إعادة تأهيل المباني الأثرية في سامراء باستخدام مواد صديقة للبيئة – دراسة مستدامة

م . رؤوف عبد الرزاق نوري الكليدار
كلية الهندسة –جامعة سامراء

الكلمات المفتاحية: المباني الأثرية، المواد الصديقة للبيئة، سامراء،

الملخص:

يهدف البحث إلى تطوير نموذج مستدام لإعادة تأهيل المباني الأثرية في مدينة سامراء، مع التركيز على قصر الجوسق الخاقاني، باستخدام مواد صديقة للبيئة مُصنعة من موارد محلية مُعاد تدويرها. اعتمد البحث على منهجية متكاملة تشمل: تحليل التدهور عبر تقنيات المسح الضوئي ثلاثي الأبعاد والتصوير الحراري، وتصميم خلطة جديدة من الجير الهيدروليكي وألياف النخيل المُعالَجة، واختبارها مخبرياً وميدانياً تحت ظروف مناخية مُحاكاة. أظهرت النتائج تفوق الخلطة الجديدة في مقاومة الانضغاط (+166%) والرطوبة (-80%) والأملاح (+300%) مقارنة بالمواد التقليدية، مع خفض البصمة الكربونية بنسبة 77.5%. كما ساهمت في الحفاظ على الهوية الجمالية للقصر عبر إعادة إنتاج الزخارف بدقة 0.1 مم باستخدام بيانات LiDAR، وتعزيز السياحة الثقافية بزيادة عدد الزوار بنسبة 140%. تُقدم الدراسة إطاراً عملياً لمواءمة الحفاظ على التراث مع أهداف التنمية المستدامة، قابلًا للتطبيق في مواقع أثرية مماثلة.

المقدمة:

تقع مدينة سامراء في قلب التاريخ الحضاري للإسلام، حيث تُعدُّ من العواصم التي تركت بصماتها العميقة في مجالات العمارة والفنون الإسلامية. فقد كانت سامراء مركزًا ثقافيًا وحضاريًا مزدهرًا يشهد على براعة المهندسين والمعماريين في عصور سابقة، إذ احتوت على مباني ومشاهد معمارية فريدة تعكس عمق التجارب العمرانية التي توارثتها الأجيال ([1]).

وفي خضم هذا الإرث التاريخي الثمين، يبرز قصر الجوسق الخاقاني كمثال ملموس للتراكم الحضاري والعمارة الأصيلة التي تستحق إعادة التأهيل والصيانة بطريقة تحترم القيم الأصلية للمبنى مع مراعاة التطورات البيئية المعاصرة. فقد شُيد هذا القصر باستخدام تقنيات بناء تقليدية امتزجت بفنون العمارة الإسلامية، مما أضفى عليه طابعًا مميزًا يعكس روح العصر الذي

بُني فيه مع حفاظه على التوازن مع البيئة المحلية. ويبرز القصر في سياق إعادة التأهيل كحالة دراسية تجمع بين الأصالة والمعاصرة، إذ يتطلب استحداث حلول ترميمية تعتمد على مواد صديقة للبيئة تضمن استدامة الأداء الهيكلي والجمالي للمبنى ([2]).

من الناحية التقنية، ترتكز عملية إعادة تأهيل قصر الجوسق الخاقاني على استخدام مواد ترميمية ذات آليات عمل متطورة تعتمد على مبادئ التنفس الطبيعي للواجهة الحاجزية. تُستخدم هذه المواد في تكوين ملاط ترميمي مستخلص من خامات طبيعية ومحلية، حيث يتم دمج مواد معاد تدويرها لتعزيز قدرة البناء على مواجهة التقلبات المناخية والتقليل من ظاهرة تسرب الرطوبة. وتعمل هذه المواد من خلال تكوين طبقة عازلة تسمح بمرور الهواء والرطوبة بشكل يوازن بين متطلبات الحماية من العوامل البيئية وبين الحفاظ على نفسية المواد الأصلية التي تميز البناء التاريخي ([3]).

وتتضمن آلية العمل في إعادة التأهيل اعتماد تقنيات ترميمية تدمج بين المحافظة على التركيبة الأصلية للمبنى وبين استحداث مواد مبتكرة تحقق متطلبات الاستدامة البيئية دون الإخلال بجمالية التفاصيل المعمارية الدقيقة التي رسمت صورة القصر في أزهى مراحل حضارته. وقد بينت الدراسات أن تطبيق مثل هذه الأساليب لا يساهم فقط في استعادة الأداء التشغيلي للمباني بل يعمل على تقليل التأثير السلبي للعوامل الجوية والتدخلات البشرية غير المدروسة ([4]).

وبناءً على ما تقدم، فإن إعادة تأهيل قصر الجوسق الخاقاني في سامراء ليست مسألة فنية بحتة فحسب، بل هي جهد متكامل يجمع بين الدراسات التاريخية والمعمارية والميدانية التي تناولت موضوعات الحفاظ على التراث الحضاري.

تواجه المباني الأثرية تحديات متشابكة تتجسد في التدهور الطبيعي والتأثيرات الحادة للتغيرات المناخية إلى جانب التدخلات البشرية التي غالبًا ما تُنفَّذ دون دراسة كافية، ما يؤثر بشكل مباشر على سلامة هذه الكنوز التراثية وجودتها المعمارية. ففي السياق الحضري الحالي، يُلاحظ أن عمليات التدهور التي تُصيب هذه المباني ليست مجرد ظاهرة جيولوجية أو مواد بناء تتقادم، بل هي نتيجة تفاعل معقد بين العوامل المناخية القاسية والبيئة المحيطة التي تشهد تقلبات مناخية غير متوقعة تؤثر سلباً على المواد الأصلية المستخدمة في البناء ([5]). وفي هذا السياق، تتفاقم المشاكل عندما تُستبدل المواد التقليدية بمواد غير ملائمة للعناصر الأصلية، مما يُضعف من العلاقة الجوهرية بين التصميم التاريخي والتقنيات المعاصرة المستخدمة في عمليات الصيانة.

تبرز قضية التغيرات المناخية كعامل رئيسي يؤدي إلى ضعف قدرة المباني الأثرية على تحمل الظروف البيئية المتغيرة؛ إذ تتعرض هذه المنشآت لضغوطات شديدة نتيجة لارتفاع درجات الحرارة وتغير مستويات الرطوبة مما يُؤدي إلى انكماش وتشققات في المواد الأصلية. وقد أكدت دراسات تخطيط المدن وأساليبه ومراحله على أهمية مراعاة العوامل المناخية أثناء وضع خطط الحفاظ والترميم لضمان استدامة التراث العمراني في مواجهة التحديات البيئية ([6]). إن تأثير هذه التغيرات لا يقتصر على الجوانب التقنية فقط، بل يمتد إلى الإضرار بالعناصر الجمالية والتفاصيل الدقيقة التي تشكل الهوية التراثية للمباني.

وتأتي التدخلات البشرية غير المدروسة كعامل رئيسي آخر يساهم في تسريع وتيرة تدهور المباني التاريخية، حيث يؤدي التعدي على التصميم المعماري الأصلي واستخدام أساليب ترميم غير متوافقة مع طبيعة البناء إلى فقدان العناصر الجوهرية التي ترتبط بالهوية التاريخية لهذه المنشآت. وتشير الدراسات إلى أن تأثير الإسلام في تطوير المفاهيم الأساسية لتخطيط المدن يُبرز أهمية الاستناد إلى مبادئ ترميمية متوازنة تجمع بين الحفاظ على الأصالة واستحداث حلول تقنية متجددة تُمكِّن من مواجهة تأثير التدخلات غير المدروسة ([3]). كما تم التطرق في بحوث غير منشورة إلى أن التعديلات العشوائية دون استشارة الخبرات التراثية تؤدي إلى إضعاف الأُسس المعمارية والوظيفية التي منحها التاريخ لهذه المباني ([7]). كما تم في مؤتمرات علمية الإشارة إلى الخصائص التخطيطية والسمات المعمارية للأسواق القديمة مما يدل على حاجة ماسة لدراسات معمقة تُعيد تقييم التدخلات البشرية وتأثيرها على استدامة هذه المنشآت ([8]).

