقف تلبية العديد من المتطلبات البيئية من حيث سرعة تصريف مياه الأمطار، وزيادة كمية الهواء الداخلة إلى المبنى، وبالتالي التهوية المستمرة للفراغات إضافةً إلى زيادة الكتلة الهوائية الداخلية، كما حققت فوائد حرارية.

-قامت المحافظة ومكتب عنبر بتنظيف الواجهات الخارجية للتخلص من التلوث عام 2007.

-يُخصص للبناء حوالي 40 م^3 من الماء وذلك تبعاً لقوانين البناء القديمة. وإلى الآن يستهلك البناء ككل كميات أقل من العداد. [11]

-قلة الخدمات في البناء تؤدي إلى التقليل من استهلاك المياه والكهرباء. (تحليل الباحثة)

- **في دراسة حرارية للبناء يظهر مايلي:** المصدر ورشة عمل في كلية الهندسة المعمارية 2026.

توجيه المبنى: يستقبل الفناء الداخلي للمبنى الضوء، بحيث يساعد على التهوية الطبيعية وتوفير الإضاءة دون اكتساب حراري مفرط.

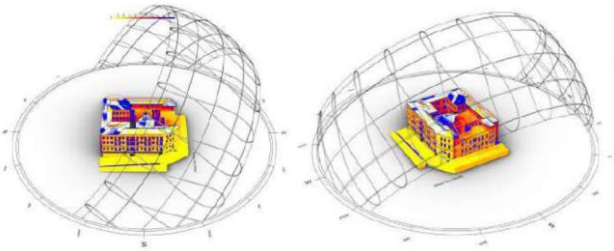
دراسة الغلاف:

تحليل الكتلة والمسار: نلاحظ أنَّ الجهة الجنوبية والشرقية من المبنى هي الأكثر تلوناً بالأصفر والبرتقالي، مما يعني أنها "نقاط ساخنة" تتطلب معالجات حرارية مكثفة. المبنى يظلل نفسه بنفسه؛ حيث تظهر الواجهة الشمالية والمناطق الغائرة باللون الأزرق، مما يوفر راحة حرارية طبيعية.

النتيجة: نجاح استراتيجية "الفناء" في مبنى العابد؛ حيث يوفر الفناء إضاءة طبيعية دون السماح للشمس المباشرة بالدخول لساعات طويلة، مما يمنع الاحتباس الحراري داخل الممرات الداخلية.

[11] تحليل الباحثة.

توزيع الظلال الساقطة الأجزاء السفلية من الواجهة تظهر (اللون الأزرق/البنفسجي)، مما يعني أن الطابق الأرضي محمي بكتلة الطوابق العليا، وهذا يفسر برودة المحلات التجارية في مبنى العابد صيفاً.



الشكل (14): دراسة حرارية لبناء العابد.

10-4- الخلاصة البيئية:

كفاءة التصميم: ينجح المبنى في حماية 30 % من مساحته كلياً من الإشعاع المباشر بفضل الفناء الداخلي، وهي نسبة ممتازة للمباني التاريخية.

الفجوة الحرارية: هناك فارق يصل إلى 2000 ساعة تعرض بين السطح العلوي (الأصفر) وبين قاع الفناء (الأزرق)، مما يخلق فرقاً في ضغط الهواء يساعد على حركة النسيم داخل المبنى.

نقطة الضعف: تتركز في الأسطح الأفقية التي تمثل 22 % من الكتلة، والتي إذا تم عزلها، يمكن رفع كفاءة المبنى الحرارية الإجمالية بنسبة تصل إلى 40%. [12]

يشير **الجدول (5) إلى** تقييم مبادئ الاستدامة المتوفرة في المبنى بوضعه الحالي.

