مجلة جامعة الملك سعود (السياحة والآثار)، مج (38)، ع (1)، ص ص 215-236، الرياض (2026م/ 1447هـ)

العلوم الحديثة وترميم المقتنيات الأثرية وصيانتها

أ.د. عبدالناصر بن عبدالرحمن الزهراني

أستاذ الترميم والصيانة - جامعة الملك سعود – كلية السياحة والآثار – قسم الآثار

د. تركي بن حمود الحويطي

أستاذ آثار قديمة المساعد– جامعة الملك سعود – كلية السياحة والآثار – قسم الآثار

ملخص البحث: تتعرض المقتنيات الأثرية لعوامل تلف متعددة، مما يستلزم عمليات ترميم وصيانة علمية تضمن الحفاظ عليه واستدامته. ويُعد ترميم الآثار علمًا متعدد التخصصات يعتمد على دمج مجالات مختلفة مثل الكيمياء والفيزياء والهندسة والجيولوجيا والبيولوجيا والميكروبيولوجيا والتقنية الحيوية والنانو تكنولوجي وغيرها. تساعد الكيمياء والفيزياء في فهم طبيعة المواد الأثرية وأسباب تلفها، ثم اختيار أساليب التوثيق والعلاج والتدعيم وفق المعايير الدولية. ويسهم علم الجيولوجيا في دراسة تركيب وتدهور المقتنيات الحجرية، بينما يلعب علم الهندسة دورًا مهمًا في صيانة المباني التاريخية. كما تساهم علوم الأحياء والميكروبيولوجيا في فهم تلف المقتنيات العضوية الناتج عن الكائنات الدقيقة وطرق معالجته. وتوفر تقنيات النانو والليزر حلولًا متقدمة في التنظيف والفحص والتحليل. وتضيف التقنية الحيوية والذكاء الاصطناعي أدوات حديثة تُسهِم في تطوير أساليب الترميم وتحسين كفاءتها. ويمثل هذا التكامل العلمي أحد أهم ركائز الحفاظ على المقتنيات الأثرية وصيانتها في العصر الحديث.

الكلمات المفتاحية: الآثار، العلوم، الترميم، الصيانة، الكيمياء، البيولوجي، النانو تكنولوجي.

Modern Sciences and the Conservation, Restoration, and Preservation of Archaeological Artifacts

Prof. Abdulnaser Abdulrahman Alzahrani

Professor - Department of Archaeology - College of Tourism and Archaeology - King Saud University

Dr. Turki Hamoud Alhwety

Assistant Professor - Department of Archaeology - College of Tourism and Archaeology - King Saud University

Abstract: *Archaeological artifacts are exposed to various deterioration factors, which necessitates scientific restoration and conservation processes to preserve them and ensure their sustainability. Restoration is an interdisciplinary field that integrates several sciences, including chemistry, physics, engineering, geology, biology, microbiology, biotechnology, nanotechnology, and others. Chemistry and physics help in understanding the nature of archaeological materials and the causes of their deterioration, enabling the selection of proper documentation, treatment, reinforcement, and preventive methods in accordance with international standards. Geology contributes to studying the composition and decay of stone artifacts, while engineering plays a major role in maintaining historic stone buildings. Biology and microbiology support the understanding and treatment of deterioration affecting organic materials caused by microorganisms. Nanotechnology and laser sciences offer advanced solutions for cleaning, examination, and analysis. Biotechnology and artificial intelligence also provide innovative tools that enhance restoration methods and improve their efficiency. This scientific integration forms a key foundation for the modern preservation and conservation of archaeological heritage.*.

Keywords: Archaeology, Sciences, Restoration, Conservation, Chemistry, Biology, Nanotechnology

مقدمة:

يمكن القول إن عصرنا هذا هو عصر تقنية المعلومات وثورتها، الأمر الذي يتطلب منّا أن نعي أنها ثورة تفرض علينا أن نعيد التفكير في منهجية تناولنا لدراسة علم الآثار بصفة عامه (ستيورات، 1435هـــ). وبمزيد من التخصيص ففي السنوات الأخيرة، تطورت عمليات ترميم وحفظ الآثار لتعتمد على أحدث العلوم الطبيعية، مما أحدث نقلة نوعية في هذا المجال للمحافظة على التراث الثقافي. لذا، يعتمد نجاح أي مشروع لترميم الآثار وحفظه على التعاون الوثيق والتفاعل بين مختلف التخصصات لتحقيق هذا الهدف، وهو ما يُعرف بالنظام متعدد التخصصات، والذي ورد ذكره في ميثاق البندقية (1964)[1] الذي نص على: "إن ثبت قصور التقنيات التقليدية، يمكن اِستخدام أي تقنية حديثة للتدعيم أو الإنشاء، شرط أن تكون كفاءة هذه التقنيات موضحة ببيانات علمية ومثبتة بالتجربة" (ميثاق البندقية، المادة العاشرة).

وعلى ذلك سواء تعلق الأمر بالجانب التقني أو بالنظريات والتفسيرات المتعلقة بعلوم الآثار وترميمها، فإن حضور العلوم المساعدة يكاد يكون حتميًا، سواء عبر المتخصصين الذين يطورون مهاراتهم المنهجية والتقنية في علم ما بما يتماشى وتخصصهم الأثري، أو باللجوء إلى علماء ومختصين في العلوم الأخرى من غير الأثريين (نعناعة، 2023: 239-256).

فعلى سبيل المثال تساهم علوم الكيمياء الفيزيائية في دراسة بنية الذرات والجزيئات والمركبات للمواد الأثرية، مما يؤدي إلى معرفة طاقات هذه الكيانات، التي بدورها تشكل الأساس العام لفهم كيفية حدوث التفاعلات الكيميائية وأسبابها، وما يترتب عليها من تلف للمقتنيات التراثية، ليس هذا فحسب، بل استخدام علوم الكيمياء في ترميم المقتنيات التراثية وصيانتها، ومن ناحية أخرى يكون التركيز على الكيمياء التحليلية في فهم ماهية المواد التراثية (Pollard et al, 2007: 31 -32).

ومنذ القرن الماضي اتجه علماء الآثار والترميم والصيانة إلى العلوم الحديثة لتساعدهم في تسهيل أعمالهم وتوفير جهودهم وأوقاتهم وأموالهم إلى العلوم الحديثة، مثل: الأشعة السينية والموجات الكهرومغناطيسية وغيرها من التقنيات، في محاولة للاستفادة العلمية والتطبيقية من هذه العلوم، وقد استخدم التصوير الجوي، والاستشعار عن بعد، والمسح الجيوفيزيائي وغيرها في إجراء التنقيبات الأثرية، فقد تمكن علماء الآثار من اكتشاف واستخراج المقتنيات الأثرية المدفونة في باطن الأرض بيسر وسلامة (الحوراني، 2022: 52-73). وكذلك كما هو معلوم فإن ارتباط البحث الأثري بالخرائط المختلفة وثيق جدًا، فهي مصدر جميع المعلومات حول البيئة

1ميثاق البندقية (1964) "الميثاق الدولي للحفاظ على المعالم والمواقع وترميمها"، الذي اعتمدته منظمة أيكوموس عام 1965م، في الاجتماع الدولي الثاني للمعماريين والتقنيين المختصين بالمعالم التاريخية في مدينة البندقية في إيطاليا، ويعدّ من أهم المواثيق الدولية، والمعتمد من معظم دول العالم.

وخصائص الموقع وما يحتاجه من تجهيزات في إطار عمل بعثات الحفائر، وعلى الخرائط الطبوغرافية[1] يتم توقيع وتسجيل كل ظاهرة أثرية صغيرة أو كبيرة، وفي الإطار نفسه يساهم علم الجغرافيا[2] في رصد المعامل الطبيعية والبشرية والموارد.

وزيادة على ذلك تقدم الجيولوجيا[3] مساعدة هائلة في إعادة رسم العناصر البيئية السائدة في الموقع خلال فترة ما من مناخ وتضاريس ومسطحات مائية وموارد وغطاء نباتي وحيواني، إضافة مساهمتها في عملية التأريخ.

ومن ناحية أخرى، في عمليات المسح فإن اللجوء لعلم البيولوجيا[4] والكيمياء[5] يعدّ خيارًا مثاليًا عبر التحليل البيولوجي والكيميائي لعينات التربة، فالاستيطان البشري وما يرافقه من أنشطة ينتج عنه تغير في الخصائص الكيميائية والبيولوجية للتربة.