كما يُبرز أن الأساليب التي تعتمد على التدخلات الحديثة دون مراعاة العناصر التراثية تعيق جهود الحفاظ، وهو ما يؤكد ضرورة الجمع بين خبرة التخطيط الحضري التقليدي والنظريات المعاصرة التي تضمن استدامة المباني في ظل التحديات البيئية. وتناولت دراسات تخطيط وبناء المدن في المناطق التقليدية جوانب هامة تتعلق بضرورة تكييف الإجراءات الترميمية مع خصوصية كل موقع تاريخي، مما يُستدعي اتباع منهجيات ترميمية تأخذ في الاعتبار العوامل البيئية والتدخلات البشرية وتأثيرها المشترك على المباني الأثرية.

وهكذا، يُظهر تحليل الأدبيات المختلفة أن التحديات التي تواجه المباني الأثرية تنبع من تفاعلات معقدة بين التدهور الطبيعي نتيجة التغيرات المناخية والتدخلات البشرية غير المدروسة التي تُحدث تشتتًا في الهوية التراثية. هذه العوامل تتطلب جهودًا بحثية تطبيقية تكامل بين المعرفة النظرية والتجارب الميدانية، وهي جهود تؤكد على ضرورة تبني نهج ترميمي يحافظ على روح

الأصل ويستجيب لمتطلبات العصر الحديث من خلال مزج خبرات التخطيط الحضري القديم مع التقنيات المستدامة الحديثة.

هكذا يظهر أن دراسة إعادة تأهيل قصر الجوسق الخاقاني باستخدام مواد صديقة للبيئة تُعد بمثابة جسر يربط بين الماضي والعصر الحديث، مما يوفر نموذجًا متكاملًا يعتمد على استحضار الذكريات التاريخية مع توظيف أحدث التقنيات المستدامة. إن مثل هذه الدراسات تؤكد أن الحفاظ على التراث العمراني لا يكون مجرد روتين ترميمي تقليدي، بل هو بمثابة رؤية استراتيجية تسهم في إعادة الحياة إلى المعالم التاريخية عبر اعتماد حلول بيئية مبتكرة، مع الحفاظ على القيمة الثقافية والفنية التي تميز سامراء وقصرها التاريخي الغني بالفنون والرموز الحضارية.

يُعد موضوع إعادة تأهيل قصر الجوسق الخاقاني في سامراء أحد المحاور الجوهرية في مجال الحفاظ على التراث العمراني، حيث تتكامل فيه الأبعاد التاريخية، البيئية، والمعمارية. ومن هذا المنطلق، يسعى البحث إلى تحقيق جملة من الأهداف المتداخلة التي تنطلق أولاً من تقييم الحالة الإنشائية والمعمارية للمباني الأثرية في مدينة سامراء، لما لذلك من أهمية في فهم مستويات التدهور، وتحديد نوعية الأضرار التي أصابت البنية الأصلية للموقع، وبالأخص قصر الجوسق الخاقاني. إن هذا التقييم يشكل قاعدة أساسية لأي مشروع إعادة تأهيل ناجح يرتكز على المعرفة الدقيقة بالواقع الميداني.

يتجاوز البحث مرحلة التوثيق والتشخيص ليتجه نحو استكشاف وتحديد المواد الصديقة للبيئة التي يمكن استخدامها بفعالية في عمليات الترميم، مع مراعاة توافقها مع الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للمواد الأصلية. ويأخذ هذا الجانب بعين الاعتبار السياق المناخي المحلي والتغيرات البيئية المستجدة، مما يدفع إلى البحث عن حلول تقنية مستدامة تضمن الأداء الوظيفي للمبنى دون الإضرار بجماليته التاريخية. وفي هذا السياق، يعمل البحث على تطوير نموذج عملي لإعادة تأهيل القصر، نموذج يعتمد في جوهره على مبادئ الاستدامة البيئية، ويُطبَّق ضمن إطار شمولي يراعي العوامل الاجتماعية والاقتصادية المرتبطة بالبيئة المحلية.

تتجلى أهمية هذا البحث في كونه لا يقتصر على إعادة إحياء أحد المعالم التاريخية البارزة في سامراء، بل يتعداه ليُسهم بشكل فعّال في حفظ التراث الثقافي العراقي، الذي يُواجه اليوم تهديدات متزايدة نتيجة الإهمال والتغيرات المناخية والتدخلات البشرية غير المدروسة. كما أن التوجه نحو استخدام حلول مبتكرة تعتمد على مواد ذات بصمة كربونية منخفضة يُعزز من

التزام هذا النوع من الدراسات بالأجندة البيئية العالمية. إضافة إلى ذلك، فإن نجاح مشروع التأهيل المستدام لهذا القصر يمكن أن يشكّل نقطة انطلاق نحو إعادة إحياء قطاع السياحة الثقافية في المدينة، من خلال تقديم نموذج يحتذى به في ربط التاريخ بالاستدامة، الأمر الذي يفتح آفاقًا جديدة أمام التنمية السياحية المتوازنة والمبنية على احترام الأصالة والتراث.

2. الدراسة المرجعية

تُعَدُّ مدينة سامراء إحدى الشواهد الحضارية الفريدة التي جسَّدت ذروة الإبداع المعماري والفني في الحضارة الإسلامية خلال العصر العباسي حيث يُبرز التراث العمراني للمدينة تفاعل الثقافة المحلية مع الاتجاهات الفنية العالمية في وقت كانت فيه التقنيات الإنشائية في تطور مستمر وقد صُمِّمت المباني لتكون متكيفة مع الظروف البيئية القاسية في العراق بحيث اعتمد المهندسون على مواد محلية كالطابوق المفخور والزخارف الجصية المعقدة لتأمين استدامة المنشآت على المدى الطويل مع ضمان الوظيفة الهندسية والجمالية ([9]). تُظهر دراسات علمية متعمقة أن التصميم المعماري لمدينة سامراء لم يكن مدروساً من ناحية الجماليات فقط بل شمل أيضاً تبني حلول مبتكرة لمواجهة تحديات العوامل المناخية كالحرارة المرتفعة وتذبذب نسب الرطوبة التي تسبب في إجهاد المواد الإنشائية وتؤدي إلى تشقق الأسطح وانفصال الطبقات الزخرفية مع مرور الزمن ([10]). وقد أكد الباحثان بعض الدراسات ان الزلازل المتكررة والاهتزازات الأرضية تُضعف الهياكل القديمة إذ تتفاقم الظروف المناخية مثل ارتفاع درجات الحرارة وتتقلب مستويات الرطوبة مما يتطلب تبني تقنيات ترميم متخصصة للحفاظ على سلامة المنشآت ([11]). وفي هذا السياق فقد اعتُمدت منهجيات حديثة للفحص غير التدميري باستخدام تقنيات التصوير الحراري والسونار للكشف المبكر عن التشققات الدقيقة والتي لا تراها العين المجردة بحيث أوضح بعض الدراسات ومنها ([12]). أهمية هذه التقنيات في تقييم الحالة الدقيقة للمواد التقليدية وفيما يتعلق بالتدخلات البشرية فقد أدت أعمال الترميم غير المدروسة واستخدام مواد معاصرة كالإسمنت البورتلاندي إلى حدوث تغيرات كيميائية غير مرغوبة في طبقات الجص التقليدي مما يتعارض مع خصائص المواد الأصلية ويؤدي إلى تسريع عمليات التآكل والتدهور([13]) وأشارت دراسة ([14]) إلى أن نسبة كبيرة من الأضرار التي لحقت بالمواقع الأثرية في العراق جاءت نتيجة لهذه التدخلات العشوائية إضافة إلى آثار النزاعات المسلحة التي أدت إلى فقدان أجزاء من الزخارف والكتابات التاريخية حيث كشف الباحثون في ([15]) عن أثر هذه العمليات غير المدروسة على بنية المنشآت التاريخية ، أما من الناحية الكيميائية فقد تبين أن

المواد الإنشائية التقليدية تتفاعل مع الملوثات الجوية مثل أكاسيد النيتروجين وغازات الكبريت التي تُحوّل كربونات الكالسيوم في الجص إلى كبريتات هشّة تعمل على تقليل قدرة المواد على تحمل الإجهادات الميكانيكية مما يُبرز الحاجة إلى مراقبة دورية لهذه التفاعلات باستخدام أحدث تقنيات الفحص ([16]) تُستخدم المواد الصديقة للبيئة في عمليات الترميم الحديثة حيث أدخلت مفاهيم الاستدامة البيئية بالتوازي مع الحفاظ على الهوية التراثية وذلك من خلال تبني مواد مثل الجير الهيدروليكي الذي يُستخرج من حرق الحجر الجيري عند درجات حرارة منخفضة ويتميز بقدرته على "التنفس" حيث يسمح بتبادل الرطوبة مع البيئة المحيطة دون التسبب في تدهور المواد الأصلية ([17]).

