

توظيف التصوير المساحي والتصنيع الرقمي في توثيق وإعادة إنتاج مقرنصات

القصر العباسي

الباحثة : دانيه اياد حكمت داود

كلية الهندسة / جامعة بغداد

danial.Ayad2404m@coeng.uobaghdad.edu.iq

أ.د. اسامة عبد المنعم

كلية الهندسة / جامعة بغداد

osamah.altameemi@coeng.uobaghdad.edu.iq

تاريخ النشر : ٢٠٢٦/٩/٣٠

تاريخ القبول: ٢٠٢٦/٣/٨

تاريخ الاستلام: ٢٠٢٦/١/١٨

DOI: 10.54721/jrashc.23.3.1786

المخلص :

تعد المقرنصات من أكثر الأنظمة المعمارية تعقيداً في التراث الإسلامي، إذ تتميز بهندستها ثلاثية الأبعاد ذات التكوين الطبقي، وبدمجها بين الوظائف الإنشائية والزخرفية. ويؤدي هذا التعقيد، إلى جانب قابليتها العالية للتدهور، إلى جعل أساليب التوثيق التقليدية المعتمدة على الرسومات ثنائية الأبعاد والرفع اليدوي غير كافية. وعلى الرغم من الإمكانيات التي توفرها التقنيات الرقمية، ما تزال مسارات العمل المتكاملة والمتاحة لتوثيق المقرنصات محدودة، ولا سيما في السياق العراقي. تقدم هذه الدراسة مسار عمل رقمياً تطبيقياً لتوثيق وإعادة إنتاج المقرنصات التاريخية باستخدام أدوات متاحة وسهلة الوصول. وتتكامل المنهجية المقترحة بين التصوير المساحي المعتمد على الهواتف الذكية، وإعادة البناء ثلاثي الأبعاد باستخدام البرمجيات مفتوحة المصدر، والنمذجة المعمارية الرقمية، وتقنيات التصنيع بالإضافة، وقد طبقت على قوس المقرنصات في قصر العباسي بمدينة بغداد بوصفه دراسة حالة ممثلة. وتُظهر النتائج أن التصوير المساحي قادر على توثيق الهندسة المعقدة للمقرنصات بفاعلية، إلا أن المخرجات الأولية تتطلب تحققاً منهجياً وتفسيراً معمارياً دقيقاً لتحقيق موثوقية قياسية عالية. وبعد إعادة المعايرة، جرى تقليص الانحرافات البعدية إلى حدود ± 2 سم. وتخلص الدراسة إلى أن مسار العمل الرقمي القائم على التفسير المعماري يوفّر منهجاً دقيقاً، غير تدخلي، وقابلاً للتكرار في توثيق العناصر التراثية الزخرفية المعقدة، بما يدعم ممارسات الحفاظ المستندة إلى المعرفة، مع مراعاة الأصالة والقيود المرتبطة بالموارد.

الكلمات المفتاحية : مقرنصات، التصوير المساحي، النمذجة ثلاثية الأبعاد، التصنيع الرقمي، التوثيق الرقمي، الحفاظ المعماري، التراث المعماري الإسلامي.

Employing Photogrammetry and Digital Fabrication in the Documentation and Reproduction of the Muqarnas of the Abbasid Palace

The researcher . Daniah Ayad Hikmat Dawood
College of Engineering / University of Baghdad,
Assist.prof. Dr. Osamma Abdulmunem
College of Engineering / University of Baghdad

Abstract:

Muqarnas are among the most complex architectural systems in Islamic heritage, characterized by their three-dimensional, layered geometry and integration of structural and ornamental functions. Their complexity and vulnerability to deterioration render conventional documentation methods based on two-dimensional drawings and manual surveys inadequate. Despite the potential of digital technologies, integrated and accessible workflows for documenting muqarnas remain limited, particularly in the Iraqi context. This study presents an applied digital workflow for documenting and reproducing historic muqarnas using accessible tools. The methodology integrates smartphone-based photogrammetry, open-source three-dimensional reconstruction, architectural digital modeling, and additive manufacturing, and is applied to the muqarnas arch of the Abbasid Palace in Baghdad as a representative case study. The results demonstrate that photogrammetry can effectively capture the intricate geometry of muqarnas; however, raw outputs require systematic verification and architectural interpretation to achieve metric reliability. After recalibration, dimensional deviations were reduced to within ± 2 cm. The study concludes that an interpretation-driven digital workflow provides an accurate, non-invasive, and reproducible approach to documenting complex ornamental heritage elements, supporting informed conservation practices while remaining sensitive to authenticity and resource constraints.

Keywords: Muqarnas, Photogrammetry, 3D Modeling, Digital Fabrication, Digital Documentation, Architectural Conservation, Islamic Architectural Heritage.

المقدمة :

تُعدّ المقرنصات من أبرز العناصر المعمارية في العمارة الإسلامية وأكثرها تعقيداً من حيث التكوين الهندسي والفراغي، إذ تمثل نظاماً معمارياً ثلاثي الأبعاد يجمع بين الوظيفة الإنشائية والدور الزخرفي والتعبير الجمالي. وقد استُخدمت المقرنصات على نطاق واسع في العمارة الإسلامية بوصفها عنصراً انتقاليّاً بين الكتل المعمارية المختلفة، فضلاً عن دورها في إبراز القيم الرمزية والفنية للمباني التاريخية.

ونظراً لطبيعتها التركيبية وتكرار وحداتها الهندسية، تواجه المقرنصات تحديات كبيرة في التوثيق والدراسة باستخدام الأساليب التقليدية المعتمدة على الرسومات ثنائية الأبعاد والرسم اليدوي، والتي غالباً ما تعجز عن تمثيل العمق الفراغي والعلاقات الهندسية المعقدة بدقة كافية. ويؤدي هذا القصور إلى توثيق غير مكتمل أو غير دقيق، ما ينعكس سلباً على جهود الحفاظ والترميم، ويجعل هذه العناصر المعمارية عرضة للتدهور وفقدان جزء من قيمتها الأصلية.

في السنوات الأخيرة، شهدت تقنيات التوثيق الرقمي تطوراً ملحوظاً، ولا سيما في مجالات التصوير المساحي (Photogrammetry)، والنمذجة ثلاثية الأبعاد، والتصنيع الرقمي، مما أتاح إمكانيات جديدة لتوثيق العناصر المعمارية التاريخية بدقة عالية وبأساليب غير تدخلية. وقد ساهمت هذه التقنيات في تحسين فهم الأشكال المعمارية المعقدة وإمكانية إعادة إنتاجها لأغراض التوثيق أو العرض أو الترميم.

ومع ذلك، ما تزال الدراسات التي تقدم مسارات عمل رقمية متكاملة ومناسبة لتوثيق أنظمة معمارية معقدة، مثل المقرنصات، محدودة، ولا سيما في السياق المعماري العراقي الذي يتميز بغنى تراثه المعماري وتعرض العديد من عناصره التاريخية لمخاطر الإهمال والتدهور. ومن هنا تبرز الحاجة إلى تطوير منهج تطبيقي يجمع بين الدقة العلمية وإمكانية التطبيق العملي باستخدام أدوات رقمية متاحة، مع مراعاة القيم الثقافية والأصالة المعمارية.

مشكلة البحث :

تتمثل مشكلة البحث في قصور أساليب التوثيق التقليدية عن تمثيل التكوين الهندسي المعقدة للمقرنصات بدقة، إضافة إلى غياب مسارات عمل رقمية متكاملة ومناسبة للسياق العراقي تعتمد على أدوات متاحة وقابلة للتطبيق في توثيق وتحليل وإعادة إنتاج هذه العناصر المعمارية التاريخية، بما يدعم جهود الحفاظ والترميم دون المساس بأصالتها.

هدف البحث :

يهدف البحث إلى اقتراح وتقييم مسار عمل رقمي تطبيقي لتوثيق، تحليل وإعادة إنتاج المقرنصات التاريخية باستخدام تقنيات التصوير المساحي، والنمذجة ثلاثية الأبعاد، والتصنيع الرقمي، وذلك من خلال دراسة حالة من التراث المعماري العراقي، بهدف:

١. تحقيق دقة هندسية عالية في التوثيق
٢. دعم ممارسات الحفاظ المعماري المستندة إلى البيانات الرقمية
٣. ضمان التوافق مع الأصالة المعمارية والقيم الثقافية

فرضية البحث :

ينطلق البحث من فرضية مفادها أن اعتماد مسار عمل رقمي متكامل قائم على التفسير المعماري، ويستخدم أدوات رقمية متاحة، يمكن أن يحقق توثيقاً دقيقاً وغير تدخل للمقرنصات التاريخية، ويتفوق على الأساليب التقليدية في تمثيل تعقيدها الهندسي، كما يساهم في دعم قرارات الحفاظ والترميم مع الحفاظ على الأصالة المعمارية والقيم الثقافية، لا سيما في السياق المعماري العراقي.

٢. المقرنصات كنظام معماري

تُعدّ المقرنصات على نطاق واسع من أكثر الأنظمة المعمارية تعقيداً في العمارة الإسلامية، إذ تتميز بتكوينها الثلاثي الأبعاد، و وحداتها المتكرره. فهي لا تؤدي دور عناصر زخرفية منفصلة فحسب، بل تعمل كنظم انتقالية تربط بين القباب والأقبيبة والدعائم الرأسية. حيث يتم إنشاء المقرنصات باستخدام سلسلة من الأشكال الهندسية المتشابكة، مثل المربعات والمعينات، والتي تخلق سطوح مجزأ يتم توزيع الوزن بالتساوي عبرها^(١) وتكمن أهميتها في التكامل بين الهندسة والإنشاء والزخرفة، مما يجعلها محوراً أساسياً في دراسات التشكيل الفراغي والدلالة المعمارية^(٢) وقد تناولت الدراسات السابقة المقرنصات بشكل أساسي من خلال التصنيف النمطي، والتجريد الهندسي، والتحليل النسبي. وعلى الرغم من أن هذه المقاربات أسهمت في تعزيز فهم المبادئ الأساسية والرياضية التي تقوم عليها المقرنصات، فإنها غالباً ما تعتمد على تمثيلات ثنائية الأبعاد أو نماذج مثالية، مما يحدّ من قابليتها للتطبيق في سياقات التوثيق العملي والحفاظ المعماري^(٣).