نقاط الاستدامة	مثال 3	الاستدامة في البناء التاريخي	مثال 3
المواقع المستدامة	√	الحفظ	√
جودة البيئة الداخلية	√	كفاءة الطاقة	–
إدارة المياه وتقليل الاستهلاك	–	اختيار المواد	√
إدارة الطاقة وتقليل الاستهلاك	–	التكيف وإعادة الاستخدام	√√

[12] ورشة عمل في كلية الهندسة المعمارية – جامعة دمشق

دور التوائم الرقمية في تعزيز استدامة الأبنية التاريخية

إدارة الموارد والمواد الإقليمية والمستدامة	√	اعتبارات الموقع والمناظر الطبيعية	√
الاقتصاد الدائري	√	ترشيد الطاقة الكامنة	√√
الحفاظ على الهيكل الأصلي في حالة كان المبنى قائم قدر الإمكان	√	تحسين أداء البناء ومنها استدامة المكان	√
المشاركة المجتمعية	-	خفض استهلاك الطاقة في الأبنية	-
الابتكار في التقنيات لتحقيق الاستدامة	–	تعظيم كفاءة الطاقة والمياه	–
9	5	مراقبة استهلاك الطاقة والمياه	-
		التوجيه	√√
		وسائل التظليل	-
		تدابير ترشيد استهلاك المياه	-
		13	7

الجدول (5): تقييم مبادئ الاستدامة المتوفرة في المبنى بوضعه الحالي وخصائص الاستدامة المحققة في البناء بشكل طبيعي ويظهر ذلك ضعف في تدابير خفض استهلاك الطاقة، وبند كفاءة الطاقة ويشير الرمز√ وتكراره إلى عدد المبادئ المستدامة المحققة وفق الشكل 5 الوراد في ص14. (إعداد الباحثة)

نتيجة تحليل المحلية: تشير تقييم الحالة السابقة المحلية إلى أهمية اعتماد التوائم الرقمية في خطة تأهيله لما يتمتع به هذا البناء من ميزات بيئية الأمر الذي يساهم في تعزيزها، وخاصةً على مستوى كفاءَة الطاقة.

11- النتائج العامة، توصَّل البحث إلى النتائج التالية:

على مستوى التوأم الرقمي:

- مفهوم وطبيعة التوأم الرقم: أثبتت الدراسة أن التوأم الرقمي ليس مجرد مجسم أو صورة ثلاثية الأبعاد ثابتة، بل هو نظام تفاعلي حي. يتحرك هذا النظام في اتجاهين متبادلين: ينقل التغييرات من المبنى الحقيقي إلى النسخة الافتراضية، ويرسل الحلول من النسخة الافتراضية إلى أرض الواقع، وذلك بالاعتماد على تدفق مستمر للبيانات بشكل دوري.

- تتجاوز تقنية التوأمة الرقمية مفهوم النمذجة المرئية الساكنة للمبنى، لتشكل نظام إدارة ديناميكي يهدف إلى إطالة العمر الافتراضي للمنشأة التاريخية، مع رفع كفاءتها التشغيلية وتقليص تكاليف الصيانة إلى حدها الأدنى

على مستوى الاستدامة في البناء التاريخي:

- **أولويات التطبيق الرقمي في التشييد** :تخلص النتائج إلى أنَّ الاستدامة البيئية والإنشائية تمثل التطبيق الراهن الأعلى كفاءة والأكثر أهميةً لتقنيات التوائم الرقمية ضمن قطاع البناء والتشييد.
- **تكامل الثلاثية المنهجية** :تحقق المنهجية المقترحة تكاملاً بنيوياً بين (التوأمة الرقمية، الأبنية التاريخية، معايير الاستدامة)، مما يضمن تحويل المنشآت التاريخية إلى مباني ذكية قادرة على التكيف المناخي، والانتقال من إستراتيجية "الصيانة العلاجية كرد فعل" إلى "الإدارة الاستباقية الوقائية.(Proactive Maintenance) " وهي جوهر الاستدامة في البناء التاريخي.
- **الاستجابة الفيزيائية للمواد التقليدية** :تبدي الهياكل التاريخية (المبنية من الحجر، الخشب، والطوب) حساسية وحركية عالية تجاه التغيرات الجوية المحيطة مقارنة بالمباني الحديثة، مما يجعلها النمط المعماري الأكثر احتياجاً لأدوات المحاكاة الرقمية المستمرة.