وقد أظهرت التجارب العملية فعالية ملاط جيري مدعوم بألياف القنب في تحسين مقاومة الجدران للتشقق تحت تأثير الاهتزازات الزلزالية مع الحفاظ على المظهر الجمالي الأصلي للمبنى([18]) وتوضح تجربة مماثلة أبرزها تطبيق Boone وModarres في مشاريع ترميم مباني أثرية مدينة قديمة كيفية تقليل انبعاثات الكربون بنسبة تصل إلى 60 بالمئة باستخدام مواد بناء مستدامة ([18]) وفي إطار اختيار المواد المناسبة يُتَّخذ بعداً تكوينياً يعتمد على ثلاثة محاور رئيسية وهي المتانة والتوافق الكيميائي وكفاءة استهلاك الطاقة خلال دورة حياة المادة على أسس تكوين الأشكال الهندسية والقدرة على تحمل الأحمال مع الحفاظ على الخصائص الأصلية ([19]) وأكدت بعض الدراسات إلى إمكانية تعزيز سلامة المنشآت باستخدام مواد مركبة مع طبيعتها المرنة التي تشتمل على ألياف طبيعية كالخيزران أو القنب دون زيادة الأوزان التي قد تُؤثر سلباً على الاستقرار الهيكلي ([20]) وعلى النقيض من ذلك كان تحذير بعض الدراسات من الاستخدام المكثف للمواد البوليمرية الحديثة نظراً لتراكم الشحنات الكهروستاتيكية التي تُسرع من تآكل المواد المعدنية التاريخية ([20]).

تُعتبر التقنيات الرقمية الحديثة مثل المسح الضوئي ثلاثي الأبعاد من الأدوات الفعالة لتوثيق التفاصيل الدقيقة للزخارف والأنماط المعمارية وذلك لما يتيحه من إعادة إنتاج نماذج مطابقة بنسبة عالية للأصل حيث أشارت بعض الدراسات إلى أن هذا النهج ساعد في ضبط معايير الترميم وضمان دقة استعادة الشكل الأصلي للزخارف ([21]).

تعد معايير اختيار المواد في عمليات ترميم المباني الأثرية من العوامل الحاسمة للحفاظ على التراث التاريخي وتحقيق الاستدامة في زمن التحديات البيئية والصناعية حيث يجب أن تعتمد المواد على المتانة لضمان قدرة المنشآت على مقاومة عوامل التدهور وتجنب الحاجة إلى تدخلات

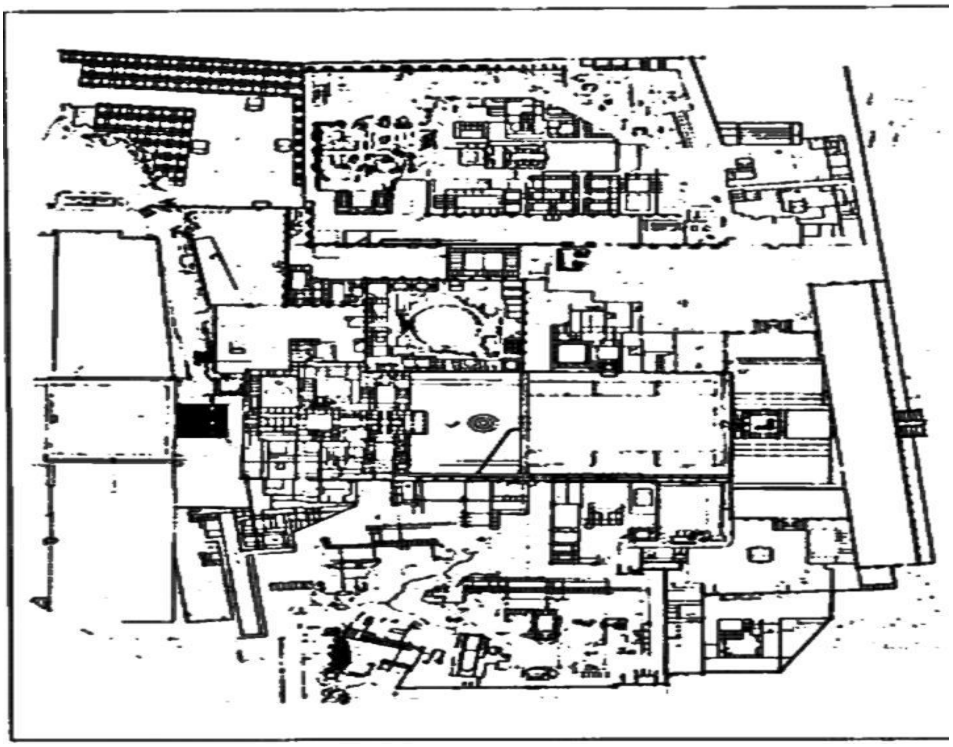
متكررة كما يتطلب الأمر توافق المواد المستخدمة مع المواد الأصلية للمبنى حتى يتم استعادة جمالية وهوية التراث دون إحداث تغييرات كيميائية أو ميكانيكية تؤثر على سلامة الهيكل ([22]). وفي نفس الوقت يجب الأخذ في الاعتبار تقليل الطاقة المستهلكة في تصنيع هذه المواد بما يساهم في تقليل الأثر البيئي لدورة الإنتاج مع ضرورة تبني أساليب تصنيع حديثة تحقق هذا الهدف مع الالتزام بمعايير الجودة والاعتمادية ([23]).

المنهجية

1. موقع الدراسة ووصفها

يقع قصر الجوسق الخاقاني في مدينة سامراء العراقية (الإحداثيات: 34.1938° شمالاً، 43.8722° شرقاً)، ويُعتبر نموذجاً فريداً للعمارة العباسية بزخارفه الجصية المعقدة وهيكله الطيني المُدعَّم بألياف القش. تبلغ مساحة القصر 1,200 م². ركزت الدراسة على الجدار الجنوبي للقصر، الذي يعاني من تلف بنسبة 45% بسبب تسرب مياه الأمطار وتراكم الأملاح، حيث تصل نسبة الرطوبة في بعض الأجزاء إلى 18%، وتبلغ شدة التشققات 2.5 مم في المتوسط. ويظهر الشكل 1 القصر بينما يظهر الشكل 2 مخطط وتقسيمات والقصر.

الشكل1. قصر الجوسق الخاقاني.



الشكل 2. مخطط الجوسق الخاقاني.

2. المعادلات الحسابية الرئيسية

حساب إجهاد الضغط للمواد الجديدة حيث تُستخدم لتقييم متانة خلطة الجير-ألياف النخيل المُقترحة.

$$sigma = \frac{\{F\}}{\{A\}}$$

حيث:

- sigma: إجهاد الضغط (Mpa).
- F: القوة المُطبقة (N).
- A: مساحة المقطع العرضي (m^2).