٢,٢. تحديات توثيق العناصر المعمارية المعقدة في المباني التاريخية

تفرض الهندسة المعقدة وتكرار الوحدات للمقرنصات تحديات كبيرة أمام أساليب التوثيق التقليدية. إذ غالباً ما تعجز أعمال الرفع اليدوي والرسومات ثنائية الأبعاد عن تسجيل العمق، والتكوين الطبقي، والعلاقات الفراغية بدقة، فغالباً ما تحتوي المباني

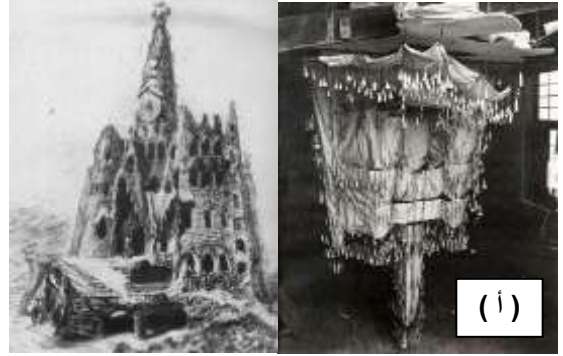
التاريخية على عناصر فريدة لا تتوافق مع الأبعاد القياسية، مما يعقد جهود التوثيق⁽⁴⁾ و يؤدي إلى توثيق ناقص أو مبسّط لهذه العناصر. فضمن سياقات الحفاظ المعماري، قد تؤدي مثل هذه الأخطاء عن تدخلات ترميمية تخل بالأصالة المعمارية⁽⁵⁾. فتقنيات التوثيق التقليدية تستغرق وقتاً طويلاً وغير دقيقة وغالباً ما تكون غير كافية لالتقاط الأشكال المعقدة للعناصر المعمارية المعقدة، لا سيما في تصميمات المعقدة. تتطلب هذه التحديات أساليب مبتكرة مثل المسح التصويري لتعزيز الدقة والكفاءة في توثيق التراث الثقافي المبني^(٦). ونتيجة لذلك، ازداد الاهتمام بالتقنيات الرقمية في التوثيق، لما توفره من قدرة على تسجيل الأشكال المعمارية المعقدة بدقة أعلى وبأقل قدر من التدخل المادي.

٣, ٢. التوثيق الرقمي في الحفاظ على المباني التاريخية

أدّى التطور السريع في التقنيات الرقمية الحديثة إلى إحداث ثورة في ممارسات توثيق مواقع التراث، إذ أتاحت الأدوات الرقمية إمكانيات جديدة لجمع البيانات وتحليلها ونشرها، فضلاً عن إنتاج تمثيلات ثلاثية الأبعاد دقيقة تُستخدم في التوثيق، والتحليل، والحفاظ طويل الأمد.⁽⁷⁾ وتعمل مبادرات التراث الرقمي، مثل الجولات الافتراضية وتطبيقات الواقع المعزز، على توسيع وصول الجمهور⁽⁸⁾. إلا أن معظم الأبحاث القائمة ركزت بشكل أساسي على العناصر المعمارية واسعة النطاق أو المنتظمة نسبياً، مثل الواجهات والعناصر الإنشائية. في المقابل، ما يزال توظيف هذه التقنيات في توثيق الأنظمة الزخرفية شديدة التعقيد، مثل المقرنصات، مجالاً محدود التناول نسبياً.

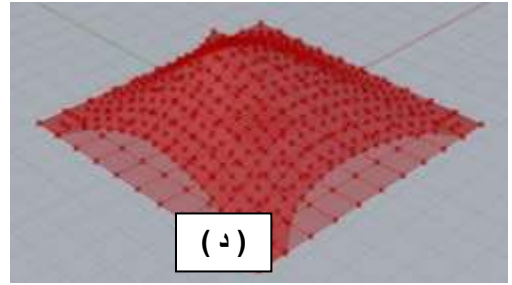
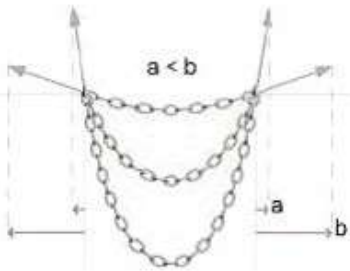
٤, ٢. النمذجة الرقمية وتفسير الهندسة التاريخية

تُبرز الدراسات الحديثة تكامل تقنيات معالجة السحب النقطية، وتنقيح الشبكات الهندسية، والنمذجة البارامترية في مجال توثيق التراث المعماري. وعلى الرغم من أن هذه المقاربات توفر مستوىً عالياً من الدقة الهندسية، فإن عدداً من الباحثين يحذرون من أن النماذج الرقمية قد تتحول إلى منتجات هندسية مجردة إذا لم تُدمج ضمنها عملية التفسير المعماري⁽⁹⁾. وتكتسب هذه الإشكالية أهمية خاصة في حالة المقرنصات، حيث يرتبط التكرار الهندسي ارتباطاً وثيقاً بالتدرج الفراغي والمقاصد المعمارية. ومن دون نمذجة تفسيرية واعية، قد تفتقر المخرجات الرقمية إلى العمق السياقي اللازم لدعم قرارات الحفاظ والترميم المستنيرة..



(ب)

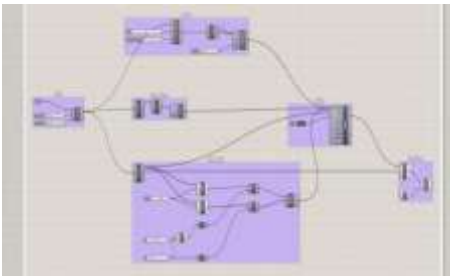
(أ)



(د)

Catenarias con distintos empujes

الشكل ١، (أ) نموذج غاودي المعلق والصور المقلوبة المستخدم للسلاسل الحديدية المعلقة. (ج) تمثيل للشبكة في بيئة رقمية. (د) الخوارزمية المستخدمة في برنامج grasshopper لمحاكاة الشبكة. (10)



يعزز هذا النهج تقديرًا وفهمًا أعمق للعمارة التاريخية، مما يساهم في الحفاظ عليها والتوعية التعليمية. في حين أن النمذجة الرقمية تساعد بشكل كبير في التحليل الهندسي التاريخي، فمن

الضروري أن ندرك أنها قد لا تلتقط جميع الفروق الدقيقة في السياق التاريخي، مما قد يؤدي إلى تبسيط مفرط في فهم الروايات المعمارية المعقدة (11).

٢, ٥. التصنيع الرقمي في الحفاظ على المباني التاريخية

شهدت تقنيات التصنيع الرقمي، ولا سيما التصنيع بالإضافة (الطباعة ثلاثية الأبعاد)، اهتمامًا متزايدًا في مجال الحفاظ على التراث، لما توفره من إمكانيات في النمذجة الأولية، والعرض، وإعادة إنتاج العناصر المفقودة أو المتضررة. وتتيح هذه التقنيات تصنيع أشكال هندسية معقدة يصعب تحقيقها باستخدام الأساليب التقليدية (12). ومع ذلك، فإن تطبيقها في السياقات التراثية الحساسة يثير تساؤلات تتعلق بمدى توافق

المواد، والأصالة، وأخلاقيات الحفاظ. وبناءً عليه، فتؤكد الدراسات على ضرورة اعتماد منهجيات واعية بمتطلبات التصنيع الرقمي، توازن بين الإمكانيات التقنية المتاحة والمبادئ المعتمدة في الحفاظ على التراث^(١٣).



الشكل ٢، (أ) يوضح مراحل النمذجة الرقمية لعمود مبنى تاريخي. (ب) يوضح النموذج المطبوع بواسطة الطباعة الثلاثية الأبعاد.^(١٤)

٣. منهجية البحث

تعتمد هذه الدراسة منهجية تجريبية لتوثيق وتحليل وإعادة إنتاج عنصر معماري تقليدي (المقرنص) باستخدام أدوات رقمية مفتوحة المصدر وتقنيات التصنيع الرقمي، ولا سيما الطباعة ثلاثية الأبعاد. تدمج هذه المنهجية جمع البيانات الميدانية والمعالجة الرقمية والتصنيع، بهدف إنشاء نماذج رقمية ومادية دقيقة مع الحفاظ على السلامة المعمارية والمعنى الثقافي للعنصر الأصلي.

تتألف المنهجية من أربع مراحل متتابعة، تُسهم كل منها في سير العمل العام للدراسة، وتضمن قابلية تكرار العملية ودقتها وتوافقها مع مبادئ الحفاظ على التراث.

١,٣. تحليل نقدي لمسار العمل المقترح

يُعد مسار العمل الرقمي المعتمد في هذه الدراسة مسارًا تطبيقيًا متكاملًا يجمع بين تقنيات التوثيق البصري، والمعالجة الرقمية، والنمذجة المعمارية، والتصنيع الرقمي، بهدف التعامل مع أحد أكثر العناصر الزخرفية المعمارية تعقيدًا، وهو نظام المقرنصات. ولا تكمن أهمية هذا المسار في استخدام أدوات رقمية متقدمة بحد ذاتها، بل في طريقة توظيفها وتسلسلها المنهجي بما يضمن تحقيق توازن بين الدقة الهندسية، وقابلية التطبيق، والاعتبارات المعمارية والتراثية.