وكذلك يساهم علم الانثروبولوجي[6] بكونه علم يهتم بالإنسان ومعارفه ومختلف جوانب نشاطه وسلوكه وتفاعلاته، فيما تشكل الهندسة[7] المعمارية جزء من البحث الأثري الميداني من خلال رسم المخططات في إطار عملية التسجيل والتوثيق أو خلال عملية الترميم والصيانة للمباني الأثرية (نعناعة، 2023: 243- 244).

وجدير بالذكر القول إن المواد الأثرية تنقسم من حيث طبيعتها وتركيبها إلى مواد ذات طبيعة وتركيب عضوي، أي مكون من مادة عضوية نباتية أو حيوانية، ومواد أخرى ذات طبيعة وتركيب غير عضوي، وبعضها يتركب من مادة صخرية أو فلزية، إضافة إلى ذلك المواد الأثرية المركبة التي تدخل في صناعتها مواد عضوية وأخرى غير عضوية (غنيم والزهراني، 2025م: 61).

1الخرائط الطبوغرافية، هي: خرائط تفصيلية تُظهر خصائص سطح الأرض ثلاثية الأبعاد (مثل: الجبال والوديان والسهول) على سطح ثنائي الأبعاد باستخدام خطوط الكنتور التي تربط نقاطًا متساوية الارتفاع، وتوضح أيضاً المعالم الطبيعية (مثل: الأنهار، الغابات) والبشرية (مثل: الطرق، المباني) للمنطقة، وتستخدم على نطاق واسع في علم الهندسة، والتخطيط.

2 علم دراسة الأرض، يركز على وصف وتحليل الأماكن، والظواهر الطبيعية (مثل: المناخ والتضاريس) والبشرية (مثل: السكان والثقافات)، والعلاقات المتبادلة بين الإنسان وبيئته، وتوزيعها على سطح الكوكب

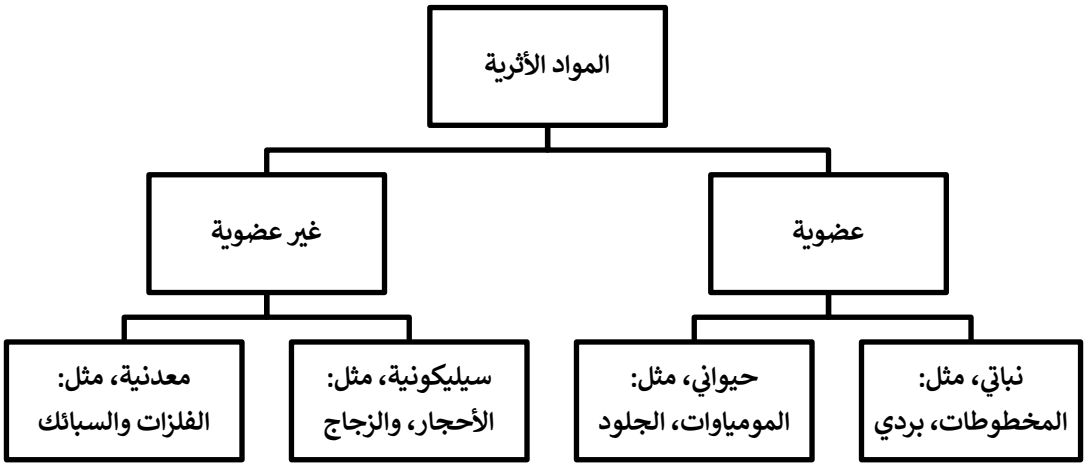
3 علم الجيولوجيا أو علم الأرض هو الدراسة العلمية الشاملة للأرض، بما فيهم تكوينها وموادها الصلبة (الصخور والمعادن) والعمليات التي شكلتها وتؤثر عليها عبر ملايين السنين (مثل: الزلازل والبراكين)، إضافة إلى تاريخ الحياة عليها والموارد الطبيعية.

4 علم البيولوجيا (علم الأحياء) هو الدراسة العلمية للحياة والكائنات الحية، ويشمل فهم تركيبها ووظائفها ونموها وتطورها وتوزيعها وتفاعلها مع بيئتها، وهو مجال واسع له فروع متعددة مثل: علم النبات والحيوان والوراثة وعلم البيئة، ويهدف إلى تفسير كل ما يتعلق بالأنظمة الحية من المستوى الجزيئي وصولًا إلى النظم البيئية.

5علم الكيمياء هو العلم الذي يدرس المادة وخصائصها، وتركيبها، وبنيتها، والتغيرات التي تطرأ عليها، والطاقة المصاحبة لهذه التغيرات، وتركز على الذرات والجزيئات وكيفية ارتباطها وتفاعلها، إنها تفسر كيف تتكون المواد وتتفاعل.

6 علم الأنثروبولوجيا (علم الإنسان)، هو الدراسة الشاملة والمقارنة للبشرية في الماضي والحاضر، مع التركيز على أصولنا التطورية، وتنوعنا البيولوجي، وثقافاتنا، ومجتمعاتنا، ولغاتنا، لفهم التجربة الإنسانية ككل، ويتفرع إلى فروع رئيسية، مثل: الأنثروبولوجيا الثقافية (الاجتماعية)، والبيولوجية (الفيزيائية)، واللغوية، وعلم الآثار.

7 الهندسة هي فن وعلم تطبيق المبادئ الرياضية والفيزيائية لتصميم وبناء وتحسين الهياكل والآلات والأنظمة والعمليات؛ لحل المشكلات وتلبية الاحتياجات البشرية، وتجمع بين المعرفة العلمية والابتكار، ومن فروعها الهندسة المدنية.



شكل رقم (1) يوضح تقسيم المواد الأثرية المصنوع منها الآثار حسب طبيعتها (الزهراني وغنيم، 2015: 4).

وعلى الرغم من كون ترميم وصيانة المقتنيات الأثرية عمل فني تطبيقي وارتباطه في بدايته بالفن، إلّا أنه عمل علمي ولا يمكن أن يتم دون دراية علمية بطبيعة المادة الأثرية، وطبيعة المواد المستخدمة في الترميم والصيانة، ويستعان في ذلك بكل العلوم المختلفة التي تساعد في فهم وإدراك تكوين المادة الأثرية، وطبيعة تكوين الوسط المحيط بها، وطبيعة المواد والتقنيات المستخدمة في الترميم والصيانة وآليات تطبيقها، ولهذا فإن المحافظة على الآثار يتطلب الاستعانة بعلوم أخرى أو بتخصصات أخرى كما ذكر مواد ميثاق البندقية (غنيم والزهراني، 2017: 9).

لذا يمكن إجمالًا ذكر أهمية العلوم في الترميم في بعض النقاط، التي من أهمها دراسة المواد الأثرية، حيث يساعد ذلك في فهم تركيبها لتحديد طرق التعامل معها، وكذلك تشخيص أسباب التلف (عوامل طبيعية، كيميائية، بيولوجية) وتأثيراتها على المقتنيات الأثرية، وعلى صعيد آخر تطوير مواد وتقنيات ترميم فاعلة وآمنة (مثل: المواد القابلة للاسترجاع)، وفي النهاية الحفظ الوقائي بتطبيق إجراءات حماية المادة الأثرية من التلف المستقبلي، وهو جزء أساس من الصيانة، وأيضًا المساهمة في عمليات تنقيب واكتشاف المواقع الأثرية، وسوف يتم تناولها خلال صفحات هذا البحث.

1. علوم الكيمياء

عرّف قاموس أكسفورد الصغير الكيمياء تعريفًا بسيطًا بأنها "علم العناصر وقوانين اتحادها وسلوكها" أو فرع من العلوم يتناول العناصر والمركبات التي تُكوّنها والتفاعلات التي تخضع لها، والتركيب الكيميائي وخصائص المادة". وبشكل أكثر تفصيلًا، يُعرّف في

قاموس أكسفورد الإنجليزي (1989) بأنه "فرع من العلوم الفيزيائية والبحث، يتناول المواد الأولية المتعددة، أو أشكال المادة، التي تتكون منها جميع الأجسام، والقوانين التي تُنظّم اتحاد هذه العناصر في تكوين الأجسام المركبة، والظواهر المختلفة التي تُصاحب تعرضها لظروف فيزيائية متنوعة" (قاموس أكسفورد، 1989).