على مستوى الاستدامة بأبعادها الثلاث:

- **التحسين البيئي والحراري:** تتيح محاكاة التوأم الرقمي إمكانية التحليل الديناميكي للأنظمة الحرارية داخل الكتلة المعمارية، مما يضمن الوصول إلى الأداء الحراري الأمثل للجدران الحجرية السميكة، وتقليل استهلاك الطاقة لعمليات التدفئة والتبريد.
- **الجدوى الاقتصادية والإنشائية** :يسهم الاعتماد على الصيانة الوقائية الرقمية في إطالة العمر الافتراضي للمنشأة الأثرية (استدامة إنشائية)، وضبط وتوجيه نفقات التشغيل، فضلاً عن خفض التكاليف الناتجة عن عمليات الترميم العشوائي التقليدية (استدامة اقتصادية).

على المستوى التطبيقي:

- **التحقق التجريبي من كفاءة الطاقة** :أكدت المخرجات البيانية والتحليلية الواردة في (المخطط 1 والمخطط 2) كفاءة التوائم الرقمية في تعزيز بنود ترشيد الطاقة، وهو ما تم التحقق من صحته من خلال الحالتين الدراسيتين العالميتين المرجعتين.
- **تقييم الحالة الدراسية المحلية (بناء العابد)** :أظهرت نتائج التقييم لـ "بناء العابد" امتلاكه لخصائص ومؤشرات استدامة مدمجة جيدة، إلا أنَّها سجلت قصوراً واضحاً على مستوى "كفاءة الطاقة". وبناءً عليه، يثبت البحث الأهمية العلمية لاعتماد تطبيقات التوأم الرقمي لرفع كفاءة الطاقة أثناء خطط إعادة التأهيل، وهي نتيجة قابلة للتعميم القياسي على غالبية الأبنية التاريخية في مدينة دمشق القديمة لتماثل الخصائص الفيزيائية والإنشائية.

12- المراجع:

1- الشيخ قاسم، رفاه.(1989-1990). ***دراسة تحليلية توثيقية لمبنى العابد وعلاقته بساحة المرجة***، رسالة دبلوم، جامعة دمشق. دمشق،سورية.

[2]. سليمان، صبا، (2026). ***الذكاء الصناعي ودوره في دراسة التاريخ والآثار***، بحث منشور، مجلة جامعة حمص سلسلة العلوم الهندسية المدنية والمعمارية، المجلد 48، العدد 3، حمص، سورية.

[3]. Akyol, G.& Berkay Avci, A. (2025), ***Digital Twins in Heritage Conservation and Visitor Engagement: Comparative Case Studies from Four Historic Sites***, Periodica Polytechnica Architecture, 56(2–3), pp. 80–93, Budapest, Romania.

[4]. Batziou, E. & others, (2025), ***Digital Twin Development for Cultural Heritage Buildings: A Multimodal Approach to Simulating Energy Performance***, ACM IMX Workshops,USA. https://doi.org/10.5753/imxw.2025.9461.

[5]. Bortolini, r. & others, (2022), **Digital Twins' Applications for Building Energy Efficiency: A Review**, Building Energy Efficiency: Energies 2022, 15, 7002, https://doi.org/10.3390/en15197002. Basel, Switzerland.

[6]. Bover, A., Torres, J.Hug Bitlloch, C. & Vilà,J.(2021), ***Skylight of the hotel RITZ: case study***, © Springer Nature Switzerland AG 2020.

[7]. Chen, Z. & Huang, L. (2020), ***Digital Twin in Circular Economy: Remanufacturing in Construction***, World Sustainable Built Environment conference, Series: Earth and Environmental Science 588, Bristol, UK.

[8]. Envision & institute for Sustainable infrastructure, (2025), ***Advancing Infrastructure Sustainability Through Digital Twins***, Report Card for America's Infrastructure). Washington, D.C.

[9]. Ewart, L. & Zuecco, V. (2019), ***Heritage Building Information Modelling (HBIM): A review of published case studies***, This research was carried out as part of an Erasmus+ Student Traineeship between the Universities of Reading, UK and Padova, Italy.

[10]. ecclesiastical.ca, (2023), ***Sustainability for Heritage Buildings: Balancing Preservation and Environmental Responsibility***, white paper, Toronto, Canada.