في مرحلة جمع البيانات البصرية، أظهر الاعتماد على التصوير باستخدام الهاتف الذكي مرونة عالية وسهولة في التطبيق، خصوصًا في بيئات تراثية تعاني من قيود الوصول أو محدودية الموارد. وقد أثبتت التجربة أن جودة الكاميرا وحدها لا تضمن نجاح عملية التوثيق، بل إن التخطيط المسبق لزوايا التصوير، ونسبة التداخل، وظروف الإضاءة، يلعب دورًا حاسمًا في جودة مخرجات التصوير المساحي. وعلى الرغم من أن هذه المرحلة منخفضة الكلفة نسبيًا، إلا أنها تبقى حساسة للأخطاء الميدانية، مما يتطلب خبرة مسبقة وانتباهًا عاليًا أثناء التنفيذ.

أما مرحلة المعالجة التصويرية وإعادة البناء ثلاثي الأبعاد باستخدام **Meshroom**، فقد وفرت تمثيلًا غنيًا للتفاصيل السطحية والهندسة العامة للمقرنصات، إلا أن النموذج الناتج في هذه المرحلة يبقى وصفيًا وغير مضبوط بُعديًا. ويُعد هذا أحد القيود الجوهرية للتصوير المساحي عند استخدامه بصورة منفردة، حيث لا يمكن الاعتماد على المخرجات الخام لأغراض التوثيق الهندسي أو التحليل المعماري دون المرور بمرحلة تحقق ومعايرة دقيقة.

وتبرز أهمية برنامج **CloudCompare** في هذا السياق بوصفه أداة تحقق ومعالجة هندسية، إذ أتاح تنظيف النموذج من التشويش الرقمي، وضبط المقياس اعتمادًا على القياسات المرجعية الميدانية. وقد أسهمت هذه المرحلة في تحويل النموذج من تمثيل

بصري إلى مرجع هندسي أكثر موثوقية، إلا أنها تتطلب بدورها توفر بيانات قياس دقيقة من الموقع، وهو أمر قد لا يكون متاحاً دائماً في بعض المواقع التراثية. تمثل مرحلة إعادة البناء التفسيري في 3ds Max النقطة المفصلية في مسار العمل الرقمي، حيث جرى الانتقال من نموذج غير منتظم إلى نموذج معماري مضبوط يعكس المنطق الهندسي ونظام التكوين الخاص بالمقرنصات. وقد أظهرت هذه المرحلة أن النمذجة الرقمية لا تُعد مجرد عملية تقنية، بل تتطلب فهماً معمارياً عميقاً لطبيعة العنصر التراثي، بما يسمح بالتمييز بين التشوهات العرضية والأنماط الأصلية المقصودة. ومن دون هذا التدخل التفسيري، تبقى النماذج الرقمية محدودة القيمة التحليلية.

أما مرحلة التصنيع الرقمي بالطباعة ثلاثية الأبعاد، فقد أدت دوراً داعماً في تقييم نتائج المسار الرقمي والتحقق منها مادياً. ورغم ما كشفته من قيود تتعلق بالدقة السطحية والخواص المادية، فإنها وفرت أداة فعالة لفهم العلاقات الفراغية ومنطق التكوين، وأسهمت في تعزيز التواصل البصري والتحليلي للنتائج.

وبشكل عام، يبين هذا التحليل أن مسار العمل الرقمي المقترح لا يمكن اعتباره سلسلة آلية من الأدوات، بل منظومة تفسيرية متكاملة تعتمد على التكامل بين التقنية والخبرة المعمارية. وتكمن قوته الأساسية في قابليته للتطبيق في السياقات ذات الموارد المحدودة، شريطة التعامل معه بوصفه إطاراً مرناً قابلاً للتكيف، وليس نموذجاً جامداً أو حلاً نهائياً مستقلاً عن السياق التراثي والمعماري.

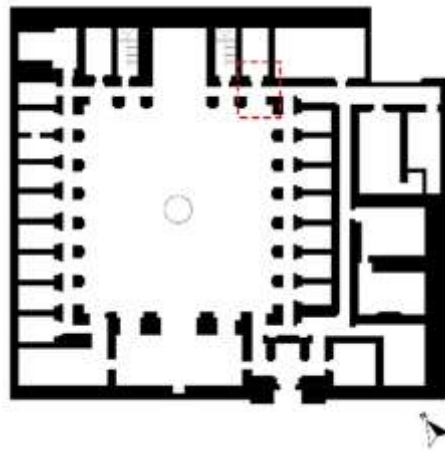
٢,٣. اختيار موضوع الدراسة

يُعد اختيار دراسة حالة مناسبة أمراً بالغ الأهمية لإظهار قابلية تطبيق وفاعلية مسار العمل الرقمي المقترح. تركز هذه الدراسة على مقرنصات قصر العباسي في بغداد، نظراً لأهميتها التاريخية، وتعقيدها الهندسي، وكونها تمثل نموذجاً معبراً عن التراث المعماري العراقي. وتتيح هذه الحالة اختبار المنهجية المقترحة على عنصر معماري واقعي يجمع بين التعقيد الإنشائي والزخرفي، مما يوفر فهماً معمقاً للتحديات العملية والفرص المتاحة في مجال توثيق التراث وإعادة إنتاجه.

أولاً: جمع البيانات

يمثل جمع البيانات البصرية مرحلة أساسية في التوثيق الرقمي الدقيق، إذ تُعدّ الصور عالية الجودة المدخل الرئيس لتوليد النماذج ثلاثية الأبعاد في تقنية التصوير المساحي. في هذه الدراسة، أُجريت عملية التصوير باستخدام هاتف ذكي من نوع Samsung Galaxy S21 Ultra، لما يتمتع به من قدرات تصوير متقدمة، تشمل مستشعراً بدقة ١٠٨ ميغابكسل، ونطاقاً ديناميكياً واسعاً، وأداءً موثقاً في ظروف الإضاءة المتغيرة.

وقد جرى اختيار قوس مقرنصات مزخرف في قصر العباسي بمدينة بغداد بوصفه دراسة الحالة، لما يتسم به من غنى زخرفي وتكوين هندسي معقد. وقبل التقاط الصور، جرى تقييم القوس الواقع في الجهة الشمالية الشرقية من القصر (شكل ٣) لتحديد زوايا التصوير المثلى، كما أُجري التصوير في الساعة العاشرة صباحاً تحت إضاءة طبيعية مستقرة للحد من الظلال الحادة والانعكاسات. وقد تم التقاط ما مجموعه ٥٧٧ صورة من زوايا متعددة، شملت المنظور العلوي والسفلي والجانب، مع الحفاظ على تداخل بين الصور بنسبة ٧٠-٨٠٪، وثبات المسافة بين الكاميرا والعنصر المعماري عبر حركات دائرية تدريجية، بما يضمن تغطية شاملة وتوليد نموذج ثلاثي الأبعاد متماسك في مراحل المعالجة اللاحقة.



الشكل ٣، مخطط القصر العباسي يوضح عليه موقع القوس المقرنص الذي تم اختياره كموضوع دراسة. (١٥)

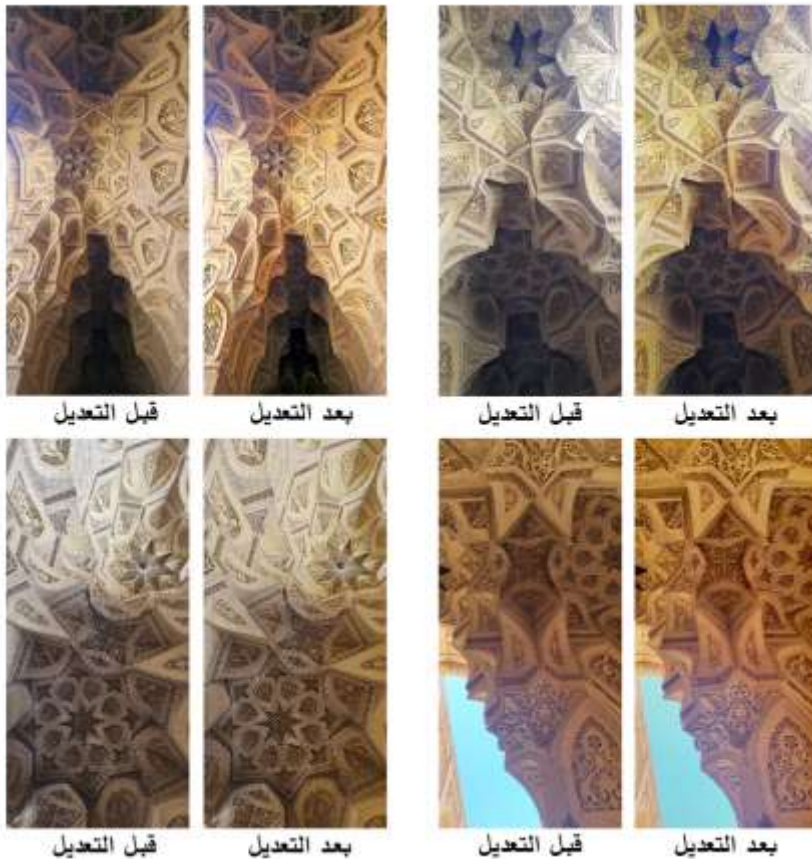
ثانياً: المعالجة الرقمية

تهدف هذه المرحلة إلى تحويل البيانات البصرية الميدانية إلى نموذج رقمي ثلاثي الأبعاد دقيق يمثل قوس المقرنصات في قصر العباسي. وتمثل هذه العملية جوهر التوثيق الرقمي، إذ تتيح فهم الحالة الراهنة للعنصر المعماري من حيث الهندسة والتفاصيل والمقياس.