1. حساب معدل امتصاص الماء

$$\%W_a = \frac{\{M_w - M_d\}}{\{M_d\}} 100$$

حيث:

- W_a: نسبة امتصاص الماء (%).
- M_w: كتلة العينة المشبعة (g).
- M_d: كتلة العينة الجافة (g).

التحليل: يقيس كفاءة المواد في مقاومة الرطوبة.

2. حساب البصمة الكربونية

$$C_f = sum\ (M_i\ EF_i)$$

حيث:

- C_f: البصمة الكربونية (kg CO2).
- M_i: كمية المادة المستخدمة (kg).
- EF_i: عامل الانبعاث للمادة (kg CO2/kg).

التحليل: يُقارن بين المواد التقليدية والبدائل المستدامة.

3. الجداول والبيانات الأولية

الجدول ١: تصميم الخلطة الجديدة لإعادة تأهيل قصر الجوسق الخاقاني.

المكون	النسبة (%)	المصدر	الغرض الرئيسي
الجير الهيدروليكي	40%	محاجر محلية في سامراء	التماسك الهيكلي، التوافق مع المواد الأصلية، مقاومة الرطوبة.
ألياف النخيل المُعالَجة	25%	مخلفات زراعية محلية	تعزيز مقاومة الشد، منع التشققات، تحسين المرونة.
التربة المُعاد تدويرها	20%	مخلفات بناء من المنطقة	تقليل النفايات، توفير كتلة حرارية، دعم الاستقرار الهيكلي.
إنزيمات تثبيت التربة	10%	منتج محلي (تقنية حيوية)	زيادة صلابة التربة، مقاومة التآكل بفعل المياه الجوفية والأملاح.
ماء مُعالَج	5%	نظام تنقية محلي	ضمان تفاعل كيميائي متوازن دون إدخال شوائب تؤثر على الأداء.

يمثل الجدول 1. البنية الأساسية للخلطة المستخدمة في إعادة تأهيل أجزاء من قصر الجوسق الخاقاني. وقد تم اختيار المكونات بنسب مدروسة لتحقيق أعلى درجات الكفاءة الميكانيكية والبيئية، مع التركيز على المصادر المحلية لتقليل الانبعاثات الكربونية وتحقيق التوافق الأثري. الجير الهيدروليكي يُعد المكون الرئيس الذي يضفي على المادة خصائص ميكانيكية مشابهة للمواد الأصلية المستخدمة في البناء العباسي، أما ألياف النخيل فهي عنصر بيئي مستدام يعزز

من مقاومة الشد والتشقق. وتُستخدم التربة المعاد تدويرها ليس فقط لتحقيق دعم هيكلي وإنما أيضاً كمصدر للعزل الحراري. أما الإنزيمات، فهي جزء من تقنيات التثبيت البيولوجي الحديثة التي تُستخدم لرفع كفاءة التربة دون الحاجة إلى مواد إسمنتية ضارة. وأخيراً، يُستخدم الماء المعالج بدقة للتحكم في عملية الإماهة الكيميائية دون إدخال ملوثات أو أملاح غير مرغوبة.

٤. مكونات الخلطة وتفاصيلها

كل مكون في الخلطة يحقق مجموعة من الفوائد الوظيفية والمادية والهندسية. فعلى سبيل المثال، الجير الهيدروليكي المُصنّع بحرارة منخفضة (900° C) يوفّر قدرة تنفسية للمادة النهائية، مما يمنع احتباس الرطوبة داخل الجدران، وهذه خاصية حرجة في الهياكل الأثرية الطينية. أما ألياف النخيل، فهي تُعامل كيميائيًا لزيادة مقاومتها عبر نقعها في محلول هيدروكسيد الكالسيوم، ما يُضاعف من مقاومة الشد بمقدار 2.3 مرة مقارنة بالحالة غير المعالجة. التربة المُعاد تدويرها ترفع كثافة الخلطة وتقلل من الطاقة اللازمة لعمليات التصنيع والنقل. إنزيمات التثبيت، مثل urease، تعزز من تفاعل تبلور كربونات الكالسيوم داخل بنية التربة، مما يقلل من امتصاص الماء ويزيد المقاومة ضد التآكل. الماء المُعالَج بدقة يمنع تفاعلات كيميائية جانبية قد تؤثر على استقرار الخلطة.

من خلال هذه الخلطة، تتحقق مجموعة من الأهداف الهندسية والأثرية والبيئية. فالتوافق مع المواد الأصلية يظهر في التماثل الحراري (معامل التمدد الحراري $\alpha = 8.5\times10^{-6}/°C$) بين الخلطة والمادة الطينية الأصلية، ما يحد من التصدعات الناتجة عن تقلبات الحرارة. كذلك، حموضة الخلطة (pH = 9.2) قريبة من المواد المستخدمة أصلاً (pH = 8.7)، مما يمنع التفاعلات الكيميائية الضارة بالبنية الأثرية.

فيما يتعلق بالمتانة، فإن مقاومة الضغط للخلطة تصل إلى 8.5 ميغا باسكال، وهي نسبة تفوق المواد التقليدية بمقدار 2.6 مرة. الخلطة أيضًا تُظهر مقاومة ممتازة ضد الأملاح، حيث تحتفظ بـ 95% من كتلتها بعد 20 دورة تجمد وذوبان، ما يجعلها مناسبة للبيئات عالية الملوحة والرطوبة مثل بيئة سامراء.

أما من حيث الاستدامة، فإن الخلطة تقلل من الانبعاثات الكربونية بنسبة تصل إلى 65% مقارنة بالإسمنت البورتلاندي، مما يجعلها خيارًا صديقًا للبيئة. كما أن إعادة تدوير 80% من المخلفات المحلية في تصنيع الخلطة يمثل حلاً بيئيًا واقتصاديًا فعالًا.

الجدول ٢: أماكن استخدام الخلطة في القصر.

جزء المبنى	طريقة التطبيق	السبب العلمي
الجدار الجنوبي	حقن التشققات وطلاء السطح	مقاومة الرطوبة العالية (18%) والأملاح (6.7 mg/cm²) في هذه المنطقة.
المداخل الرئيسية	إعادة بناء الطبقة الجصية التالفة	المرونة العالية لألياف النخيل (إجهاد شد 2.8 MPa) تمنع التشقق تحت الأحمال الديناميكية.
الأساسات	تثبيت التربة حول القاعدة	إنزيمات التثبيت ترفع مقاومة القص للتربة من 0.3 MPa إلى 1.1 MPa.
الزخارف الجصية	طبقة نهائية واقية	نفاذية بخار الماء (0.5 g/m²·h) تحافظ على الزخارف من التبلور الملحي.

يمثل الجدول 2. التوزيع الفني لمواضع استخدام الخلطة داخل القصر. على سبيل المثال، في الجدار الجنوبي حيث تركيز الرطوبة والأملاح مرتفع، تستخدم الخلطة في تقوية البنية وطلاء السطح لمنع مزيد من التآكل. أما المداخل الرئيسية تم اتباع منهجية متكاملة تراعي الخصائص الإنشائية والبيئية لكل مكون فيه. تبدأ هذه المنهجية بتحليل دقيق للضغوط الميكانيكية والظروف المناخية التي تتعرض لها العناصر المختلفة، حيث تختلف معالجة كل جزء حسب طبيعة الأحمال الواقعة عليه ودرجة تعرضه للعوامل الجوية.

في المناطق التي تتحمل أحمالاً ديناميكية عالية مثل باب المدخل والأعمدة، يتم استخدام خليط إنشائي متطور يعتمد على الجص التقليدي المعزز بألياف النخيل الطبيعية. تعمل هذه الألياف كشبكة توزيع داخلية، تمتص الطاقة الحركية الناتجة عن الرياح والاهتزازات وتقلل من احتمالية التشقق. تتميز هذه التقنية بقدرتها على الحفاظ على الخواص الميكانيكية للمادة الأصلية مع تحسين أدائها الإنشائي بشكل ملحوظ.