مما لا شك فيه أن علم الكيمياء يساهم بدرجة كبيرة جدًا في علم ترميم وصيانة المقتنيات الأثرية، وتكون تلك المساهمة في جوانب متعددة، فهو من ناحية يساعد في فهم التركيب الكيميائي لتلك المقتنيات الأثرية، وهذا بلا شك يساعد من زاوية أخرى في فهم الخصائص الفيزيائية والكيميائية لطبيعة تلك المواد الأثرية. مما يساعد في بلورة استراتيجية التعامل الآمن مع القطع الأثرية حسب اختلاف تركيبيها الكيميائي بما يضمن سلامتها واستمراريتها، فالمواد الأثرية العضوية أكثر حساسية من المواد الأثرية غير العضوية (الزهراني وغنيم، 2015: ز- ك، 65؛ مياطه، 2022: 34-35).

ومن ناحية أخرى فإن علم الكيمياء يساهم في فهم عمليات التلف التي تتعرض لها المقتنيات الأثرية، والتي تعتمد في الأساس على التفاعلات الكيميائية التي تحدث بين كلٍ من مكونات المادة الأثرية، ومكونات البيئة المحيطة بها وما تحتويه من عناصر متلفة. ويلاحظ أن درجة التلف التي تحدث للمواد الأثرية تكون متفاوتة في الشدة طبقًا لنوع مادة الأثر، ولنوع وشدة عوامل التلف المختلفة (النجار، 2014: 9-32؛ غنيم، والزهراني، 2021 :6-25).

حيث يتأثر مستوى التدهور بنوع المادة الأثرية وخصائصها الكيميائية، مثل: التركيب الجزيئي والعنصري، والخصائص الفيزيائية، مثل: المسامية وتوزيع حجم المسام، إضافة إلى خصائص البيئية المحيطة بالمادة الأثرية، مثل: الظروف المناخية ونوعية الهواء، ويمكن القول إن التفاعل بين المادة الأثرية والظروف البيئة يحدد نوع ودرجة التلف والتدهور، وأيضًا فإن عوامل التلف البشرية سوف تساهم في درجة ونوع التلف والتحلل، وهذا ينطبق على كل المواد الأثرية، أضف إلى ذلك فإن غازات التلوث الجوي تسبب العديد من التفاعلات الضارة بالمادة الأثرية، مثل: تفاعلات الاكسدة، الاختزال، التميؤ، والتحلل، وجميع هذه التفاعلات تسبب التحلل البطيء للمواد الأثرية سواء العضوية وغير العضوية (الزهراني، 2025: 21-45)

وأيضا لا يخفي على أحد دور علم الكيمياء في التطبيقات العملية لترميم وصيانة المقتنيات الأثرية، حيث إن عملية التنظيف باستخدام (الماء – المذيبات العضوية الطيارة – الصوابين – الانزيمات ... وغيرها) للمقتنيات التراثية تعدّ تفاعل كيميائي يؤدي إلى التخلص من الاتساخات سواء في حالتها السائلة أو الصلبة، وهذه العلمية تتطلب الحذر الشديد والخبرة الكبيرة، ومعرفة من أين يبدأ ومتى تتوقف، وما هو الشكل النهائي الذي يجب أن تصل إليه القطع الأثرية. لذا تعدّ عملية تنظيف أسطح المواد الأثرية والتاريخية أحد إجراءات الصيانة الرئيسة التي تنفذ بمعرفة أخصائي الترميم والصيانة الأثري، ويوجد العديد من طرق التنظيف إلّا أن بعضها قد يؤثر

سلبًا على الخصائص البصرية والكيميائية والميكانيكية للمادة الأثرية، والبعض الآخر يمكن أن يكون غير صديق للبيئة. فمثلًا تعدّ المذيبات العضوية مود كيميائية عضوية في صورة سوائل تتميز بقدرتها على إذابة الكثير من المواد العضوية ومن بينها المواد الدهنية دون أن تتغير من صفاتها الكيميائية (صادق وآخرون، 2021: 207-227؛ الزهراني، 2025: 21-45)

ولا تقتصر مساهمة علم الكيمياء في التطبيقات العملية لترميم وصيانة المقتنيات الأثرية على التنظيف فقط، فهناك مساحات أخرى يساهم فيها منها التقوية المقتنيات الأثرية الضعيفة، باستخدام اللواصق والمقويات الكيميائية المختلفة، حيث تعرف اللواصق بأنها مركبات قادرة على ربط المواد ببعضها البعض، أما المقويات فهي عبارة عن راتنجات في محاليل سائلة، الهدف من استخدامها هو تقوية المادة الأثرية الضعيفة، والمقويات المستخدمة في مجال ترميم الآثار توجد في عدة صور متاحة، إما في صورة راتنجات نقية توجد في شكل بلورات صغيرة أو حبيبات تذاب في مذيب، كما أنها تكون في صورة مستحلب وهو عبارة عن معلق الراتنج أو المذيب في محلول مائي. حيث تستخدم العديد من مواد اللصق في ترميم الآثار، وذلك بغرض التقوية أو العزل وهذه المركبات الكيميائية توجد بأسماء تجارية مختلفة وأحيانا تباع بأسمائها الأصلية (الزهراني وغنيم، 2015: 163؛ النجار، 2014: 139؛ بلعيبود، 2023: 431-444؛ حفني، 2023: 914-941).

وأيضا فهناك نقطة أخرى مهمة يجب أخذها في الحسبان عن التعامل مع كيماويات ترميم المادة الأثرية، فإنه يجب التعامل معها على أنها مواد ممكن أن تسبب ضرر للقائمين بالعمل، لذلك يجب أخذ الحيطة والحذر، ويمكن أن يحدث هذا إما من خلال (الجهاز التنفسي عن طريق الاستنشاق – امتصاص الجلد – الابتلاع).

من بين هذه الطرق الثلاثة، والاستنشاق الذي هو الطريق الأكثر شيوعًا لدخول المواد الكيميائية إلى الجسم البشري وأيضًا يحدث الامتصاص من خلال الجلد عندما تتلامس المادة الكيميائية، التي يتم التعامل معها مع أجزاء الجسم غير المحمية، أما ابتلاع المواد الكيميائية فهو نادر الحدوث وإن حدث فيكون عن استهلاك المواد الغذائية داخل المختبرات أثناء العمل المرتبط بسوء النظافة (Chemical Safety Manual: 3; Abdou, 2014: 110-132).

أ. الكيمياء التحليلية

الكيمياء التحليلية هي ذلك الفرع من الكيمياء الذي يتناول التحديد النوعي أو الكمي لمكون واحد أو أكثر في مادة مجهولة (Pollard et al, 2007: 38- 39) وهناك ضرورة أخلاقية وعملية قوية لاستخراج أقصى قدر من المعلومات من بقايا المواد المكتشفة خلال البحث الأثري، لذا من الضرورة في هذا المجال تطبيق الكيمياء التحليلية، التي تُعرف الآن بالطرق الآلية للتحليل

الكيميائي للكشف عن العناصر غير العضوية وتحديد كميتها، ولكنها تشمل أيضًا مجموعة واسعة من طرق التحليل العضوي. وفي البداية تم استخدام الكيمياء التحليلية لتحديد مكونات القطع الأثرية، وذلك نابع هذا من فضولٍ لمعرفة مواد صنع هذه القطع الأثرية، ولكن سرعان ما طُرحت أسئلةٌ أكثر تعقيدًا، أبرزها ما يتعلق بالأصل والمنشأ لتلك المقتنيات، تم تطور الأمر لاستخدام تلك المعلومات في تأريخ القطع الأثرية وتحديد أصالتها، وأيضًا استخدام تلك المعلومات في ترميم وصيانة تلك المقتنيات الأثرية (Pollard et al, 2007: 5-6).

وأما فيما يتعلق بتقنيات التحليل المستخدمة في المواد الأثرية، فهي بلا شك متعددة وهي تزودنا بالمعلومات المتعلقة بالمواد الأثرية، حيث يمكن استخدام المعلومات المتعلقة بتركيب العناصر، والبنية الجزئية، والخواص الفيزيائية لوصف المادة التي صنعت منها القطعة الأثرية. وينبغي مراعاة شروط خاصة عند انتقاء تقنية تحليل مناسبة لدراسة القطع الأثرية، والهدف هنا هو تقليل نسبة الاضرار التي يمكن أن تصيب المقتنى الأثري موضع البحث، ولهذا يفضل اللجوء إلى تقنيات التحليل غير المتلفة، ولكن حينما يتعين استخدام تقنية متلفة فلابد من الحصول على جزء صغير جدًا من المادة التي تتألف منها القطعة الأثرية (ستيورات، 1435: 1).