١. المعالجة الأولية للصور

بعد الانتهاء من أعمال التصوير الميداني، جرى فحص جميع الصور مباشرة في الموقع وعلى أجهزة العرض الرقمية، بهدف التأكد من وضوحها ودقة تفاصيلها. واستُبعدت الصور التي تعرّضت للاهتزاز، أو الضبابية، أو ضعف الإضاءة، أو تشوّه

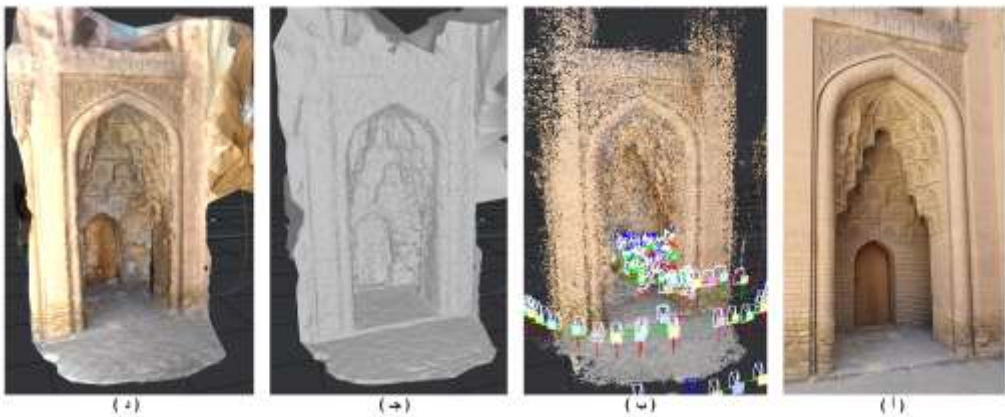
المنظور، لما قد تسببه من أخطاء في مراحل إعادة البناء اللاحقة. وقد تم اختيار ٢٩٦ صورة تمثل أفضل اللقطات من حيث الوضوح والتغطية والزوايا المتنوعة، ثم خضعت هذه الصور لعمليات تحسين رقمية أولية باستخدام برنامج Adobe Photoshop. شملت هذه العمليات تعديل الحدة، والسطوع والتباين، وتصحيح التعريض، وضبط تشبع الألوان، مع الحرص على عدم المساس بالقيم اللونية الأصلية أو التفاصيل الزخرفية الدقيقة، وذلك بهدف تعزيز الاتساق البصري بين الصور وتحسين جودة المدخلات الخاصة بعملية التصوير المساحي (شكل ٤). بعد ذلك، حُفظت الصور بصيغة JPG عالية الجودة وبإعدادات ضغط منخفضة، لضمان الحفاظ على أكبر قدر ممكن من المعلومات البصرية لاستخدامها في المعالجة التصويرية اللاحقة وإنتاج نموذج ثلاثي الأبعاد أكثر دقة وموثوقية من



الشكل ٤، بعض التعديلات التي أجريت على الصور الملتقطة. المصدر: الباحثة

٢. التصوير المساحي

أُجريت عملية إعادة البناء ثلاثي الأبعاد باستخدام برنامج Meshroom، وهو برنامج مفتوح المصدر يعتمد على مكتبة AliceVision. وقد تم اختيار البرنامج لكونه مجانيًا، وامتلاكه واجهة بصرية قائمة على العقد (Node-based)، ودقته العالية في إعادة بناء التفاصيل المعمارية المعقدة مثل المقرنصات، فضلًا عن قدرته على التعامل بكفاءة مع مجموعات كبيرة من الصور، ودعمه لصيغ التصدير القياسية مثل OBJ وPLY. يعتمد البرنامج على مبادئ البنية من الحركة (Structure from Motion - SfM)، حيث يقوم بتحليل الصور المتداخلة لتقدير مواقع الكاميرا وتوليد سحابة نقطية كثيفة، تليها عملية إنشاء الشبكة الهندسية وإكسائها بالملمس. وقد أسفرت العملية عن نموذج ثلاثي الأبعاد عالي الدقة، مكتمل هندسيًا ومتسق بصريًا، يتميز ببنية شبكية منتظمة وجودة عالية في تمثيل الملمس، مع قابلية كبيرة للاستخدام في التحليل والتوثيق والتطبيقات المستقبلية في مجال الحفاظ (شكل ٥).



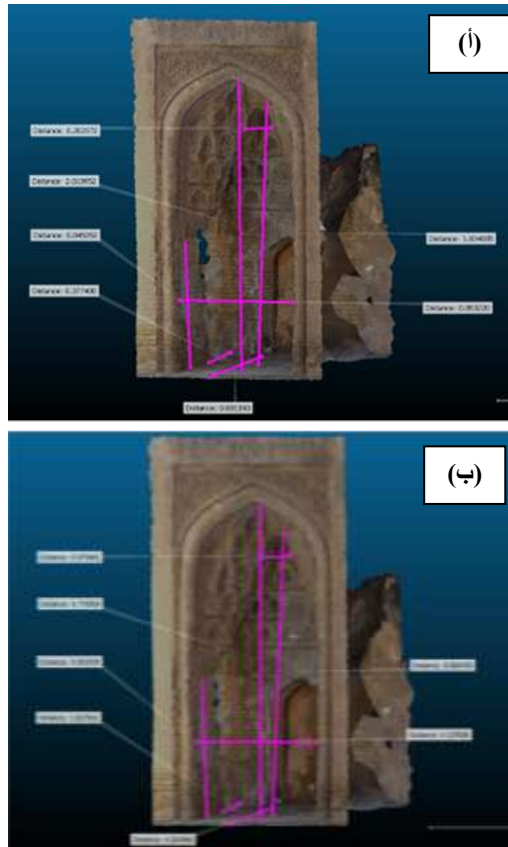
الشكل ٥، (أ) صورة النموذج. (ب) Structure from motion. (ج) Meshing. (د) Texturing. \ المصدر: الباحثة بواسطة برنامج Meshroom.

٣. التحقق من الدقة الهندسية

استُخدم برنامج CloudCompare كأداة مساندة لتنقية وضبط مقياس النموذج ثلاثي الأبعاد الناتج عن التصوير المساحي، بهدف تحقيق دقة هندسية عالية وضمان توافقه مع الأبعاد الحقيقية لقوس المقرنصات في قصر العباسي. في البداية، جرى استيراد النموذج المكسو بالملمس إلى البرنامج، حيث أُزيلت الضوضاء والنقاط الزائدة والأسطح غير الضرورية للحصول على نموذج نظيف وموثوق هندسيًا.

بعد ذلك، جرى تحديد نقاط مرجعية أساسية مثل قاعدة القوس، وتاجه، ونقاط التحكم في الانحناء باستخدام أدوات تحديد النقاط، من أجل إجراء قياسات دقيقة. وأظهرت القياسات الأولية أن النموذج غير مضبوط المقياس كان أصغر بكثير من العنصر الحقيقي، مما أكد الحاجة إلى إعادة معايرته. وبناءً على ذلك، طُبِّق عامل تحجيم مستمد من أبعاد مرجعية جرى قياسها ميدانيًا، شملت ارتفاع القوس، وعرض الممر، والمسافات الإنشائية الرئيسية.

وقد بينت نتائج التحقق بعد إعادة التحجيم مستوىً عاليًا من الدقة البعدية، إذ لم تتجاوز الانحرافات ± 2 سم، مما أسفر عن نموذج نظيف، مضبوط المقياس، ومتسق هندسيًا (شكل ٦). وحافظ النموذج النهائي على التفاصيل الدقيقة للمقرنصات، وأُعدَّ للاستخدام في مرحلة النمذجة الدقيقة في برنامج 3ds Max، فضلًا عن إمكانية توظيفه في الدراسات التحليلية ومسارات الطباعة ثلاثية الأبعاد.

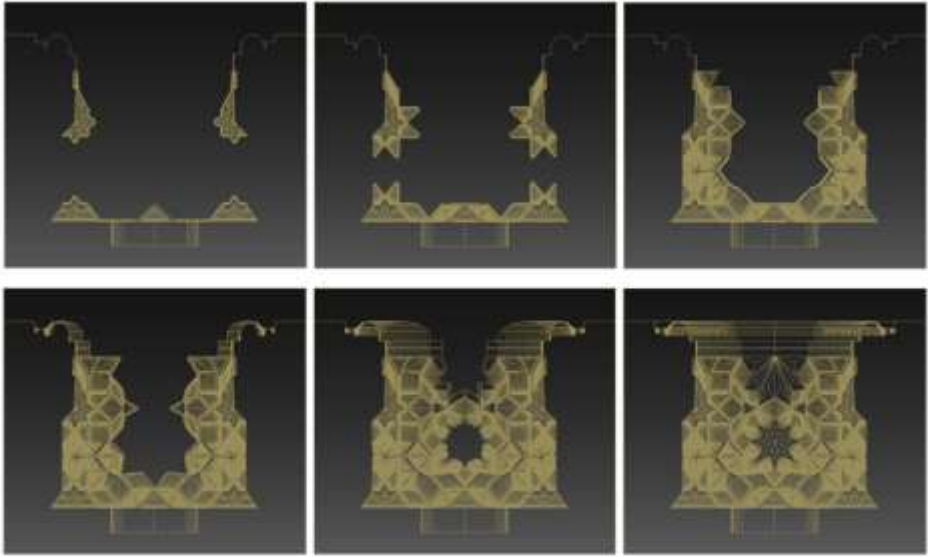


الشكل ٦، يوضح الشكل (أ) قياسات النموذج الفوتوغراممري. (ب) قياسات النموذج الفوتوغراممري بعد إعادة توحيد المعايير. المصدر: الباحثة باستخدام برنامج CloudCompare.