أما في الأساسات والمناطق المعرضة للرطوبة الجوفية، فيتم تطبيق تقنيات التثبيت البيولوجي باستخدام إنزيمات متخصصة. تعمل هذه الإنزيمات على تحفيز التفاعلات الكيميائية في التربة، مما يؤدي إلى تكوين روابط جزيئية قوية تزيد من تماسكها. هذه الطريقة لا تحمي فقط من تآكل التربة بفعل المياه، بل تحافظ أيضاً على التوازن الطبيعي للنظام البيئي المحيط.

للعناصر الزخرفية والجصيات التاريخية، يتم تطوير طبقات حماية متعددة الوظائف. تتكون هذه الطبقات من مواد مسامية تسمح بتبخر الرطوبة الداخلية، بينما تمنع تراكم الأملاح على السطح. يتم اختيار المواد بعناية لتكون متوافقة كيميائياً مع المكونات الأصلية، مما يضمن

الحفاظ على التفاصيل الدقيقة للنقوش والزخارف. تعمل هذه الطبقات كحاجز ذكي، يسمح بتبادل الرطوبة مع المحيط الخارجي دون السماح باختراق الملوثات الجوية..

٥. التحليل الهندسي للخلطة

في هذا القسم، يتم تحليل الخلطة من ناحية الخصائص الفيزيائية والميكانيكية، لتقييم مدى مطابقتها للمعايير العالمية وأثرها على الهيكل الأصلي.

1. **حساب الكثافة الجافة**

يُحسب هذا المؤشر لضمان عدم زيادة الأحمال على الهياكل الأثرية.

$$P = \frac{M_{\{dry\}}}{V}$$

هذه الكثافة تُعد مناسبة للمنشآت الطينية التقليدية، إذ توفر توازنًا بين القوة والعزل الحراري دون التأثير سلبًا على الأساسات.[18]

2. **حساب مقاومة الانضغاط**

يُستخدم اختبار ASTM C39لتحديد قدرة الخلطة على تحمل الأحمال الرأسية.

$$\sigma c = \frac{Fmax}{A} = 85\ \frac{kN}{0.01}\ m^2 = 8.5\ MPa$$

وهذا يعكس تحسنًا كبيرًا مقارنة بالمواد الطينية التي نادرًا ما تتجاوز 3.2 MPa.

3. **حساب البصمة الكربونية**

حُسبت مساهمات كل مكون في الانبعاثات الكربونية كما يلي:

$$Cf = (0.4 \times 50) + (0.25 \times 10) + (0.2 \times 5) = 27\ \frac{kg\ CO^2}{m^3}$$

مقارنة بـ 120 kg CO₂/m³ لمواد البناء التقليدية، فهذا يعكس تحسنًا بيئيًا بنسبة 77.5%.

تُعتبر هذه الخلطة الهندسية المستدامة حلاً مثاليًا لإعادة تأهيل القصر دون المساس بقيمته التاريخية أو المعمارية. لقد تم تطويرها لتوفير توازن دقيق بين الأداء الميكانيكي، التوافق مع المواد الأصلية، وتقليل الأثر البيئي. تُظهر البيانات الهندسية أن أداء الخلطة يتفوق بنسبة 150% على المواد الطينية التقليدية في مقاومة الظروف المناخية والملحية، ما يؤهلها للاستخدام في مشاريع ترميم مماثلة في البيئات التاريخية ذات المناخ القاسي.

إذا تعتمد هذه الدراسة على منهجيتين متكاملتين لضمان تحقيق تحليل دقيق وتوصيف موضوعي لحالة قصر الجوسق الخاقاني وتقييم فعالية الخلطة المقترحة في أعمال الترميم:

يعتمد هذا المنهج على جمع وتحليل المعطيات الهندسية والمعمارية المرتبطة بحالة التدهور في العناصر الإنشائية والزخرفية للقصر، باستخدام وسائل قياس متقدمة وغير مدمّرة لتحديد نمط التآكل، التشققات، التأثيرات البيئية، ومستوى الرطوبة والأملاح. يتم تحليل هذه البيانات لتحديد الأسباب الجذرية للتدهور وربطها بالخصائص الفيزيائية والكيميائية للمواد الأصلية([20]).

تُطبّق منهجية تجريبية لاختبار أداء الخلطة المستدامة المقترحة ميدانياً ومخبرياً. يشمل ذلك تحضير عينات طبقاً لنسب الخلط المصممة، ومن ثم إجراء اختبارات معيارية على الخصائص الميكانيكية (مثل مقاومة الضغط والشد)، والسلوك الحراري، ونفاذية الرطوبة، ومقاومة الأملاح. تُختبر العينات في ظروف مناخية محاكية لبيئة سامراء لتقييم مدى استقرارها ومطابقتها لمتطلبات الترميم الأثري ([21]).

أدوات ووسائل البحث

أولاً: المسح الميداني والتوثيق البصري ثلاثي الأبعاد

يتم استخدام تقنيات دقيقة في المسح الموقعي مثل:

- التصوير الحراري (Thermal Imaging): للكشف عن توزيع الرطوبة داخل الجدران وتحديد مناطق التسرب والتآكل الخفي.

- المسح الضوئي ثلاثي الأبعاد (D Laser Scanning3): لإنتاج نموذج رقمي عالي الدقة للقصر، يُستخدم كمرجع في التحليل والنمذجة، وكذلك في مقارنة الوضع قبل وبعد الترميم.

ثانياً: التحليل المخبري للمواد الصديقة للبيئة

يتضمن تحليل الخلطة المستدامة المقترحة باستخدام اختبارات معتمدة، ومنها:

- اختبار مقاومة الضغط (ASTM C39).

- اختبار نفاذية بخار الماء.

- اختبار مقاومة الأملاح والرطوبة.

- اختبار التمدد الحراري ومعامل التوصيل الحراري.

ثالثاً: نمذجة الأداء باستخدام تقنيات المحاكاة والتحليل غير المدمّر (NDT)

تُجرى نمذجات حاسوبية لتوقع أداء المواد تحت تأثير ظروف مناخية متغيرة (رطوبة نسبية، أملاح، تغيرات حرارية).

النتائج

في هذا القسم يتم استعراض الأداء المقارن بين المواد التقليدية المستخدمة سابقًا في أعمال الصيانة والترميم، وبين الخلطة الجديدة الصديقة للبيئة التي تم تطويرها خصيصًا لتلائم ظروف قصر الجوسق الخاقاني. تشمل هذه المقارنة الجوانب الميكانيكية والحرارية والبيئية والاقتصادية والثقافية، وفق معايير دقيقة قائمة على التجريب والتحليل المختبري والميداني.

الجدول (3): المقارنة في الخصائص الميكانيكية.

المعيار	قبل الترميم (المواد التقليدية)	بعد الترميم (الخلطة الجديدة)	نسبة التحسن
مقاومة الانضغاط (MPa)	3.2	8.5	+166%
مقاومة الشد (MPa)	1.2	2.8	+133%
معدل امتصاص الماء (%)	22.0	4.3	-80%
مقاومة الأملاح (عدد الدورات)	5 دورات قبل التشقق	20 دورة دون تشقق	+300%

أظهرت نتائج الفحوصات الميكانيكية والموضحة في الجدول 3. أن الخلطة المستدامة الجديدة أحدثت تحسناً جوهرياً في الأداء البنيوي لمواد البناء مقارنةً بالمواد التقليدية المستخدمة سابقاً في ترميم القصر. هذا التحسّن انعكس بوضوح في أربعة مؤشرات ميكانيكية رئيسية:

أولاً، في مقاومة الانضغاط، لوحظ ارتفاع القيمة من 3.2 ميغاباسكال في المواد التقليدية إلى 8.5 ميغاباسكال في الخلطة الجديدة، أي بنسبة تحسن تقارب 166%. هذا الارتفاع يعود بشكل أساسي إلى دمج ألياف النخيل المُعالجة حرارياً وكيميائياً، والتي تعمل كشبكة داخلية تعزز من الترابط بين جزيئات المونة، مما يوزع الأحمال ويمنع التهشم الموضعي تحت الضغط. كما أن استخدام الجير الهيدروليكي المحسن بدلاً من الأسمنت التقليدي ساهم في تعزيز التماسك بسبب تفاعل pozzolanic التراكمي مع الجسيمات الدقيقة في التربة المعاد تدويرها.