وكما سبق ذكره تُعد الكيمياء عمومًا جوهر عملية الترميم، حيث إن الخطوة الأولى في الترميم هي حفظ القطعة الأثرية عن طريق منع أي تدهور إضافي، ويتطلب هذا فهمًا لتركيب المقتنى الأثري نفسه، وكذلك آليات تحللها، الأمر الذي يتطلب عادةً تحليلًا كيميائيًا وبنيويًا مجهريًا، وتحديد نواتج التآكل.

وفي سياق المتاحف، غالبًا ما تُفضّل التقنيات غير المدمرة (أو شبه غير المدمرة)، مثل: الأشعة السينية (XRD) (XRF) لتحليل المادة الأثرية غير العضوية، على الرغم من تزايد أهمية التحليل المجهري باستخدام مطياف الكتلة البلازما المقترنة بالحث بالليزر (LA-ICP-MS).

ويُستخدم الآن مطياف رامان، والأشعة تحت الحمراء (FTIR) للحصول على معلومات هيكلية وتحديد نواتج التآكل، وذلك لتكملة حيود الأشعة السينية، كما يتم استخدام التحليل الكروماتوجرافي[1] بأنواعه المختلفة، مثل: (GS-MASS) (HPLC) للتعرف على التركيب الكيميائي للمركبات العضوية الأثرية، وغيرها من الفحوص الأخرى (Pollard et al, 2007: 30; Hatherly, 2010: 189-187).

1 التحليل الكروماتوجرافي (أو الاستشراب)، هو تقنية فصل كيميائي، لفصل مكونات خليط معقد، تعتمد على توزيع هذه المكونات بين طورين: طور ثابت (صلب أو سائل) وطور متحرك (غاز أو سائل) يتدفق عبره؛ حيث تتحرك المكونات بسرعات مختلفة بناءً على تفاعلاتها مع الطورين، مما يسمح بفصلها وتحليلها كمياً ونوعياً.

2. علوم الفيزياء

علوم الفيزياء لها استخدامات متعددة في مجال علم الآثار، فهي من ناحية لها أدوار مهمة في عمليات التنقيب والحفائر في المواقع الأثرية بغرض اكتشاف المقتنيات الأثرية، والغرض الآخر وهو الفحوص والتصوير للمقتنيات الأثرية. وكلا من الغرضين يساهم بطريقة رئيسة في ترميم وصيانة المواد الأثرية، فمثلا استخدام التقنيات العلمية في المسوحات واكتشاف المقتنيات الأثرية بطرق علمية وآمنة، يساهم في حفظها بدون تلف أثناء الاكتشاف، مما يساهم في تبسيط ونجاح عمليات الإسعافات الأولية للمقتنيات الأثرية بعد الاكتشاف، وبالتالي فإن ذلك يساهم في المحافظة على المقتنيات الأثرية وتحقيق استدامتها. وعلى الناحية الأخرى فإن علوم الفيزياء وما توفره من تقنيات التصوير والفحوص للمقتنيات الأثرية يساعد في فهمها وتكوين صورة واضحة عنها، وما يترتب على ذلك من صنع خطة علاج وترميم مناسبة وأيضًا اختيار مواد حفظ مناسبة.

أ. علوم الفيزياء ودورها في التنقيب واكتشاف الآثار

تمثل علوم وتقنيات الفيزياء ركيزة علمية أساسية في استكشاف وفهم المواقع الاثرية حيث يتيح لعلماء الاثار من الكشف عما تحت سطح الأرض ورسم الخرائط للمعالم الاثرية المدفونة مثل: أساسات المباني والجدران دون الحاجة الى اجراء اعمال التنقيب المباشر والتي تكون مكلفة وملحقة للضرر بالموقع الاثري. وكما تسهم هذه العلوم في توصيف وتحديد امتداداته المكانية بالاعتماد على قياس التباينات الدقيقة في الخصائص الفيزيائية للتربة والرواسب والمواد الأثرية. حيث تساعد في الحصول على نتائج مُرضية وتوجيه جهود البحث والتنقيب في الإطار العلمي الصحيح. ويعد المسح الاثري الخطوة الأولى في أعمال التنقيب الأثري، الذي يهدف جمع البيانات وتوثيقها وتحليلها لفهم الثقافات والحضارات السابقة.

وهناك أنواع مختلفة من المسوحات الأثرية، منها الجوية، والسطحية، والجيوفيزيائية، والجيومرفولوجية[1]، والبحرية، والطبقية الجيولوجية. في الواقع، أصبح من الضروري إجراء مسح أثري شامل قبل التنقيب في أي موقع أثري، حيث يتم استخدام تقنيات حديثة لتحديد المواقع الأثرية وتوثيقها والحفاظ عليها، من خلال المراقبة بتقنية التعرف على الصور، مما يُسهم في ردع التخريب والسرقة، والتنبؤ بالتغيرات المناخية التي تسبب تأثيرًا ضارًا على المواقع الأثرية، ويمكن تصنيف المسوحات إلى ثلاثة أنواع رئيسة، وهي:

1 الجيومرفولوجية (Geomorphology) هو علم دراسة أشكال سطح الأرض وتطورها، يبحث في أصل وتكوين وتغير الملامح التضاريسية، مثل: الجبال والوديان والسهول، بفهم العمليات الطبيعية، مثل: التجوية، التعرية، والترسيب التي تشكلها، ويعتمد على الملاحظات الميدانية والنماذج الرقمية لفهم تاريخ هذه التضاريس والتنبؤ بتغيراتها المستقبلية.

- الشاملة: وهي الأكثر شمولاً، ولكنها الأكثر استهلاكاً للوقت والتكلفة، لتحديد وتوثيق جميع المواقع الأثرية ضمن منطقة محددة باستخدام أساليب الكشف العلمية.
- الانتقائية: وهي أقل تكلفة واستهلاكاً للوقت مقارنةً بالنهج الشامل، الذي يستهدف مواقع محددة بناءً على أهداف البحث أو الأدلة الموجودة.
- الإنقاذ: تُجرى في المناطق المقررة لمشاريع تطوير كبرى، مثل: بناء السدود أو شق الطرق، لإنقاذ أي بقايا أو مواقع أثرية قد تتعرض للتخريب أو التدمير نتيجةً للمشروع، مع تسجيل جميع الاكتشافات بدقة لتوجيه جهود التنقيب أو الحفظ المستقبلية (Elhosary, 2024: 26-44).

والاستشعار عن بعد هو مجموعة من العلميات التي تسمح بالحصول على معلومات كمية عن جسم ما على سطح الأرض من خلال الموجات الكهرومغناطيسية المنعكسة أو المنبعثة من الأجسام الأرضية من دون الاتصال الفيزيائي المباشر. حيث يمكن بهذه الطريقة أخذ الصور من الجو أو الفضاء وتحديد مواقع الآثار على اختلاف أنواعها ومعرفة ماهيتها. ومن التقنيات الأخرى المستخدمة أيضًا هي تقنية نظام المعلومات الجغرافية (Geographic Information System)، التي يشار إليها بالمختصر (GIS) وهذه التقنية يتم من خلالها إيجاد طريقة لتنظيم البيانات في الخرائط على شكل طبقات، وبذلك تجمع كل الصفات المختلفة للمواقع، التي تم مسحها مع بعضها البعض في شكل صورة أو خريطة واحدة، كما يتيح هذا النظام اكشاف باطن الأرض بعمق 200 م تقريبًا والكشف عما يحتويه من آثار متنوعة، كما يمكن استخدام تقنيات علم الجيوفيزياء في دراسة الخواص الفيزيائية للأرض قبل الحفائر (العزواي، 2013: 111-115؛ بتة، 2017: 23-33).