جدول (١): مقارنة بين قياسات النموذج التصويري والقياسات الحقلية قبل وبعد إعادة المعايير. \ المصدر: الباحثة					
المعالم الخطأ	القياسات بعد إعادة المعايير	المعالم الخطأ	قياسات نموذج Meshroom	القياسات الميدانية	
1.05	9.70	0.217	2.00	9.20	ارتفاع القوس الخارجي
1.11	8.88	0.229	1.83	8.00	ارتفاع القوس المركزي
1.05	4.10	0.218	0.85	3.90	عرض القوس
1.50	1.80	0.308	0.37	1.20	عرض الممر الداخلي
3.50	4.20	0.733	0.88	1.20	العرض الكلي للممر
1.80	0.90	0.400	0.20	0.50	المسافة بين المقرنصتين العلويتين

رابعاً: إعادة البناء الرقمي

هدفت مرحلة النمذجة الرقمية إلى إنتاج نموذج ثلاثي الأبعاد دقيق ومضبوط المقياس لأقواس المقرنصات في قصر العباسي، بالاعتماد على النموذج التصويري بوصفه مرجعاً بصرياً وبعدياً. وتمثل هذه المرحلة خطوة محورية في تحويل البيانات الرقمية الميدانية إلى نموذج هندسي مضبوط ضمن بيئة 3ds Max، بما يضمن الحفاظ على النّسب الأصلية والانحناءات والخصائص المعمارية للعنصر التاريخي. وقد جرى اختيار البرنامج لما يوفره من دقة عالية في التعامل مع الهندسة المعمارية المعقدة، وأدوات متقدمة للتحكم بالأبعاد، فضلاً عن دعمه لاستيراد مخرجات التصوير المساحي بصيغ قياسية، مما يجعله مناسباً لمسارات التصنيع الرقمي والطباعة ثلاثية الأبعاد. وبعد استيراد النموذج التصويري إلى البرنامج، جرى ضبطه وفق وحدات القياس الحقيقية، ثم أُعيد بناء هندسة القوس ومقاطع المقرنصات اعتماداً على الرسومات القطاعية والإسقاطات المرجعية (شكل ٥)، تلا ذلك نمذجة الكتل المعمارية الرئيسية، وإعادة تشكيل وحدات المقرنصات بشكل منهجي باستخدام عمليات التماثل والتكرار.



الشكل ٧، يوضح مراحل بناء مخطط القوس. المصدر: الباحثة

وبعد الانتهاء من النمذجة، جرى التحقق من أبعاد النموذج بمقارنتها مع القياسات الحقلية والمرجع التصويري للتأكد من دقتها. ثم نُقِيَ النموذج النهائي وحُسِّنَ، وصُدِّرَ بصيغة OBJ، ليكون نموذجًا جاهزًا للتصنيع، صالحًا للطباعة ثلاثية الأبعاد، وللاستخدام في توثيق التراث، وتخطيط الترميم، وإعادة الإظهار الافتراضي (شكل ٨).



الشكل ٨، النموذج النهائي الموحد جاهز للطباعة. المصدر: الباحثة

خامساً: تحليل الصور والنماذج الرقمية

أظهرت الصور الفوتوغرافية عالية الدقة المستخدمة في مرحلة المعالجة الأولية (شكل ٤) قدرة واضحة على توثيق التفاصيل السطحية الدقيقة للمقرنصات، بما في ذلك الحواف، والتجاويف، ومستويات التدرج الطبقي بين الوحدات الزخرفية. وقد أسهمت هذه الصور في تعزيز فهم العلاقات البصرية بين العناصر المتكررة، كما وفّرت مدخلات متجانسة مكّنت من تحسين جودة إعادة البناء ثلاثي الأبعاد.

من جهة أخرى، أتاح النموذج الثلاثي الأبعاد الناتج عن عملية التصوير المساحي (شكل ٥) قراءة شاملة للبنية الفراغية لنظام المقرنصات، إذ أمكن فحص التكوين الهندسي من زوايا متعددة، وتتبع منطق التكرار والوحدات المعيارية، وتحليل الانتقالات الهندسية بين الأسطح المقعّرة والمستوية دون أي تدخل مادي في العنصر التراثي. كما مكّن هذا النموذج من تحديد مناطق التشوّه الهندسي أو فقدان الزخرفي الناتج عن عوامل الزمن، وهو ما يصعب رصده بالاعتماد على التوثيق التقليدي وحده.

أما نموذج إعادة البناء الهندسي المعماري المنقّذ في برنامج 3ds Max (شكل ٨)، فقد مثّل مرحلة تفسيرية متقدمة، حيث جرى تحويل الشبكة غير المنتظمة الناتجة عن التصوير المساحي إلى نموذج مضبوط ومعرّف معمارياً. وقد أتاح هذا النموذج إعادة قراءة المنطق التصميمي للمقرنصات، والتمييز بين التشوهات العرضية والأنماط المعمارية المقصودة، فضلاً عن اختبار التناسق الهندسي للأبعاد والنسب. وبذلك أسهم التكامل بين الصور الأصلية والنماذج الرقمية في تحويل عملية التوثيق من مجرد تسجيل بصري إلى تحليل معماري معمّق يدعم قرارات التوثيق والحفاظ وإعادة الإنتاج.

٣,٣. التصنيع الرقمي

هدفت هذه المرحلة إلى تحويل النموذج الرقمي المضبوط الذي جرى تطويره في برنامج 3ds Max إلى نموذج مادي ملموس باستخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد، وذلك لتقييم دقة عملية النمذجة الرقمية ومدى قابليتها للتطبيق في توثيق وترميم العناصر المعمارية التاريخية. وقد جرى تصنيع النموذج باستخدام طابعة Creality Ender 3V3 المعتمدة على تقنية الترسيب المنصهر (Fused Deposition Modeling - FDM)، التي تقوم ببثق خيوط بلاستيكية حرارية طبقة بعد أخرى لتشكيل النموذج النهائي. وقد اختيرت الطابعة لما تتمتع به من دقة بعدية، واستقرار تشغيلي، وقدرة على إنتاج هندسة معقدة بجودة سطحية مناسبة، مما يجعلها ملائمة للتطبيقات

المعمارية والأكاديمية. وطُبِعَ النموذج بمقياس مصغّر، بارتفاع ٢٧ سم وقاعدة بمساحة ١٥ × ١٥ سم، باستخدام مادة PLA+ (Polylactic Acid Plus) (شكل ٩)، وهي مادة حيوية صديقة للبيئة مشتقة من موارد متجددة. وقد وقع الاختيار على هذه المادة لما توفره من استقرار حراري، وقلة التشوه، وسهولة في الطباعة، وقدرة على إنتاج أسطح ناعمة مناسبة للعرض والتحليل. استغرقت عملية الطباعة نحو ١٩ ساعة، وقُسِّمَ النموذج إلى جزأين لضمان جودة الطباعة ودقة التفاصيل. وبعد الانتهاء، جرى تجميع الأجزاء لإنتاج نموذج مادي متكامل يمثل قوس المقرنصات في قصر العباسي بدقة، بما يبرهن على فاعلية دمج النمذجة الرقمية والتصنيع بالإضافة في مجال الحفاظ على التراث المعماري.



الشكل ٩، نموذج مطبوع لقوس المقرنصات في القصر العباسي. المصدر: الباحثة

٤. النتائج:

٤, ١. الدقة الهندسية وأداء التصوير المساحي

أظهرت نتائج إعادة البناء باستخدام تقنية التصوير المساحي قدرة عالية على تمثيل التعقيد الهندسي لمقرنصات قصر العباسي، ولا سيما من حيث العمق الطبقي، وتكرار الوحدات، وغنى التفاصيل السطحية. وقد أسهم هذا التمثيل في توفير نموذج ثلاثي

الأبعاد يعكس الحالة الراهنة للعنصر المعماري بدقة شكلية عالية، ويتيح إمكانات واسعة للتحليل البصري والدراسة المقارنة.

إلا أن القياسات الأولية للنموذج كشفت عن تفاوتات ملحوظة في المقياس، وهو ما يؤكد أحد أبرز التحديات المرتبطة بالاعتماد على مخرجات التصوير المساحي الخام في التوثيق البُعدي، خاصةً عند التعامل مع أنظمة زخرفية معقدة تعتمد على التكرار والوحدات الصغيرة. وقد أظهرت هذه التفاوتات أن جودة التمثيل البصري لا تعني بالضرورة دقة هندسية كافية للاستخدامات التحليلية أو الترميمية.

ولم تتحقق الدقة المقبولة للنموذج إلا بعد تنفيذ عملية إعادة معايرة منهجية استندت إلى أبعاد مرجعية تم قياسها ميدانياً، شملت نقاطاً إنشائية رئيسية في القوس والمقرنصات. وبعد هذه المعالجة، انخفضت الانحرافات البُعدية إلى حدود ± 2 سم، وهو مستوى دقة يُعد مناسباً لأغراض التوثيق والتحليل المعماري.

وتشير هذه النتائج إلى استنتاج منهجي بالغ الأهمية، يتمثل في أن التصوير المساحي لا يمكن اعتباره أداة موثوقة بُعدياً بشكل مستقل عند توثيق العناصر الزخرفية المعمارية المعقدة، ما لم يُدعم بعمليات معالجة لاحقة دقيقة وتحقيق معماري قائم على الخبرة والقياس الميداني. وعليه، تؤكد الدراسة ضرورة التعامل مع النماذج التصويرية بوصفها بيانات أولية تفسيرية تمثل مرحلة من مراحل التوثيق، وليست منتجات نهائية مكتملة.

وبهذا المعنى، يبرز دور المعماري والباحث في توجيه عملية التحقق والتحليل، وتحويل المخرجات الرقمية من تمثيلات شكلية إلى أدوات معرفية داعمة لقرارات الحفاظ والترميم، بما يضمن تحقيق التوازن بين الدقة التقنية والحفاظ على الأصالة المعمارية للعناصر التراثية.

٢,٤. دور النمذجة الرقمية في التفسير المعماري

أثبتت مرحلة إعادة البناء في برنامج 3ds Max دورها الأساسي في تحويل الشبكة الكثيفة والمعقدة الناتجة من التصوير المساحي إلى نموذج هندسي مقيس مضبوط قابل للتفسير الهندسي. إذ أن مخرجات التصوير المساحي على الرغم من دقتها الشكلية تبقى في الكثير من الأحيان شكلية و تعكس حالة السطحية للعنصر المعماري دون أن تكشف عن منطق تكوينه أو نظامه البنائي الداخلي.