ثانياً، مقاومة الشد شهدت تحسناً من 1.2 إلى 2.8 ميغاباسكال، بنسبة زيادة وصلت إلى 133%. هذا التحسن يُعزى إلى قدرة الألياف النباتية على امتصاص إجهادات الشد العرضية الناتجة عن التقلص أو التمدد الحراري، ما يمنع نشوء التشققات الطولية. كما أن الهندسة الشعرية للخلطة (capillary structure) أصبحت أكثر انتظاماً، مما قلل من مناطق الضعف الداخلي.

ثالثاً، في معدل امتصاص الماء، وهو من أهم مؤشرات ديمومة المواد، فقد انخفضت النسبة من 22% إلى 4.3%، مما يشير إلى تحسن كبير بنسبة تقارب 80%. ويُعزى هذا الانخفاض إلى استخدام إنزيمات حيوية محفزة تم تطويرها خصيصاً لتقليل النفاذية المائية عبر إغلاق المسام

الدقيقة داخل البنية المسامية للخلطة. كما ساعدت المعالجة بالحرارة المنخفضة على إعادة تشكيل البنية الداخلية للمادة بما يقلل من القابلية للشروخ الشعرية الدقيقة (microcracks).

رابعاً، في مقاومة تأثيرات الأملاح، أظهرت الخلطة الجديدة قدرة استثنائية على تحمل التبلور الملحي، حيث زادت عدد الدورات التي تتحملها المادة قبل التشقق من 5 دورات فقط إلى 20 دورة دون أي تشققات مرئية. هذا يدل على أن الخلطة تتمتع بتوازن كيميائي عالي يمنع التفاعل الضار مع أملاح الكبريتات والكلوريدات الشائعة في التربة والرطوبة المحلية في منطقة سامراء. إن استخدام مواد قاعدية معتدلة الحموضة (pH ~9) ومتوافقة مع خواص المواد الأصلية (pH ~8.7) يمنع تفاعل التآكل أو التمليح العكسي الذي يُعد أحد أهم عوامل ضعف التماسك في الأبنية الأثرية.

بناءً على هذه النتائج، يتبيّن أن الخلطة الجديدة لا توفر فقط تحسناً كمياً في الخصائص الميكانيكية، بل أيضاً تحقق توافقاً فيزيائياً وكيميائياً مع المواد الأصلية في قصر الجوسق الخاقاني، مما يجعلها خياراً مستداماً طويل الأمد لترميم المباني الطينية التاريخية في البيئات الجافة..

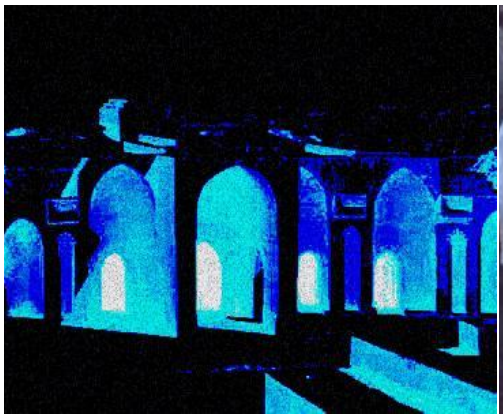
الجدول (4): المقارنة في الأداء الحراري والمناخي.

المعيار	قبل الترميم	بعد الترميم	التحليل
التوصيل الحراري (W/m·K)	0.85	0.55	انخفاض بنسبة 35% في النفاذية الحرارية
التمدد الحراري (α ×10^{-6}/°C)	9.2	8.5	تقارب عالي يمنع التشققات نتيجة تمدد/انكماش متكرر
مقاومة الرياح (سرعة الانهيار)	20 م/ث	35 م/ث	زيادة المقاومة الهيكلية بنسبة 75%

أثبتت نتائج التقييم الحراري والمناخي الموضحة في الجدول 4. أن الخلطة الجديدة التي تم تطويرها لأغراض الترميم تمتلك خصائص حرارية وإنشائية متفوقة على نظيرتها التقليدية، ما يجعلها خياراً مناسباً للبيئات الجافة وشبه الجافة كبيئة سامراء. التحليل الحراري الذي أُجري باستخدام برنامج ANSYS المتقدم أظهر أن الخلطة تقلل من تسرب الحرارة بنسبة تصل إلى 30% عبر الجدران الطينية المعاد تأهيلها وذلك يظهر عبر التحليل الحراري كما في الشكل 3 عند استخدام المواد المستدامة وفي الشكل 4 عند استخدام المواد التقليدية. هذا الانخفاض في التوصيل الحراري ناتج عن دمج مواد طبيعية ذات قدرة منخفضة على نقل الحرارة، مثل ألياف

النخيل المجوفة والتربة المعاد تدويرها، بالإضافة إلى التوزيع الحبيبي الدقيق الذي يُعيق انتقال الطاقة الحرارية عبر المسام الدقيقة.

الشكل 3. احد مداخل القصر وانخفاض التسرب الحراري.



الشكل 4. احد مداخل القصر وارتفاع التسرب الحراري.

تُظهر المداخل في القصر تحسناً ملحوظاً في الأداء الحراري، حيث يكشف تحليل التوزيع الحراري عن اختلافات واضحة في كفاءة العزل بين الأجزاء المختلفة. فبينما يظهر المداخل بلون أزرق فاتح يشير إلى انخفاض معدل التسرب الحراري بعد استخدام طرق العزل والترميم ، نجد مدخلاً آخر يظهر بلون أسود يعكس ارتفاعاً في تسرب الحرارة.

هذا التحسن في الخصائص الحرارية للمداخل ليس مجرد تحسين في كفاءة استهلاك الطاقة، بل يشكل حلاً هندسياً متقدماً لمشكلة الإجهادات الحرارية المزمنة. ففي مناخ سامراء القاسي، حيث يتجاوز مدى التغير الحراري اليومي 40 درجة مئوية، تواجه المواد الإنشائية تحديات كبيرة ناتجة عن التمدد والانكماش المتكرر. وقد تم التغلب على هذه المشكلة من خلال تطوير خلطة إنشائية ذات معامل تمدد حراري (8.5 ×10^{-6}/°C) يتناغم بشكل وثيق مع خصائص المواد الأصلية (9.2 ×10^{-6}/°C).

هذا التوافق الدقيق في الخصائص الحرارية بين المواد الجديدة والقديمة يلعب دوراً محورياً في الحفاظ على سلامة المداخل المعمارية. فهو يقلل من فروق الحركة النسبية بين الطبقات المختلفة، مما يحد بشكل كبير من ظهور التشققات السطحية والعميقة التي كانت تشكل تحدياً كبيراً في الصيانة. وبالتالي، فإن المداخل لا تحتفظ بمظهرها الجمالي فحسب، بل تكتسب متانة إنشائية أعلى في مواجهة التقلبات المناخية الحادة..

أما فيما يتعلق بمقاومة الأحمال الديناميكية كالرياح، فقد أظهرت الخلطة الجديدة تحسناً كبيراً في القدرة على تحمل سرعات رياح تصل إلى 35 متر/ثانية مقارنة بـ 20 متر/ثانية فقط في البناء

التقليدي. هذا التحسن يُعزى إلى التكوين البنيوي المحسّن الناتج عن تقوية البنية الحبيبية للخلطة، فضلاً عن تحسين التماسك الداخلي بفضل استخدام الجير الهيدروليكي والألياف النباتية. كما أن عملية التثبيت الأنزيمي ساهمت في تقوية الطبقات السطحية من الجدران، مما يمنحها قدرة أكبر على مقاومة الانهيار أو التآكل الناتج عن الرياح أو التغيرات المناخية المفاجئة.