ب. علوم الفيزياء ودورها في ترميم وصيانة الآثار

تستخدم الآن أشعة الليزر وتطبيقاتها على مدى تسعة عقود لتخدم الآثار، وذلك في عدد من المعامل الأوربية في اليونان وإيطاليا وفرنسا وإنجلترا، واستخدم في عام 1972 في مجال ترميم الآثار في ترميم بعض التماثيل. والآن في مجالات متعددة ومتنوعة منها فحص وتسجيل الآثار، فهناك تصوير القطع المجسمة ثلاثية الأبعاد كطريقة واقعية لتسجيل القطع مختلفة الأبعاد، وباستخدام ما يسمى الهولوجرام[1] Hologram يمكن تسجيل قطعة أثرية أو مبني أثري بقياسات دقيقة، وصور دقيقة للغاية، وفي بعض الحالات نقل للألوان بصورة دقيقة أيضًا، ورصد ميول الأعمدة بالمعابد، ومن خلاله يتم التحميل الطيفي لعناصر المواد الأثرية، كما يتم من خلاله

1 الهولوجرام (Hologram) هو صورة ثلاثية الأبعاد (طول وعرض وارتفاع) لجسم ما، تظهر وكأنها تطفو في الفضاء الحقيقي، وتُنشأ باستخدام تقنيات بصرية متقدمة، خاصة أشعة الليزر، لتسجيل وتوليد هذا الوهم البصري، الذي يمكن رؤيته من جميع الزوايا دون الحاجة لنظارات خاصة، مثلما يحدث في أفلام الخيال العلمي.

رفع بصمة الآثار المعارة لبلد آخر وكشف أي تلاعب أو تزوير في الآثار. وحديثا يتم استخدام Infra- red radiography (IRR) الأشعة فوق الحمراء كتقنية غير متلفة للمواد الأثرية فباستخدام الكاميرات الرقمية الحساسة للأشعة فوق الحمراء نحصل على صور ذات طول موجي يتراوح بين 800 نانوميتر إلى 2000 نانوميتر وتأتي أفضل النتائج مع الصبغات المعتمة والمنفذة للأشعة فوق الحمراء، مثل: أبيض الرصاص وكبريتات الكالسيوم، حيث تمتص الأشعة فتظهر النتيجة مناطق سوداء تشير إلى الضوء الممتص ومناطق بيضاء للضوء المنعكس.

وتستخدم تلك الأشعة على نطاق واسع في فحص أنواع الصبغات، وكذلك الحوامل بأنواعها المختلفة من خشب وقماش ورسوم الكهوف والورنيشات والمواد الرابطة المختلفة. ويعيب هذه الطريقة الوقت الطويل لتركيب الصور باستخدام البرامج المختلفة، كذلك ضرورة قرب الكاميرات من العمل الفني المراد فحصه، ويتم ذلك عن طريق استخدام السقالات لعمل الفحص من داخل الموقع، أو وضع الكاميرات مثبتة على طائرات؛ مما ينتج عنه تشوهات هندسية الأبعاد وفي الإضاءة وكذلك في تحقيق إضاءة موحدة مما يُصعب الاعتماد على هذه الطريقة. واستعيض عن ذلك باستخدام تقنيات الليزر على نطاق واسع الآن في فحص المواد التاريخية والأثرية (أبو كرورة، 2018: 56-66).

كما يتم استخدم تقنيات الليزر في التنظيف للأسطح الأثرية، مثل: الزجاج والحجر والمعادن والمواد الملونة والمواد العضوية، والتي تتطلب البدائل المختلفة لأنواع الليزر وقياساته من حيث الطول الموجي. والتنظيف بالليزر دقيق وانتقائي وبالتالي يتم الحفاظ على الأثر بسهوله ويتم إزالة المواد العضوية والمواد غير العضوية وتتحول من الحالة الصلبة إلى الحالة الغازية أو إلى بخار نتيجة لامتصاص نبضات شعاع الليزر التي ترفع من درجة حرارة المادة من خلال ضوء الليزر. كما يستخدم الليزر في فحص المواد الأثرية ذات التركيب البلوري (حسين، 2012: 2005- 2023). كما كانت محاولات ناجحة لاستخدام الليزر في التخلص من البقع الفطرية من المواد العضوية الأثرية، مثل: المخطوطات الورقية (درويش واخرون، 2013: 47- 61).

3. علم الذكاء الاصطناعي

يستخدم الذكاء الصناعي وبرامج الحاسوب المختلفة، مثل: الفوتوشوب وغيره في عمليات التوثيق الأثري للمقتنيات الأثرية، حيث تعدّ عملية التوثيق من أهم الوسائل التي تعمل على حفظ وحماية واستدامة المواد الأثرية من خلال جمع البيانات والمعلومات التاريخية والأثرية، وبالتالي تكون أولى مراحل علاج وترميم المادة الأثرية؛ من خلال تسجيل كافة المعلومات المرتبطة بالآثار من القيمة التاريخية والفنية وأبعاده وزخارفه ومظاهر التلف المحيطة به والترميمات السابقة، التي أجريت عليه، وبذلك تكون عملية الترميم مبنية على دارسة وفهم شامل لحالة المادة الأثرية لأعداد الخطة المثلى للتعامل مع حالة القطع الأثرية دون الإضرار بقيمتها الأثرية والتاريخية.

على صعيد التطور التكنولوجي الحديث وبروز البرامج الجرافيكية في مجال التوثيق الأثري، أثبتت تلك البرامج دورها الفاعل في توثيق مواد الآثار (ونس، 2024: 546-569).

وتم استخدام الواقع الافتراضي لإنشاء نسخ رقمية دقيقة للمواقع الأثرية والتحف وحتى مدن بأكملها، وقد نجح الذكاء الاصطناعي من خلال إعادة إنشاء بعض المواد الأثرية التي لم يبق منها سوى بعض البقايا والأطلال إلى إعادتهم للوجود مرة أخرى من خلال تصور واقعي لها بإدخال بعض البيانات والمعلومات عنها.

وقد اختيرت من عجائب الدنيا السبع بعض الآثار الموجودة بفضل الذكاء الاصطناعي وليس لها وجود فعلي كأثر قائم مثل "تمثال روديسي – حدائق بابل المعلقة – ضريح موسلوي – منارة الإسكندرية – تمثال زيوس". كما تشهد أيضًا استخدام الروبوتات المتطورة بشكل متزايد في وصول المناطق الخطيرة لمراقبة البقايا الأثرية المعرضة لخطر التدمير أو النهب، وقد تكون هذه الروبوتات قادرة على إرسال صور وتنفيذ إجراءات حفظ بسيطة (إبراهيم، 2024: 361-375).

وتستخدم برامج الذكاء الاصطناعي المدربة في التعرف والتنبؤ بمكان وجود المواقع الأثرية، وأنواع الآثار الموجودة بها، وذلك من خلال معالجة كميات كبيرة من البيانات بسرعة واكتشاف أنماط قد تكون صعبة للبشر تحديدها ورؤيتها. ولهذا يصبح الذكاء الاصطناعي مفيدًا بشكل خاص في تحميل الصور الجوية والاستشعار عن بعد لتحديد العناصر المميزة والتلميحات الضرورية؛ لتحديد المواقع الأثرية المحتملة، خاصة في المناطق التي يصعب الوصول إليها أو المناطق التي تشهد نزاعات.

كما يمكن للذكاء الاصطناعي تحميل البيانات التاريخية والجغرافية لتوفير تقديرات دقيقة لمواقع تحت الماء أو غير المرئية. وقد أشار المرجع نفسه إلى أنه لا يمكن أن يكون استخدام الذكاء الاصطناعي بديلًا عن العلماء في مجال علوم الآثار، حيث إن الدور الذي يقوم به الذكاء الاصطناعي هو تعزيز قدرات علماء الآثار وليس استبدالهم، حيث تعمل تكنولوجيا الذكاء الاصطناعي كأداة مساعدة قوية للعلماء، ولكنها لا تستطيع بأي حال من الأحوال استبدال المعرفة والخبرة والرؤية البشرية التي يقدمها العلماء (Elhosary, 2024: 26-44).

وقد أشارت بعض الادبيات إلى أنه إضافة إلى ما سبق ذكره فإنه يمكن للذكاء الاصطناعي المساعدة في حماية المواقع الأثرية، من خلال توقع تأثير التغيرات البيئية، واتخاذ تدابير وقائية تساعد في حمايته مما يعزز إدارة وحفظ التراث الثقافي، حيث تمكن هذه الأدوات الخبراء والمديرين والمستخدمين من تطبيق تدابير وقائية مُدروسة، وتكييف استراتيجياتهم لكل سيناريو لمظاهر التلف المختلفة وإجراء عمليات الترميم الصحيحة والمناسبة؛ أي بعبارة أخرى يُعزز الفهم المُعمّق لتطبيقات التعلم العميق في حفظ التراث الثقافي، مما يُعزز

تطوير استراتيجيات تشخيصية قائمة على البيانات وقابلة للتطوير تُكمل ممارسات الحفظ التقليدي. وأيضا يمكن لخوارزميات الذكاء الصناعي التنبؤ بنتائج الحفظ الحالية واقتراح تقنيات ترميم بناء على مواقف مماثلة. ويمكن للأنظمة الآلية تحليل القطع الأثرية بسرعة وكفاءة أكبر من الخبراء، مما يُقلل من التكاليف. كما تُوفر توثيقًا دقيقًا للحالة الراهنة للقطع الأثرية، ويرصد التغيرات المستمرة بمرور الوقت، وهو أمر ضروري لفهم كيفية تأثير الظروف المناخية المتغيرة على القطع الأثرية (Casillo et al, 2025: 224-241).