و من خلال اعتماد أساليب إعادة البناء و تطبيق مبادئ التماثل المعماري و تكرار الوحدات المعيارية، تمكن من الكشف عن البنية الأنشائية الأساسية لنظام المقرنصات و فهم العلاقات الفراغية التي تحكم تدرجها و انتقالها بين المستويات المختلفة. أسهم ذلك

في إعادة تفسير و فهم المقرنصات بوصفها نظام معماري متكامل و ليس مجرد عنصر زخرفي مستقل.

كما اتاح هذا النهج التفسيري امكانية التمييز بوضوح مابين التشوهات السطحية الناتجة عن عوامل زمنية او بيئية أو اخطاء الالتقاط الرقمي، و السمات الهندسية المقصودة التي تعكس التصميم المعماري الاصلي. وبذلك ام تقتصر النمذجة الرقمية على تحسين جودة التمثيل الهندسي فحسب، بل أدت دوراً تحليلياً أساسياً في دعم قرارات التوثيق و الحفاظ عن طريق توفير نموذج مرجعي دقيق يمكن الاعتماد عليه في دراسات الترميم و إعادة الانتاج مع الحفاظ على القيم الجمالية و الاصاله المعمارية للمقرنصات التاريخية.

٤, ٣. التصنيع الرقمي كأداة للتحقق

أكدت تجربة الطباعة الثلاثية الابعاد فاعليتها كوسيلة تحقق مادي لمسار العمل الرقمي المعتمد في الدراسة، إذ اتاح النموذج المطبوع اختبار نتائج التوثيق و النمذجة الرقمية بصورة ملموسة قابلة للمعاينة البصرية و تمثيل العمق الفراغي و العلاقات النسبية بين الوحدات بنجاح، ايضاً فسر منطق التدرج والانتقال في نظام المقرنصات على الرغم من تصغير مقياس النموذج المطبوع، مما يعكس دقة المراحل الرقمية السابقة ومدى تكاملها.

من جهة اخرى اظهرت التجربة حدود تقنية الكباعة الثلاثية الابعاد باستخدام التسريب المنصهر FDM خاصتا فيما يتعلق بظهور طبقات الطباعة و محدوية دقة التفاصيل الدقيقة مقارنة بالعنصر التاريخي. تشير هذه القيود الى ان التصنيع الرقمي في شكله الحالي لايمكن اعتباره بديلاً مباشراً لعمليات الترميم و اعادة البناء في المواقع التراثية الحساسة.

و بناءً على ذلك تؤكد نتائج الدراسة ان التصنيع الرقمي يؤدي دوراً تكميلياً مهماً ضمن منظومات التوثيق و الحفاظ يتمثل بدعم عمليات التقييم والتحقق، و تعمل ايضاً على تعزيز الفهم المكاني للعناصر المعمارية المعقدة و تسهيل التواصل بين الباحثين و المتخصصين و صناع القرار. كما يمكن توظيف النماذج المطبوعة في الاغراض التعليمية، و العرض المتحفي، و اختبار الفرضيات التصميمية قبل اتخاذ اي تدخل فعلي في الموقع.

إذن ينبغي النظر الى التصنيع الرقمي بوصفه اداة تحليلية و تواصلية تسهم في دعم الحفاظ المستدام على التراث المعماري على ان يستخدم ضمن اطار منهجي يراعي اخلاقيات الحفاظ و متطلبات الاصاله فهو يكمل و لايستبدل الاساليب التقليدية المعتمدة في صيانة المباني التاريخية.

٤,٤. مقارنة الاساليب التقليدية للتوثيق والحفاظ و التوثيق الرقمي

يعد توثيق اي عنصر معماري تاريخي من اكثر التحديات تعقيداً في مجال الحفاظ المعماري كما في توثيق المقرنصات و هذا يعود الى طبيعتها الفراغية المركبة و اعتمادها على التكرار الطبقي و العلاقات الهندسية ثلاثية الابعاد، لفهم اهمية التوثيق الرقمي في علميات الحفاظ يجب مقارنتها مع الطرق و الاساليب التقليدية.

جدول (2): مقارنة بين الأساليب التقليدية و اساليب التوثيق الرقمي في عمليات التوثيق والحفاظ . المصدر: الباحثة		
الجانب	الأساليب التقليدية	التوثيق الرقمي
طرق التنفيذ	الرفع اليدوي، الرسومات الثنائية الابعاد، التصوير الفوتوغرافي الثابت	التصوير المساحي، النمذجة ثلاثية الابعاد
تمثيل التعقيد الفراغي	محدود، غالباً ما يعجز عن تصوير التداخلات الطبقة والعلاقات الهندسية الثلاثية الابعاد	عالي، يحافظ على العلاقات الطبقة والتدرج الحجمي ضمن نموذج واحد
الدقة البعدية	مقبولة، لكنها عرضة للأخطاء التراكمية خاصة مع العناصر المرتفعة أو صعوبة الوصول	عالية، لكنها تعتمد على جودة البيانات وخبرة المستخدم والمعايرة الدقيقة
الوقت والجهد	يحتاج وقتاً وجهداً كبيرين، خاصة في القياسات الميدانية والرسم اليدوي	أسرع في جمع البيانات الضخمة وتحليلها، لكنه يحتاج وقتاً للتحقق والمعالجة
التحليل الهندسي	جيد لفهم النسب والأنماط الهندسية، يدعم الرسومات التحليلية	ممتاز للتحليل الفراغي والعرض البصري وإعادة الإنتاج، لكنه يحتاج دعم الخبرة المعمارية لتجنب الأخطاء التفسيرية
التكامل والتكاملة	ضروري لفهم النظام البنائي والنسب الأساسية	يكمل الأساليب التقليدية بتمثيل شامل للتعقيد الهندسي، ويقلل فقدان المعلومات
الاستخدام الأمثل	دراسة العلاقات النسبية والتحليل البسيط، التوثيق الأولي	التوثيق التفصيلي، التحليل الفراغي، العرض، إعادة الإنتاج، الأرشفة الرقمية

من هذا يمكن استنتاج أن الاساليب اتقليدية و الرقمية غير متعارضة بل هي تكاملية. و افضل ممارسه هي الدمج بين اساليب الرسم اليدوي لفهم النسب و البناء مع التوثيق الرقمي لتمثيل التعقيد الفراغي بدقة، ينتج عن هذا التكامل توثيقاً شاملاً و متوازناً يحافظ على القيم المعمارية و الزخرفية للعنصر الموثق.

٤, ٥. النتائج، القيود، والتقييم النقدي

تُظهر نتائج هذه الدراسة أن توظيف الأدوات الرقمية المتاحة، مثل التصوير باستخدام الهواتف الذكية والبرمجيات مفتوحة المصدر، قادر على إنتاج توثيق رقمي عالي الجودة للعناصر التراثية المعمارية المعقدة، شريطة أن يُدعم هذا التوظيف بعملية تفسير معماري واعية وتحقيق هندسي دقيق. فقد بينت التجربة التطبيقية أن الدقة التقنية وحدها لا تكفي لتحقيق توثيق موثوق، بل إن دمج الخبرة المعمارية في مراحل المعالجة والنمذجة والتحقق يُعد عاملاً حاسماً في الوصول إلى نتائج ذات قيمة علمية وتطبيقية.

وتكتسب هذه النتيجة أهمية خاصة في السياقات التراثية التي تعاني من محدودية الموارد التقنية والمالية، كما هو الحال في العراق، حيث يصعب في كثير من الأحيان توفير معدات متقدمة أو برمجيات متخصصة عالية الكلفة. ومن ثم، يقدم مسار العمل المقترح بديلاً عملياً ومرئياً يمكن اعتماده في مشاريع التوثيق والحفاظ، مع الحفاظ على مستوى مقبول من الدقة الهندسية والموثوقية العلمية.

وفي المقابل، كشفت الدراسة عن عدد من القيود التي ينبغي أخذها بنظر الاعتبار، من أبرزها اعتماد جودة النتائج على ظروف الموقع، مثل سهولة الوصول، واستقرار الإضاءة الطبيعية، وإمكانية الحصول على قياسات مرجعية دقيقة. كما أن النموذج الرقمي الناتج، على الرغم من دقته الهندسية، يظل تمثيلاً شكلياً لا يعالج الجوانب المادية والإنشائية وسلوك المواد الأصلية، مما يحد من إمكانية استخدامه بشكل مباشر في تنفيذ أعمال الترميم.

قد تثير هذه التقنيات الرقمية مجموعة من الإشكاليات الأخلاقية المرتبطة بمفاهيم الأصالة في الحفاظ المعماري و لاسيما عن التعامل مع عناصر تراثية ذات قيمة تاريخية وثقافية عالية مثل المقرنصات. فتعد الأصالة من إحدى المبادئ الأساسية في نظريات الحفاظ المعماري ففي هذا الإطار لا يمكن اعتبار النموذج الرقمي أو النسخة المطبوعة بديلاً عن الأصل بل ينبغي النظر إليها كوسائط تفسيرية و توثيقية تستخدم لدعم الفهم العلمي و اتخاذ القرارات.

هنا تبرز أهمية الدور المعرفي للمعماري و الباحث في ضبط العملية الرقمية أخلاقياً. فالتقنيات الرقمية مهما بلغت دقتها تظل أدوات محايدة لا تمتلك وعياً بالقيم التاريخية و الرمزية. ومن ثم فإن ادخل التفسير المعماري في مراحل النمذجة و إعادة البناء يعد شرطاً أساسياً للحفاظ على المعنى الثقافي و عدم اختزال التراث في بيانات هندسية مجردة.

وفي السياق العراقي، تكتسب هذه الإشكاليات بعداً إضافياً، نظراً لحساسية المواقع التراثية وتعرض العديد منها للتلف أو الفقدان الجزئي. وفي مثل هذه الحالات، يمكن للتقنيات الرقمية أن تلعب دوراً أخلاقياً مهماً في حفظ الذاكرة المعمارية وتوثيق ما تبقى من العناصر الأصلية، شريطة ألا تتحول إلى وسيلة لتبرير إعادة بناء تخمينية أو استنساخ شكلي يفقر إلى الأساس التاريخي الموثق.