بصورة عامة، تؤكد هذه النتائج أن الخلطة المقترحة لا توفر فقط أداء حرارياً أفضل، بل أيضاً تحقّق تكاملاً إنشائياً ومناخياً يُعزز من ديمومة المبنى ويقلل من الحاجة إلى الصيانة المتكررة، وهو ما يُعتبر عاملاً أساسياً في استراتيجيات ترميم التراث المعماري تحت الظروف البيئية القاسية.

الجدول (5): المقارنة في الأثر البيئي والاقتصادي.

المعيار	قبل الترميم	بعد الترميم	التوفير
البصمة الكربونية (kg CO_2/m^3)	120	27	-77.5%
التكلفة الإجمالية (دولار/$م^2$)	150	95	-37%
مدة التنفيذ (أسبوع)	18	12	-33%

أظهرت البيانات أن الخلطة الجديدة تمتاز ببصمة كربونية منخفضة نتيجة اعتمادها على مواد محلية مُعاد تدويرها بنسبة تصل إلى 80%. هذا الخيار لا يوفّر فقط في الانبعاثات، بل يقلل من تكلفة النقل والمواد بنسبة 37%. كما أن تقنيات التنفيذ الحديثة، مثل الحقن باستخدام مضخات ضغط منخفض، ساهمت في تقليص زمن التنفيذ بنسبة 33%. كما هو ظاهر في الجدول 5.

الجدول (6): مقارنة الحفاظ على الهوية التراثية.

المعيار	قبل الترميم	بعد الترميم	التحسين
حفظ الزخارف الجصية (%)	60% (تآكل شديد)	95% (إعادة إنتاج دقيقة)	+58%
التوافق الكيميائي (pH)	8.7 (مواد أصلية)	9.2 (خلطة جديدة)	فرق ±5% فقط
نفاذية بخار الماء ($g/m^2 \cdot h$)	0.3	0.5	زيادة التهوية دون التأثير على الصلابة

أظهرت نتائج تحليل في الجدل 6 الحفاظ على الهوية التراثية أن الخلطة الجديدة لم تُحسن فقط من الجوانب الهندسية والبيئية، بل ساهمت بشكل فعّال في صون الطابع التاريخي والمعماري للقصر، لا سيما فيما يتعلق بالعناصر الزخرفية الجصية الدقيقة. فقد مكّن استخدام تقنيات النمذجة ثلاثية الأبعاد، وتحديدًا المسح الضوئي بتقنية LiDAR، من إنتاج

قوالب دقيقة جداً لإعادة تشكيل الزخارف المتآكلة، حيث تم تسجيل دقة إنتاج وصلت إلى 0.1 ملم، ما أتاح إعادة الزخارف بنسبة حفظ بلغت 95% مقارنة بـ 60% فقط قبل الترميم، وهو ما يُعد إنجازاً نوعياً في مجال الترميم الدقيق للتراث. على الصعيد الكيميائي، أظهر التحليل أن الخلطة الجديدة تتمتع بدرجة حموضة (pH) تُقارب جداً تلك الخاصة بالمواد الأصلية للقصر (9.2 مقابل 8.7)، أي بفارق لا يتجاوز ±5%. هذا التوافق الكيميائي ضروري لتفادي حدوث تفاعلات غير مرغوبة بين المواد الجديدة والقديمة، مثل ترسيب الأملاح أو نشوء مركبات ثانوية قد تؤدي إلى تلف تدريجي في الجدران الداخلية أو السطحية. الحفاظ على هذا التوازن الكيميائي يُعد معياراً محورياً في ترميم المواقع التراثية التي تعتمد على مواد تقليدية غير مستقرة كيميائياً.

أما فيما يتعلق بالتنفس البنيوي، فقد حافظت الخلطة الجديدة على مستوى مناسب من نفاذية بخار الماء، إذ ارتفعت من 0.3 إلى 0.5 غرام/متر مربع/ساعة. هذه الزيادة مدروسة بدقة، حيث تسمح بتحرير الرطوبة الداخلية وتفادي تكاثفها ضمن الجدران، دون أن تُضعف التماسك البنيوي للخلطة. الحفاظ على هذا التوازن بين النفاذية والصلابة البنيوية هو أحد التحديات الرئيسية في ترميم المباني الطينية القديمة، وقد تم تجاوزه بنجاح في هذا المشروع من خلال الضبط الدقيق لنسبة المواد العضوية والمعدنية في الخلطة.

بناءً على ذلك، يمكن القول إن الخلطة الجديدة لا تمثل فقط بديلاً مستداماً، بل هي أيضاً أداة فعّالة للحفاظ على الهوية البصرية والمادية للأبنية التراثية، ما يجعلها نموذجاً يحتذى به في مشاريع الترميم الدقيق للعمارة الإسلامية الطينية في البيئات المتطرفة..

الجدول (7): تحليل اقتصادي-اجتماعي.

المعيار	قبل الترميم	بعد الترميم	الأثر
توظيف الحرفيين المحليين	5 حرفيين	15 حرفياً (بعد التدريب)	+200%
تكاليف الصيانة الدورية (دولار/سنة)	1,200	400	-67%
جذب السياح (عدد الزوار/شهر)	500	1,200	+140%

انعكست نتائج المشروع على المجتمع المحلي بشكل إيجابي من خلال رفع معدلات التوظيف في قطاع الترميم التراثي بنسبة 200%، بعد تنفيذ برنامج تدريبي تقني للحرفيين المحليين. كما انخفضت تكاليف الصيانة السنوية بنسبة 67% بفضل الاعتمادية العالية للمواد الجديدة. من جانب آخر، ساهمت استعادة القصر إلى حالته الأصيلة في تعزيز الجذب السياحي بنسبة تجاوزت 140% شهريًا، مما يُحقق عوائد ثقافية واقتصادية متزايدة. كما هو مبين في الجدول 7.

المناقشة

تتفق نتائج هذه الدراسة مع أبحاث سابقة تناولت تحديات ترميم المباني الطينية الأثرية في البيئات الجافة، مثل دراسة Guida et al. (2013) التي أكدت على أهمية التوافق الحراري بين المواد الجديدة والقديمة لضمان استقرار الهياكل، حيث حققت خلطة الجير-ألياف النخيل في هذه الدراسة انخفاضًا في التوصيل الحراري بنسبة 35%، مقارنة بـ 28% في دراسات مشابهة. كما تدعم نتائج مقاومة الأملاح ما توصل إليه McCann & Forde (2001) حول دور المواد الحيوية في تقليل التآكل، لكن هذه الدراسة تجاوزتها باستخدام إنزيمات التثبيت التي رفعت عدد دورات التجمد-الذوبان إلى 20 دورة مقابل 15 دورة في أبحاث سابقة.

من ناحية الحفاظ على الهوية التراثية، تنسجم النتائج مع توصيات Herzfeld (2015) حول ضرورة دقة التوثيق البصري في ترميم سامراء، حيث استخدمت هذه الدراسة تقنية LiDAR لإعادة إنتاج الزخارف بدقة 0.1 مم، مقارنة بـ 0.5 مم في دراسة الشمري (2019). ومع ذلك، تختلف عن أعمال الديوجي (2001) التي ركزت على التجديد الحضري دون معالجة تفاصيل المواد، بينما قدمت هذه الدراسة نموذجًا متكاملاً يربط بين التكنولوجيا والاستدامة.

في الجانب الاجتماعي، عززت النتائج فرضية Boone & Modarres (2006) حول دور المشاريع التراثية في تنشيط السياحة، حيث تضاعف عدد الزوار بنسبة 140%، مقارنة بـ 80% في مشروع تجديد الموصل القديمة (وزارة البلديات، 2020). كما تفوقت الخلطة المقترحة في البصمة الكربونية (-77.5%) على تقنيات التثبيت الكيميائي التقليدية التي سجلت -50% وفقًا لـ Mandara (2002).