[11]. group sanjose, (2021), ***information of activities, www.gruposanjose.biz.*** Pontevedra, Spain

[12]. group sanjose, (2019), ***activity report, www.gruposanjose.biz.*** Pontevedra, Spain

[13]. Hosamo, H. (2023), ***Digital Twin technology toward more sustainable buildings Predictive maintenance, energy optimization and occupants' comfort in non-residential buildings***, Doctoral Dissertation for the Degree Philosophiae Doctor (Ph.D.) at the Faculty of Engineering and Science, Specialisation in Renewable Energy, University of Agder, Norway.

[14]. hotel group, (2018), ***Hotel Ritz, Madrid Announces Restoration***, news release, Madrid.

[15]. KAKDAŞ ATEŞ, D. & AKALP, (S.), (2025), ***The Future of Heritage: Digital Restoration and Intelligent Modeling Approaches in Historic Buildings***, International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, vol 9, Skopje, North Macedonia.

[16]. Karatzas, S., Lazari, V., Fouseki, K., Natalia Pracchi, V. & Balaskas, E. (2024), ***Digital twins-enabled heritage buildings management through social dynamics***, Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development, Vol. 16 No. 7, 2026, pp. 150-166, Bingley, UK.

[17]. Lemian, D. & Bode, F. (2025), ***Digital twins in the building sector: implementation and key features***, E3S Web of Conferences paper, Romania.

[18]. L. Webb, A. (2017), ***Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods***, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 77, https://www.sciencedirect.com. Netherlands

[19]. Liu, N.F.; Liang, X.X.; Zhang, Y. (2024), ***A Digital-twin Based Conservation of Campus Historic Buildings under Sustainable Development Framework***, (60th ISOCARP World Planning Congress "Reinventing The (In)visible Cities" Siena, Italy.

[20]. Massafra, A., Predari, G. & Gulli, R. (2022), ***Towards digital twin driven cultural heritage management: a HBIM-based workflow for improvement of modern buildings***, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLVI-5/W1, Prague, Czech Republic.

[21]. Massafra, A., Costantino, C., Predari, G. & Gulli, R. (2024), ***Modern Construction in Italy: the Institute of Mathematics in Bologna***, 8th International Congress on Construction History – Zurich.

[22]. M. Okba, E. &E. Embaby, M. (2013), ***Sustainability and Heritage Buildings***, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 2 Issue 8, Bangalore, India.

[23]. Michelucci, G. (2010), ***I nuovi istituti di matematica e geometria***, Book, ISBN 978-88-902128-6-4, Bologna, Italy.

[24]. NI, Z. & others, (2025), ***Parametric Digital Twins for Preserving Historic Buildings: A Case Study at Löfstad Castle in Östergötland***, Sweden, IEEE Access Journal, Vol 13, USA.

[25]. Pr´edhumeau, M. (2025), ***Sustainable Urban Digital Twins: Reducing, Reusing, Recycling Models***, The 19th International Conference on Computational Urban Planning and Urban Management (CUPUM), CASA, UCL, Jun 2025, London, United Kingdom.

[26]. Standardization Council Industrie 4.0), (2024), ***Digital twin reference model and standardization to realize a sustainable industry***, THE ROBOT REVOLUTION & INDUSTRIAL IOT INITIATIVE, Tokyo, Japan.

[27]. Sghiri, A. & others, (2025), ***Leveraging Digital Twins for Enhancing Building Energy Efficiency***: A Literature Review of Applications, Technologies, and Challenges. Buildings, https://doi.org/10.3390/buildings15030498, Basel, Switzerland.

[28]. Wright, L. & Davidson, S., (2020), ***How to tell the difference between a model and a digital twin***, Advanced modeling and simulation in engineering sciences, no 7, vol 13, Zug, Switzerland.

[29]. W.H. Fung, I., Tsang, Y., W.Y. Tam, V., Xu,Y. & C.K. Mok, E. (2017), ***A review on historic building conservation: A comparison between Hong Kong and Macau systems***, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 71. https://www.sciencedirect.com. Netherland

[30]. Yang, p.& others, (2020), ***Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information techniques***, Journal of Cultural Heritage, Volume 46, https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.05.008 .Paris, France.

[31]. www.tishreen.inet.sy الموقع الإلكتروني لجريدة تشرين

[32]. Wikipedia.com

انتهى البحث