ومن منظور نقدي، تؤكد الدراسة أن الأدوات الرقمية لا ينبغي النظر إليها بوصفها حلاً مستقلة أو بديلة للمنهجيات التقليدية في الحفاظ المعماري، بل كوسائل داعمة تُستخدم ضمن إطار منهجي متكامل يوازن بين الكفاءة التكنولوجية، والفهم المعماري، وأخلاقيات الحفاظ. وعليه، يسهم البحث في تقديم مقارنة نقدية تعيد وضع الرقمنة في سياقها الصحيح، بوصفها أداة تفسير وتحليل تدعم اتخاذ القرار، وتحافظ في الوقت ذاته على الأصالة المعمارية والقيم الثقافية للعناصر التراثية.

٥,٥. امكانيات التكرار و التطبيق في مواقع تاريخية عراقية اخرى

توضح نتائج هذه الدراسة ان مسار العمل الرقمي المقترح يتمتع بدرجة عالية من القابلية للتكرار و التطبيق في المواقع التاريخية العراقية الاخرى، و لا يقتصر على حالة مقرنصات القصر العباسي في بغداد. و يرجع ذلك الى اعتماد المنهج على ادوات و تقنيات متاحة و مجانية، مثل التصوير بالهواتف الذكية و برامج رقمية شائعة بدلا من المعدات المتقدمة مرتفعة الكلفة التي قد لا تتوفر في معظم المواقع التراثية المحلية. التراث العراقي المعماري يتميز بتنوع انظمته الزخرفية و الانشائية و لاسيما العناصر المعمارية القائمة على التكرار الهندسي و التكوين الفراغي مثل المقرنصات، الزخارف الجصية، الافازير، و العقود. حيث تتشابه هذه العناصر من حيث التحديات التوثيقية في اعتمادها على تعدد الطبقات و تدرجها مما يجعل الاساليب التقليدية غير كافية لتمثيلها بصورة دقيقة. من هذه النقطة يمكن تطبيق المنهج المقترح على مبان تاريخية اخرى مثل المدارس و المساجد العباسية و العثمانية في جميع المدن العراقية كالموصل، و سامراء، و كربلاء، و النجف حيث تتكرر الانماط الزخرفية المعقدة وان اختلف السياق التاريخي او الاسلوبي.

قابلية التكرار هذه لا تقتصر على نوع العنصر المعماري فحسب بل تشمل ايضا اختلاف حالة الموقع. فقد اثبتت الدراسة ان توثيق عنصر معماري معقد يمكن انجازه في ظل قيود واقعية مثل صعوبة الوصول او محدودية الوقت او القيود الامنية، وهي ظروف شائعة في العديد من المواقع التاريخية العراقية. و هذا يعزز من اهمية المنهج المقترح بوصفه اداة عملية يمكن توظيفها ميدانياً دون الحاجة الى تجهيزات خاصة او تدخلات مادية قد تضر بالموقع.

و بالرغم من كل ماتقدم فإن تكرار تطبيق هذا المسار الرقمي يتطلب مراعاة مجموعة من الضوابط لضمان جوده النتائج. ففي حالة تطبيق المنهج المقترح يجب اجراء تحليل معماري مستقل يتناسب مع طبيعة العنصر المدروس، مع مراعاة الفروقات في المواد البنائية، و مستوى التلف، و السياق الانشائي. كما يجب عدم التعامل مع النماذج الرقمية الناتجة بوصفها حلولاً جاهزه، بل كوسائط تحليلية تخضع للتفسير المعماري و النقد العلمي.

تتجلى الأهمية الاستراتيجية لتكرار هذا المنهج في قدرته على المساهمة في بناء ارشيف رقمي وطني للعناصر المعمارية التراثية في العراق. اذ يمكن توحيد اجراءات التوثيق، و تطوير قواعد بيانات ثلاثية الابعاد، تستخدم لاغراض البحث الاكاديمي، و التعليم المعماري، و دعم القرارات الترميمية المستقبلية. و يمثل ذلك خطوه مهمه نحو الانتقال من التوثيق الفردي المحدود المنهج مؤسسي مستدام للحفاظ على التراث المعماري العراقي.

وبذلك تؤكد الدراسة ان قابلية تطبيق المنهج المقترح في المواقع التراثية العراقية الاخرى لا تكمن فقط في سهولة استخدامه، بل في مرونته و قدرته على التكيف مع الاختلافات السياقية المكانية و التاريخية، مع الحفاظ على التوازن بين الدقة التقنية و التفسير المعماري الواعي.

الخاتمة :

١. أثبتت الدراسة أن التصوير المساحي الرقمي يُعد أداة فعّالة في توثيق العناصر المعمارية الزخرفية المعقدة، مثل المقرنصات، من حيث تمثيل العمق الفراغي والتكرار الهندسي والتفاصيل السطحية الدقيقة، إلا أن مخرجاته الأولية لا تتمتع بموثوقية بُعديّة كافية دون إعادة معايرة منهجية والتحقق المعماري.
٢. أظهرت النتائج أن الدمج بين التصوير المساحي والنمذجة الرقمية التفسيرية يمثل مسارًا أكثر دقة وملاءمة من الاعتماد على أي تقنية منفردة، حيث أسهمت إعادة البناء في بيئة 3ds Max في كشف المنطق الهندسي الكامن خلف نظام المقرنصات، والتمييز بين التشوهات العرضية والأنماط المعمارية المقصودة.
٣. بيّنت المقارنة مع الأساليب التقليدية للتوثيق أن التقنيات الرقمية تتفوق في قدرتها على تسجيل التعقيد الفراغي والطبقي للعناصر الزخرفية، وتقليل التدخل المباشر في الأثر، مع توفير بيانات قابلة للتحديث والتحليل وإعادة الاستخدام، في حين تظل الرسومات اليدوية محدودة في تمثيل البعد الثلاثي.
٤. أكدت تجربة التصنيع الرقمي باستخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد دور هذه التقنية كأداة تحقق وتقييم بصري ومادي لمسار العمل الرقمي، حيث أتاح النموذج المطبوع فحص العلاقات النسبية ومنطق الإنشاء، دون أن يشكّل بديلاً عن الأصل أو وسيلة للتدخل الترميمي المباشر.

٥. أظهرت الدراسة أن مسار العمل المقترح يتمتع بقابلية عالية للتكرار والتطبيق في مواقع تراثية عراقية أخرى، لا سيما في البيئات التي تعاني من محدودية الموارد التقنية والمالية، شريطة توفر الحد الأدنى من القياسات المرجعية والخبرة المعمارية في التفسير الرقمي.
٦. خلصت الدراسة إلى أن إعادة الإنتاج الرقمية تطرح تحديات أخلاقية تتعلق بمفهوم الأصالة، وتؤكد ضرورة التعامل مع النماذج الرقمية والمطبوعة بوصفها أدوات توثيقية وتفسيرية، لا بدائل عن العناصر التاريخية الأصلية، مع الالتزام بمبادئ الشفافية والتميز الواضح بين الأصل وإعادة الإنتاج.

Conclusions:

1. The study demonstrates that digital photogrammetry is an effective tool for documenting highly complex ornamental architectural elements such as muqarnas, particularly in capturing spatial depth, repetitive geometry, and fine surface articulation. However, raw photogrammetric outputs cannot be considered metrically reliable without systematic recalibration and architectural verification.
2. The findings confirm that integrating photogrammetry with interpretive digital modeling provides a more accurate and meaningful workflow than relying on a single technique. Reconstruction in a controlled modeling environment (3ds Max) proved essential in revealing the underlying geometric logic of the muqarnas system and distinguishing intentional architectural patterns from incidental surface distortions.
3. Comparison with conventional documentation methods shows that digital techniques offer superior capacity for recording three-dimensional complexity while minimizing physical intervention. Moreover, digital documentation enables data reusability, analytical flexibility, and long-term archival value, which are difficult to achieve through traditional two-dimensional drawings alone.
4. Digital fabrication through three-dimensional printing functioned as a physical validation tool for the proposed workflow. The printed model successfully conveyed spatial relationships, proportions, and construction logic, confirming the accuracy of the digital process, while remaining unsuitable for direct conservation intervention.
5. The proposed digital workflow demonstrates strong potential for replication and adaptation across other Iraqi heritage sites, particularly in contexts with limited technical and financial resources, provided that architectural expertise and reliable reference measurements are available.

6. The study emphasizes that digital reproduction raises critical ethical considerations regarding authenticity. Digital and fabricated models should be understood as interpretive and documentary instruments rather than replacements for historic fabric, and their use must adhere to principles of transparency, architectural interpretation, and conservation ethics.