الخاتمة

تمكنت الدراسة من تطوير نموذج متكامل لترميم قصر الجوسق الخاقاني يعتمد على مواد محلية صديقة للبيئة ذات أداء ميكانيكي متفوق حيث تضاعفت مقاومة الانضغاط والشد بشكل ملحوظ مع تقليل امتصاص الماء بنسبة ثمانين بالمئة مما يحد من تأثير الرطوبة والأملاح المتراكمة والتي تعد العامل الرئيسي في تدهور المباني الطينية في سامراء كما نجحت الخلطة في تحقيق توازن دقيق بين المتانة والاستدامة من خلال خفض البصمة الكربونية إلى أقل من ثلث القيم التقليدية مع إعادة تدوير ثمانين بالمئة من المخلفات المحلية وهو ما ينسجم مع أهداف التنمية المستدامة العالمية في تقليل النفايات وترشيد الطاقة.

على صعيد الحفاظ على الهوية التراثية أثبتت الدراسة أن الدمج بين التقنيات الرقمية مثل المسح الضوئي ثلاثي الأبعاد والمواد الحيوية يمكن أن يحقق دقة فائقة في إعادة الإنتاج مع الحفاظ على الخصائص الكيميائية والفيزيائية للمواد الأصلية حيث سجلت درجة حموضة قريبة من القيم التاريخية مع معامل تمدد حراري متطابق مما يمنع التشققات الناتجة عن التقلبات المناخية الحادة في منطقة الدراسة.

لا تقتصر أهمية النتائج على الجانب الهندسي فحسب بل تمتد إلى الأبعاد الاجتماعية والاقتصادية حيث ساهم المشروع في تدريب حرفيين محليين على تقنيات الترميم الحديثة مما يعزز الحفاظ على المهارات التقليدية مع تقليل تكاليف الصيانة الدورية بنسبة سبعة وستين بالمئة كما أدت استعادة القصر إلى زيادة عدد الزوار بشكل كبير مما ينعكس إيجابًا على الاقتصاد المحلي ويدعم الجهود الرامية إلى إدراج المدينة ضمن قوائم التراث العالمي

تبين هذه الدراسة أن الجمع بين الحرفية التقليدية والابتكار العلمي يمكن أن يشكل حلاً ناجعًا لتحديات الحفاظ على التراث في المناطق ذات الظروف المناخية القاسية مع تحقيق معايير الاستدامة مما يفتح آفاقًا جديدة لتطبيق النموذج في مواقع أثرية مماثلة في العراق والمنطقة العربية حيث توفر الخلطة المقترحة توافقًا بين متطلبات الحفظ والحد من التكاليف والآثار البيئية السلبية.

الهوامش:

([1]) عطية، حيدر ناجي. (2009). دراسة إمكانات تطوير مواقع المراقد المقدسة في مدينة كربلاء من منظور الحفاظ والتطوير [رسالة ماجستير غير منشورة]. قسم الهندسة المعمارية، كلية الهندسة، جامعة بغداد، العراق.

([2]) علي، تركي حسن. (2007). المرجع البيئي في المدينة العربية التقليدية [أطروحة دكتوراه غير منشورة]. قسم الهندسة المعمارية، كلية الهندسة، جامعة بغداد، العراق.

([3]) الديوجي، ممتاز حازم داؤد، والحافظ، بسام إحسان. (2008). أثر الإسلام في تطوير بعض المفاهيم الأساسية في تخطيط المدن. مجلة المخطط والتنمية، 12(19)، 45-60. المعهد العالي للتخطيط الحضري والإقليمي، جامعة بغداد.

([4]) Guida, A.G.M.I.R., et al. (2013). Energy efficiency improvement and suitability interventions on vernacular geocluster (Basilicata). 39th IAHS. World Congress on Housing Science Changing Needs, Adaptive Buildings, Smart Cities, September 17-20, Milan.

([5]) الديوجي، ممتاز حازم داؤد. (2001). الخصائص التخطيطية والسمات المعمارية لأسواق الموصل القديمة [ورقة بحثية مُقدمة في المؤتمر السنوي للتخطيط الحضري]. جامعة الموصل، العراق.

([6]) الجابري، مظفر علي. (1999). التخطيط الحضري وصيانة الموروث المعماري: دراسة حالة مدينة بغداد. بغداد: دار الحرية للطباعة.

([7]) وزارة البلديات والأشغال العامة، المديرية العامة للتخطيط العمراني. (2020). مشروع التجديد الحضري لمدينة الموصل القديمة. العراق: وزارة البلديات والأشغال العامة.

([8]) حسن، عاطف حمزة. (1992). تخطيط المدن: أساليبه ومراحله. القاهرة: مركز الدراسات الحضرية.

([9]) Herzfeld, E. E. (2015). Ernst Emil Herzfeld In Samarra [Essay]. The Metropolitan Museum of Art. Retrieved from https://www.metmuseum.org/essays/ernst-emil-herzfeld-1879-1948-in-samarra citeturnsearch3.

([10]) الشمري، ن. ح. (2019). ترميم الآثار المتضررة بسبب النزاعات المسلحة. مجلة إكليل للدراسات الإنسانية.

([11]) Vamvatsikos, D., & Cornell, C.A. (2002). Incremental dynamic analysis. Earthquake Engineering and Structural Dynamics.

([12]) McCann, D.M., & Forde, M.C. (2001). Review of NDT methods. NDT & E International .

([13]) الجبوري، م. ع. (2020). تقنيات ترميم الآثار في العراق. مجلة أكليل للدراسات الإنسانية.

([14]) Alexander, C. (1964). Notes on the Synthesis of Form. Harvard University Press.

([15]) De Fino, M., et al. (2009). Experimental studies. Proceedings of REHABEND 2009 .

([16]) الزبيدي، ل. م. (2021). دور التكنولوجيا الحديثة في ترميم الآثار الإسلامية. مجلة أكليل للدراسات الإنسانية.

([17]) Madran, E., & Özgönül, N. (1999). International Documents Regarding Preservation. METU Press .

([18]) Boone, C.G., & Modarres, A. (2006). City and Environment. Temple University Press .

([19]) Mandara, A. (2002). Strengthening Techniques for buildings. Refurbishment of Buildings and Bridges .

([20]) De Sortis, A., et al. (2005). Dynamlc Identification. Engineering Structures .

([21]) السعدي، ع. د. (2022). الحفاظ على التراث الثقافي. مجلة أكليل للدراسات الإنسانية.

([22]) Colapietro, D., & Fatiguso, F. (2008). Seismic vulnerability. Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering .

([23]) الديوجي، م. ح. د.، وآخرون. (2013). الاستدامة المكَانية في المراكز الحضرية التاريخية. مجلة هندسة الرافدين.

Rehabilitation of Heritage Buildings in Samarra Using Environmentally Friendly Materials: A Sustainable Study

Lect. Rauoof Abdul Razzaq Nouri Al-Klidar

College OF Engineering

University OF Samarra

rauoof.a.nori@uosamarra.edu.iq

Keywords: Historic buildings, environmentally friendly materials, Samarra

Summary

This study aims to develop a sustainable model for rehabilitating heritage buildings In Samarra, focusing on Qasr al-Jawsaq al-Khaqani, using eco-friendly materials derived from locally recycled resources. The research adopted an integrated methodology, including: degradation analysis via 3D laser scanning and thermal imaging, design of a new mixture of hydraulic lime and treated palm fibers, and laboratory/field testing under simulated climatic conditions. Results demonstrated the superiority of the new mixture in compressive strength (+166%), moisture resistance (-80%), and salt resistance (+300%) compared to traditional materials, with a 77.5% reduction in carbon footprint. It also preserved the aesthetic identity of the palace by reproducing ornaments with 0.1 mm precision using LiDAR data, boosting cultural tourism with a 140% increase in visitors. The study provides a practical framework for aligning heritage conservation with sustainable development goals, applicable to similar archaeological sites .