وأيضًا عودًا إلى الحديث إلى عمليات التوثيق الحديثة، التي تعدّ أحد أوجه الترميم والصيانة والحفظ للمقتنيات الأثرية في المخازن والمتاحف، يمكن توظيف أحد مواقع الذكاء الاصطناعي بتسجيل كافة المعلومات الخاصة بالقطع المتحفية المخزنة بشكل سمعي، حيث تدون بيانات التحف الأثرية المخزنة من خلال الاسم، والنوع، ورقم القطعة، وكودها، ومكان التخزين، والرفوف أو الأدراج، وموقع الاكتشاف، ومظاهر التلف، وعمليات الترميم التي مرت بها، وتاريخ الاكتشاف والحفظ، وقياسات القطعة من الطول والعرض والسمك ثم حفظها في code QR[1] بالمخزن المتحفي مما يسهل على أمناء المستودعات الحصول على جميع البيانات المتعلقة بالتحف الأثرية من خلال مسح code QR بواسطة الهواتف المحمولة أو جهاز iPad (ونس، 2024: 546-569). أشارت بعض الدراسات إلى أن استخدام الرقمنة ستُحدث تغييراً جذرياً في عملية ترميم مواقع التراث العالمي المهمة، من خلال أتمتة مهام الترميم البسيطة والتنبؤ بالإجراءات والتحليلات والنصائح، حيث تزيد عمليات الترميم القائمة على الذكاء الاصطناعي من احتمالات اعتماد أساليب أسرع وأقل تكلفة لإعادة تأهيل المباني والهياكل الأثرية في الموقع (Goussous, 2020: 1350-1358).

4. علم البيولوجي والميكروبيولوجي

يعدّ هذا العلم من العلوم المهمة جدًا في دراسة صيانة المواد الأثرية، سواء العضوية أو غير العضوية على حدٍّ سواء، حيث يعدّ التلف الحيوي واحدًا من أهم عوامل التلف المؤثرة على التراث الثقافي، ومشكلة كبيرة دائما ما تواجه المرممين حول العالم، وتختلف مظاهر التلف الحيوي للمواد الأثرية غير العضوية بصفة عامة، والأحجار الجيرية في المنشآت الأثرية، والتماثيل الحجرية باختلاف الكائن الحي الدقيق الذي ينمو على السطح الأثري. حيث يختلف تأثير الكائنات الحية الدقيقة على الأحجار الجيرية والمباني الأثرية من كائن حي دقيق إلى آخر، فالبكتيريا على سبيل المثال يكون تأثيرها على الآثار كيميائيًا بينما تؤثر الفطريات على المواد الأثرية فيزيائيًا وكيميائيًا وجماليًا، وتكمن مظاهر التلف الحيوي غير المباشرة أيضًا في قدرتها على التسريع من عمليات التلف الأخرى والتسريع من عملها مما ينتج عنه

1 رمز الاستجابة السريعة (QR Code)، هو نوع من الباركود ثنائي الأبعاد (مربعات سوداء وبيضاء) يُخزن معلومات أكثر بكثير من الباركود التقليدي، ويمكن مسحه ضوئيًا بسرعة بواسطة كاميرات الهواتف الذكية لقراءة البيانات، مثل: روابط المواقع، ومعلومات الاتصال وغيرها.

تدمير للتركيب الفيزيائي Physical Structure والتكوين المعدني Mineral Composition والتحلل الكيميائي Chemical Decomposition للأحجار الجيرية الأثرية (موسى واخرون، 2023: 387- 410).

ويشير مصطلح التدهور البيولوجي بصفة عامة إلى أي تغيرات غير مرغوب فيها في خصائص مادة ما، ناتجة عن الأنشطة الحيوية للكائنات الحية، والتدهور البيولوجي هو مصطلح شائع الاستخدام في هذه السياقات، وإن كان استخدامه الأنسب في سياق تحلل المواد العضوية بفعل أنشطة التحلل الناتجة من التلف الميكروبي. وعلى الرغم من أن أنواعًا مختلفة من الكائنات الحية قد تشارك في السياقات المذكورة أعلاه، بما في ذلك النباتات والحيوانات والحشرات، إلّا أن أنشطة الكائنات الدقيقة هي الأكثر أهمية وخطورة نظرًا لقدرتها المباشرة وغير المباشرة على تغيير الركيزة بشكل لا رجعة فيه من خلال آليات فيزيائية وكيميائية. وغالبًا ما يتراوح تأثير الفطريات المتلف بين تغير اللون والبقع والتلوث الحيوي، وصولًا إلى تدمير مكونات المباني والتحف التاريخية والأعمال الفنية.

وبما أن المواد العضوية (النباتية والحيوانية) والمواد السيليكونية أو الصخرية والمواد الفلزية مكونات أساسية للهياكل التي صنعها الإنسان في البيئة العمرانية والتراث الثقافي بشكل عام، فإن التأثيرات التحويلية للفطريات كبيرة وواضحة، مع إمكانية التسبب في تدهور وتدمير المباني والتحف التاريخية والأعمال الفنية، إذا توافرت الظروف المناسبة لتكاثرها. يمكن أن تكون هذه الآثار غير قابلة للإصلاح، ومكلفة للسيطرة عليها أو علاجها، وتؤدي إلى فقدان دائم للتراث الثقافي، مما يؤثر على معرفة تاريخ وتطور المجتمعات البشرية في جميع أنحاء العالم (Gadd et al., 2024: 1-62).

ويمكن القول إن أساليب تعامل المرممين مع التلف الحيوي تنوعت على مدار السنوات بدءًا من محاولة العلاج إلى التفكير في الصيانة الوقائية للأثر خوفًا من إصابتها بالتلف الحيوي، وبدأت هذه المحاولات من استخدام الطرق التقليدية في التنظيف، والسيطرة على الظروف البيئية المحيطة وجعلها غير ملائمة للنمو الميكروبي، كما انتهج البعض مبدأ استخدام المبيدات الكيميائية. وخلال العقد السابق توجهت الأنظار عالميًا إلى استخدام المعالجة الحيوية باستخدام الكائنات الحية الدقيقة التي تهاجم بعضها البعض، ومن ثم من الممكن استخدام مضاداتها الحيوية أو إنزيماتها أو الكائن الحي ذاته، وهي تعدّ من الطرق الحديثة والآمنة التي انتشر استخدامها عالميًا (موسى واخرون، 2023: 387- 410).

كما استخدم بعض الباحثين الزيوت العطرية في مكافحة التلف البيولوجي المتمثل في التلف الحشري، كأحد الوسائل الحديثة والآمنه في الاستخدام على كل من الأثر والقائم بالترميم، وهناك أساليب أخرى، مثل: استخدام أشعة جاما وغيرها من الطرق والأساليب الحديثة والآمنة في الاستخدام (El shafeay and Ahmed, 2022: 139).

5. علم النانو تكنولوجي

تُشير البادئة "نانو" إلى بادئة يونانية تعني "قزم" أو شيء صغير جدًا، وتُمثل جزءًا من ألف مليون من المتر، ويجب هنا التمييز بين علم النانو، وتكنولوجيا النانو، فيمكن القول إن علم النانو هو: دراسة البُنى والجزيئات على مقاييس النانومتر التي تتراوح بين 1 – 100 نانومتر، ولكن تُسمى التقنية التي يتم استخدامها في التطبيقات العملية، مثل: الأجهزة وما إلى ذلك تكنولوجيا النانو. للمقارنة، أن سمك شعرة الإنسان الواحدة يبلغ 60,000 نانومتر، وأن نصف قطر الحلزون المزدوج للحمض النووي (DNA) يبلغ نانومترًا واحدً. وأول من قدّم لهذا العلم هو الفيزيائي الأمريكي والحائز على جائزة نوبل، ريتشارد فاينمان، مفهوم تقنية النانو عام 1959، وخلال الاجتماع السنوي للجمعية الفيزيائية الأمريكية. وبعد خمسة عشر عامًا، كان العالم الياباني نوريو تانيغوتشي أول من استخدم وعرّف مصطلح "تكنولوجيا النانو" عام 1974 على النحو التالي: "تتكون تكنولوجيا النانو بشكل أساس من معالجة فصل المواد ودمجها وتشويهها بواسطة ذرة واحدة أو جزيء واحد" (Bayda et al., 2020: 1-15).