الهوامش :

- Necipoğlu, G. and Al-Asad, M. (1995) The Topkapi Scroll: Geometry (١) and Ornament in Islamic Architecture: Topkapi Palace Museum Library .MS H. 1956. <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BA28363784>
- .ibid (٢)
- Letellier, R. (2015) Recording, documentation and information (٣) management for the conservation of heritage places. <https://doi.org/10.4324/9781315793917>
- Fai, S. and Sydor, M. (2013) ‘Building information modelling and the (٤) documentation of architectural heritage: between the “typical” and the “specific”’, 2013 Digital Heritage International Congress (Digital Heritage). IEEE, pp. 731–734
- Remondino, F. and Campana, S. (2014) 3D Recording and Modelling (٥) in Archaeology and Cultural Heritage: Theory and Best Practices. University of Michigan Press. <https://doi.org/10.30861/9781407312309>
- Amorim, LE, Sampaio, HG, Moreira, E, Cunha, A, Pereira, D, Isabelle, (٦) L, Marques, A, Vieira, R & Cardoso, D 2023, “Form, data, matter: Photogrammetry and digital fabrication at the Service of Safeguarding the built Cultural Heritage,” Blucher Design Proceedings, 921–932, https://doi.org/10.5151/sigradi2022-sigradi2022_236
- Remondino, F. and Stylianidis, E. (2016) 3D Recording, (٧) Documentation and Management of Cultural Heritage. <https://www.amazon.com/Recording-Documentation-Management-Cultural-Heritage/dp/1498763030>
- Hazan, S. (2026). Digital Heritage. In The Encyclopedia of (٨) Archaeological Sciences, S.L. López Varela (Ed.). <https://doi.org/10.1002/9781119188230.saseas0109>
- Murphy, M., McGovern, E. and Pavia, S. (2009) ‘Historic building (٩) information modelling (HBIM)’, Structural Survey, 27(4), pp. 311–327 <https://doi.org/10.1108/02630800910985108>

- (١٠) Rizzo, D. et al. (2023b) 'From virtual reconstruction to additive manufacturing: application of advanced technologies for the integration of a 17th-Century wooden ciborium,' *Materials*, 16(4), p. 1424. <https://doi.org/10.3390/ma16041424.4>
- (١١) Li, Z., Zhang, Y. and Du, W. (2023) 'The Forward Modeling and 3D Printing of a Historical Building'. Available <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3696342/v1>
- (١٢) Alves, Gilfranco & Makert, Rodrigo. (2016). Between Designer and Design: Parametric Design and Prototyping Considerations on Gaudí's Sagrada Familia. *Periodica Polytechnica Architecture*. 1. 1. 10.3311/PPar.10335
- (١٣) Balletti, C., Ballarin, M. and Guerra, F. (2017) '3D printing: State of the art, considerations and future perspectives', *Journal of Cultural Heritage*, 26, pp. 172–182. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.02.010>
- (١٤) Avgerinou Kolonias, S. (2012) From the "Valletta Principles" towards the Safeguarding and Management of Historic Cities, Towns and Urban Areas. Athens: CIVVIH-ICOMOS. Available at: Academia.edu (Accessed: 12/1/2026)
- (١٥) الجبوري، ستار. (٢٠١٩) "الزخارف النباتية في عمارة القصر العباسي في بغداد: دراسة تحليلية"، مجلة جامعة النجاح للبحوث، ٣٣(٩). <https://doi.org/10.35552/0247-033-009-004>
- المصادر :**
١. ألفيس، جيلفرانكو وماكرت، رودريغو. (٢٠١٦). بين المصمم والتصميم: اعتبارات التصميم البرامترية والنماذج الأولية على كنيسة ساغرادا فاميليا لغودي. *Periodica Polytechnica Architecture*. 1. 10.3311/PPar.10335.
 ٢. أفغيرينو كولونياز، س. (٢٠١٢) من "مبادئ فاليتا" نحو حماية وإدارة المدن والمناطق الحضرية التاريخية. أثينا. CIVVIH-ICOMOS: متاح على Academia.edu (تم الوصول: ٢٠٢٦/١/١٢).
 ٣. أموريم، ل.إ.، سامبايو، ه.ج.، موريرا، إ.، كونه، أ.، بيريرا، د.، إيزابيل، ل.، ماركيز، أ.، فييرا، ر. و كاردوسو، د. (٢٠٢٣) "الشكل، البيانات، المادة: التصوير الفوتوغرافي والتصنيع الرقمي في خدمة حماية التراث الثقافي المبني"، إجراءات تصميم بلوشر، ص. ٩٢١-٩٣٢. https://doi.org/10.5151/sigradi2022-sigradi2022_236
 ٤. باليني، س.، بالارين، م. و غويرا، ف. (٢٠١٧) "الطباعة ثلاثية الأبعاد: الحالة الراهنة، الاعتبارات والآفاق المستقبلية"، مجلة التراث الثقافي، ٢٦، ص. ١٧٢-١٨٢. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.02.010>.

٥. فاي، س. وسيدور، م. (٢٠١٣) "نمذجة معلومات البناء وتوثيق التراث المعماري: بين 'النموذجي' والخاص"، المؤتمر الدولي للتراث الرقمي ٢٠١٣ (التراث الرقمي) IEEE، ص. ٧٣١-٧٣٤.
٦. الجبوري، ستار. (٢٠١٩) "الزخارف النباتية في عمارة القصر العباسي في بغداد: دراسة تحليلية"، مجلة جامعة النجاح للبحوث، ٣٣-٣٣، <https://doi.org/10.35552/0247-033-009-004>
٧. هازان، س. (٢٠٢٦). التراث الرقمي. في: موسوعة العلوم الأثرية، س.ل. لوبيز فارابلا (محرر). <https://doi.org/10.1002/9781119188230.saseas0109>
٨. ليتيلير، ر. (٢٠١٥) تسجيل، توثيق وإدارة المعلومات للحفاظ على المواقع التراثية. <https://doi.org/10.4324/9781315793917>
٩. لي، ز.، تشانغ، ي.، ودو، و. (٢٠٢٣). "النمذجة المتقدمة والطباعة ثلاثية الأبعاد لمبنى تاريخي". متاح على الرابط التالي: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3696342/v1>
١٠. مورفي، م.، ماكجوفن، إ. وبافيا، س. (٢٠٠٩) "نمذجة معلومات المباني التاريخية" (HBIM)، المسح الإنشائي، ٢٧(4)، ص. ٣١١-٣٢٧.
١١. نجيب أوغلو، غ. والأسعد، م. (١٩٩٥) "الفافة توبكابي: الهندسة والزخرفة في العمارة الإسلامية: مكتبة متحف قصر توبكابي. <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BA28363784>. MS H. 1956".
١٢. ريموندينو، ف. وكامبان، س. (٢٠١٤) التسجيل والنمذجة ثلاثية الأبعاد في علم الآثار والتراث الثقافي: النظرية وأفضل الممارسات. جامعة ميشيغن Press. <https://doi.org/10.30861/9781407312309>
١٣. ريموندينو، ف. وستيليانديس، إ. (٢٠١٦) التسجيل، التوثيق وإدارة التراث الثقافي ثلاثي الأبعاد. <https://www.amazon.com/Recording-Documentation-Management-Cultural-Heritage/dp/1498763030>
- ريستو، دانييلي، فيكو، دومينيكو، مونتانا، فابيو، كاتشيارو، روبرتو، وكورتشيني، كارلو إرنستو (٢٠٢٣)، من إعادة البناء الافتراضي إلى التصنيع بالإضافة: تطبيق التقنيات المتقدمة في تكامل مظلة خشبية تعود إلى القرن السابع عشر، مواد، المجلد ١٦، العدد ٤، ص ١٤٢٤، <https://doi.org/10.3390/ma16041424>

References:

1. Alves, Gilfranco & Makert, Rodrigo. (2016). Between Designer and Design: Parametric Design and Prototyping Considerations on Gaudí's Sagrada Familia. Periodica Polytechnica Architecture. 1. 1. 10.3311/PPar.10335.
2. Amorim, LE, Sampaio, HG, Moreira, E, Cunha, A, Pereira, D, Isabelle, L, Marques, A, Vieira, R & Cardoso, D 2023, "Form, data, matter: Photogrammetry and digital fabrication at the Service of Safeguarding the built Cultural Heritage," Blucher Design Proceedings, 921-932, https://doi.org/10.5151/sigradi2022-sigradi2022_236.

3. Avgerinou Kolonias, S. (2012) From the "Valletta Principles" towards the Safeguarding and Management of Historic Cities, Towns and Urban Areas. Athens: CIVVIH-ICOMOS. Available at: Academia.edu (Accessed: 12/1/2026).
4. Balletti, C., Ballarin, M. and Guerra, F. (2017) '3D printing: State of the art, considerations and future perspectives', Journal of Cultural Heritage, 26, pp. 172–182. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.02.010>.
5. Fai, S. and Sydor, M. (2013) 'Building information modelling and the documentation of architectural heritage: between the "typical" and the "specific"', 2013 Digital Heritage International Congress (Digital Heritage). IEEE, pp. 731–734.
6. Hazan, S. (2026). Digital Heritage. In The Encyclopedia of Archaeological Sciences, S.L. López Varela (Ed.). <https://doi.org/10.1002/9781119188230.saseas0109>
7. Al-Jubouri, S. (2019) "Vegetal Ornamentation in the Architecture of the Abbasid Palace in Baghdad: An Analytical Study," An-Najah University Journal of Research, 33(9). <https://doi.org/10.35552/0247-033-009-004>
8. Letellier, R. (2015) Recording, documentation and information management for the conservation of heritage places. <https://doi.org/10.4324/9781315793917>.
9. Li, Z., Zhang, Y. and Du, W. (2023) 'The Forward Modeling and 3D Printing of a Historical Building'. Available at: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3696342/v1>.
10. Murphy, M., McGovern, E. and Pavia, S. (2009) 'Historic building information modelling (HBIM)', Structural Survey, 27(4), pp. 311–327 <https://doi.org/10.1108/02630800910985108>
11. Necipoğlu, G. and Al-Asad, M. (1995) The Topkapi Scroll: Geometry and Ornament in Islamic Architecture: Topkapi Palace Museum Library MS H. 1956. <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BA28363784>.
12. Remondino, F. and Campana, S. (2014) 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage: Theory and Best Practices. University of Michigan Press. <https://doi.org/10.30861/9781407312309>
13. Remondino, F. and Stylianidis, E. (2016) 3D Recording, Documentation and Management of Cultural Heritage. <https://www.amazon.com/Recording-Documentation-Management-Cultural-Heritage/dp/1498763030>
14. Rizzo, D, Fico, D, Montagna, F, Casciaro, R & Corcione, CE 2023, "From virtual reconstruction to additive manufacturing: application of advanced technologies for the integration of a 17th-Century wooden ciborium," Materials, 16(4):1424, <https://doi.org/10.3390/ma16041424>.