في العقود القليلة الماضية، حظيت المواد النانوية باهتمام خاص في مجال التراث الثقافي نظرًا لخصائصها الفريدة. على سبيل المثال، استُخدمت جسيمات أكسيد المعادن النانوية في العقد الماضي، لحماية أسطح المباني التاريخية من التغيرات اللونية الناتجة عن الهجوم الفطري، وطرد الأتربة. وقد ثبتت إمكانية استخدام هذه الجسيمات النانوية في حفظ وترميم التراث الثقافي بشكل عام لتعزيز المواد المتحللة، وللتنظيف الذاتي، وتحسين سطح المادة، أو كمبيد حيوي للحدّ من التدهور البيولوجي. فعلى سبيل المثال، في حالة القطع الأثرية الخشبية، نُشرت العديد من الدراسات التي تُقيّم أداء جسيمات النانو من الفضة والنحاس وأكسيد الزنك وثاني أكسيد التيتانيوم، حيث أظهرت الاختبارات أن هذه الجسيمات النانوية، عملت على تُحسّن كبير في مقاومة المقتنيات الخشبية الأثرية، وتوفر لها حماية من التدهور والتحلل من تأثير الأشعة فوق البنفسجية، وأيضًا مقاومة عالية ضد النمل الأبيض والعفن والفطريات. وفي دراسة أخرى، استُخدمت جسيمات أكسيد المغنيسيوم النانوية بنجاح لإزالة حموضة الورق، مما يضمن منع تدهورها (حبيب الله، واخرون، 2023: 239- 249؛ فهيم، 2022: 789-814).

كما استخدمت تكنولوجيا النانو في ترميم وصيانة المنسوجات التاريخية، فقد قدمت إحدى الدراسات طريقة مبتكرة باستخدام مستخلص نبات الماهوجني المضاف إلى بوليمرات نانوية من الكيتوزان الطبيعي والجيلاتين، وذلك لتحضير مركب الكيتوزان/ مستخلص نبات الماهوجني، ومركب الجيلاتين النانوي / مستخلص نبات الماهوجني، وقد تم تقييم قدرتها على حماية المنسوجات التاريخية من التلف البيولوجي، والتي أدت إلى نتائج باهرة في مقاومة التلف الفطري، الذي يصيب المنسوجات التاريخية (Ahmed et al., 2022: 1-12).

6. علم التكنولوجيا الحيوية

يمكن القول ببساطة إن الإنزيمات تعدّ محفزات بيولوجية (وتعرف أيضًا بالمحفزات الحيوية)، حيث إنها تقوم بدور العامل الحافز في التفاعلات الكيميائية، ولكن لا يحدث لها تغير في تركيبها الكيميائي، وأيضًا لا تؤثر في طبيعة نواتج التفاعل نفسه، بمعنى آخر أنها تقوم بتسريع التفاعلات الكيميائية فقط، ومن ناحية أخرى فإن الإنزيمات هي جزيئات بروتينية موجودة طبيعيًا في الأنسجة الحية، وتتكون البروتينات من أحماض أمينية، ويوضح الشكل التالي بنيتها الاساسية. وعلى مدار أكثر من 25 عامًا، استخدمت الإنزيمات في مجال الترميم والصيانة للتراث الثقافي والمقتنيات التراثية بشكل عام، وقد نوقشت خصائصها وتطبيقاتها في العديد من المقالات والكتب والأدبيات العلمية ذات الصلة، وأثبتت فعاليتها كأداة قيمة لأخصائي الترميم والصيانة.

وقد أصبحت الإنزيمات التي تحلل لاصق النشا والبروتين المستخدم سابقًا في عمليات الترميم، مقبولة على نطاق واسع كأحد أكثر الآليات فائدة لأخصائي الترميم والصيانة؛ وذلك لإزالة المواد اللاصقة من المنسوجات وغيرها من المقتنيات التراثية. كما تعمل الإنزيمات على إزالة التراكمات السميكة من البقع والاتساخات التي تتطلب وقت تنظيف كبير، أو تحتاج لمحاولات متكررة في محاليل الغسيل التقليدية، أو التي لا يمكن إزالتها بأساليب التنظيف التقليدية الأخرى، فهنا يكون استخدام التكنولوجيا الحيوية هو الخيار الأنسب الفاعل والآمن على حدٍّ سواء (Ahmed and Kolisis, 2011: 169- 179; Ahmed et al., 2010: 1-17).

وتنوعت طرق استخدام وتطبيق الأنزيمات، فبعض منها يتم إذابتها في محلول موازن مكون من خليط من الماء ومركبات أخرى، حيث يتم تطبيقها موضعيًا أو في المعالجات الشاملة، وأيضًا قد استخدمت الأنزيمات مصاحبة لكمادات السليلوز. وبعد عملية تطبيق الأنزيمات على المقتنيات الأثرية بغرض التخلص من البقع والاتساخات واللواصق القديمة، فإنه لابد من عمل خطوة الشطف كجزء أساس من خطوات المعالجة الأنزيمية؛ وذلك للتخلص من البقايا الأنزيمية بعد المعالجة، ويمكن أيضًا لتعديلات درجة الحرارة، ودرجة الحموضة (pH) أن تزيد من كفاءة الأنزيم، أثناء التطبيق بغرض تقليل وقت المعالجة أو استخدام تركيز أقل من الأنزيمات.

ومما لا شك فيه وتأكيدًا لما سبق ذكره، أن الأنزيمات تعدّ وسيلة مفيدة وفاعلة جدًا وبشكل خاص لأخصائي الترميم والصيانة، وبخاصة عند استنفاد جميع الخيارات الأخرى، وعدم فاعلية تلك الخيارات في عملية الترميم والصيانة لإزالة البقع واللواصق صعبة الإزالة بالطرق التقليدية، أو أيضًا عند تعذر استخدام تلك الخيارات؛ وذلك بسبب خصائص وظروف المقتنيات الأثرية نفسها وعدم قدرتها على تحمل الطرق التقليدية في الترميم والصيانة (Ahmed, 2010: 41-51; Ahmed and Kolisis, 2012: 3565-3576).

7. علم الجيولوجيا

الجيولوجيا كلمة معربة من المصطلح الإغريقي (Geology) حيث يشير المقطع (Geo) إلى جيو وتعني الأرض، والمقطع (Logy) يشير إلى العلم، وبذلك تعني الكلمة السابقة، جيولوجيا، علم الأرض. ويركز اهتمام هذا العلم على دراسة مكونات القشرة الأرضية وتراكيبها الجيولوجية وأشكال الكتل الصخرية المكونة للجبال والوديان والسهول (عطالله، 2009: 19). وظهر حديثًا علم يجمع بين الجيولوجيا وعلم الآثار، أطلق عليه علم جيواركيولوجي (Geoarchaeology)، وهذا العلم يجمع العلاقة العلمية بين علم طبقات الأرض وعلم الآثار بصفة عامة، وهو يختص باستعمال النظريات الجيولوجية بوصفها علوم مساعدة في تفسيرات المكتشفات الأثرية، وفهم التفاعل بين البشر وبيئتهم قديمًا في المواقع الأثرية (العزاوي، 2013: 111-115).

وفى ثنايا عمليات الترميم والصيانة للمواقع الأثرية، يتم دراسة جيولوجيا المواقع الأثرية والأحجار المكونة لتلك المباني الأثرية، من حيث عوامل التجوية (الطبيعية – الكيميائية – البيولوجية)، وعوامل التعرية (المياة الجارية – المياة الجوفية – الرياح)، وعوامل أخرى داخلية سواء كانت فجائية، مثل: حدوث زلازل أو بطيئة، مثل: تعرض الأرض لحركات الهبوط، التي توثر في قوة وسلامة الأحجار الأثرية. حيث تظهر تلك التأثيرات في صورة ظواهر تدهور مختلفة كالكسر والتشقق والتقشر والتفتت ومن ثم تبلور الأملاح على السطح وداخل الشقوق، إضافة إلى ضعف وهشاشة الحجر لضعف تركيبه المعدني، وتحلل المواد الأسمنتية نتيجة عمليات التجوية الفيزيائية والكيميائية، أو بسبب التجوية الميكانيكية والزلازل. وبناء على ذلك تتم دراسات المعالجة العلمية وعمل الفحوصات والتحليلات والمسح الميداني المناسبة، وبناء على تلك النتائج يتم ترميم تلك المقتنيات وحفظها من خلال التسجيل والتوثيق والترميم باختيار المواد المناسبة، وإجراء عمليات التنظيف الميكانيكي، والكيميائي، وإزالة الاملاح، والتقوية بأساليبها المختلفة (Ali, 2018: 64-78) (حواس واخرون، 2016: 51-66).

8. علم الهندسة المعمارية

تقوم الهندسة المعمارية بدورٍ أساسيٍّ في المحافظة على التراث الثقافي والتاريخي للدول، ولا سيما في الدول الغنية بالمواقع الأثرية، حيث تتنوع المواقع الأثرية. وتأتي أهمية الهندسة المعمارية في هذا السياق من قدرتها على إعادة بناء وتصميم الهياكل بما يضمن المحافظة على الهوية الثقافية لهذه المواقع، مما يسهم في تعزيز القيمة التاريخية والمعمارية للمادة الأثرية. كما تساهم الهندسة المعمارية في تطوير استراتيجيات فاعلة لحماية المواقع الأثرية من التدهور والاندثار، من خلال تنفيذ حلول مبتكرة تدمج بين الأبعاد الجمالية والوظيفية، وبفضل هذه الجهود، يمكن أن تظل المواقع الأثرية حية في ذاكرة الأجيال الحالية والمستقبلية (النيف، 2014: 1083-1114).

إن ما قد يحدث من خسائر أو دمار للمباني الأثرية نتيجة للكوارث المفاجئة من زلازل، أو فيضانات، أو حرائق، أو كنتيجة للحروب قد يكون لها طابع مختلف عن تلك الخسائر التي قد تحدث بتأثير الزمن أو التقادم. فالمباني التي تتأثر بتلك الكوارث أو الحروب تبقى صورتها حية في فكر المواطنين، وتبقى صورة الأجزاء المهدمة في أذهانهم وأذهان المسئولين؛ لأنه في الغالب توجد وثائق لها من صور ورسومات، بينما التحولات التي تحدث للمباني الأثرية والتاريخية بفعل الزمن غالباً ما لا نجد شاهداً عليها أو وثائق أو توثيق لتلك المباني. كما أن الآثار التي تتهدم أجزاء منها بفعل الكوارث أو الحروب لا تضيع أجزائها من المواد المكونة لها في الغالب، بل أن أشكال تلك الأجزاء قد تحدد في الغالب موقعها الأصلي في المبنى الأثري. تعدّ أسباب الاحتياج إلى عملية إعادة البناء سواء فيما يتعلق بالمبنى الأثري أو محيطة العمراني من أهم ما يعمل على دفع عملية الترميم إلى أقصى مدى، ولكن يجب أن يكون ذلك دون الإخلال بالمبادئ المنصوص عليها في المواثيق الدولي للترميم. لذا، فإن هذا المدى ينبغي أن يتم تحديده بشكل دقيق لكل حالة على حده، حتى نتحاشى أن تؤدي الرغبة في ترميم أحد تلك المباني الأثرية ترميماً كاملاً بإعادة بناء أجزائه المنهارة أو الناقصة إلى الوصول لنتائج غير موضوعية، بل ومضللة تاريخياً في بعض الأحيان (مصطفي، 2009: 100- 152).

خلاصة

لا يخفي على أحد أن عمليات ترميم وصيانة وحفظ المواد الأثرية تطورت في الآونة الأخيرة، وأصبحت تعتمد على استخدام أحدث العلوم الحديثة، ومما لا شك فيه أن تكامل العلوم الحديث واستخدامها في مجال ترميم الآثار، قد أحدث نقلة نوعية في هذا المجال تمثلت في نجاح عمليات ترميم التراث الثقافي بأنواعه المختلفة. ومن زاوية أخرى يمكن القول إن نجاح أي مشروع ترميم الآثار لابد وأن يقوم على التعاون الوثيق والتفاعل بين مختلف الجهات لتحقيق هذا الهدف الأسمى. وعلى ذلك أفادت الادبيات الدور الفاعل لعلم الكيمياء بمختلف تخصصاته في نجاح عمليات ترميم الآثار، وأهميته في فهم ماهية المواد الأثرية، وتأثير عوامل التلف، ومن ثم وضع خطة العلاج المناسبة مع اختيار المواد المناسبة للترميم، بما يحقق استدامة تلك المقتنيات الأثرية. ويجب ألّا ننسى أيضًا علوم البيولوجي والميكروبيولوجي لفهم طبيعة وتأثير الكائنات الحية الدقيقة وغير الدقيقة، واختيار مواد المقاومة المناسبة، وتأتي علوم الجيولوجيا لفهم طبيعة الأحجار وخصائصها، وأيضًا استخدامها في عمليات الحفائر والمواقع الأثرية. ويأتي دور علوم الهندسة مكمل لتلك الأدوار بإسهاماته الكبيرة في ترميم وصيانة المباني التاريخية في البيئات المختلفة.

ولم يكتفي علم الترميم باستخدام تلك العلوم السابق ذكرها، بل إن علم الترميم يتطلع دائما لكل معطيات العلم الحديثة، فنجد استخدام علوم الليزر في تنظيف الأسطح الأثرية دون الحاجة إلى استخدام وسائط سائلة، وأيضًا استخدام الليزر في الفحوص والتحاليل، كما استخدم علم الترميم التكنولوجيا الحيوية المتمثلة في استخدام الأنزيمات كأحد وسائل التنظيف الفاعلة والأمنه على حدٍّ

سواء، واستخدامها في تنظيف مواد الآثار عندما تفشل كل الطرق التقليدية الأخرى، ويأتي ختامًا استخدام علوم النانو تكنولوجي بما يوفره من مواد لها خصائص جديدة ومناسبة في تقوية وتنظيف ومعالجة المقتنيات الأثرية بمختلف أنواعها وأشكالها. لذلك يمكن القول إن نجاح عمليات الترميم للمواد الأثرية يعتمد على تكامل العلوم الحديثة وكيفية استخدامها بطريقة فاعلة، مع دمج عمليات الذكاء الاصطناعي في عمل التقارير العلمية واستنباط طرق علاج مبتكرة.

قائمة المصادر والمراجع

أولاً: المصادر والمراجع العربية

- إبراهيم، بسمة (2024). **تقنيات الذكاء الاصطناعي وعلم الاثار، المجلة العلمية للملكية الفكرية وإدارة الابتكار**، جامعة حلوان، مصر، ص. 361- 375.
https://journals.ekb.eg/article_382245_468bb7048ed4543da2678b4e0e1b1b4a.pdf
- بتة، مرزوق (2017). **وسائل الكشف عن المخلفات الأثرية الطرق الجيوفيزيائية – أنموذجا**، مجلة عصور الجديدة، المجلد 7، العدد 27، ص. 23- 33.
- بلعيبود، بدر الدين (2023). **تقوية الحجارة الأثرية وأساليب تطبيق المقويات، مجلة رفوف – مخبر المخطوطات** – جامعة أدرار، الجزائر، مجلد 11، العدد 1، ص. 431 - 444.
- حبيب الله، سنا؛ الأمير، سهيلة (2023). **ترميم وصيانة المباني الأثرية بتطبيق تكنولوجيا النانو والطرق العلمية الحديثة**، Academy journal for Basic and Applied Sciences (AJBAS) special issue # 2 July 2023، ص. 239- 249.
- حسين، دعاء (2012). **تفعيل دور تكنولوجيا الليزر في ترميم الزجاج**، حولية الاتحاد العام للآثاريين العرب "دراسات في آثار الوطن العربي، مقال رقم 131، مجلد 15، عدد 1، ص. 2005- 2023.
- حفني، محمد؛ محمد، نجوى؛ عبد العال، حمدي؛ حمد، رشا (2023). **دراسة مقارنة لبعض اللواصق الايبوكسية المستخدمة في ترميم الآثار الزجاجية**، مجلة كلية الآثار – العدد 26، ص. 914- 941.
- حواس، سهير؛ عسكر، محمد؛ مصطفي، ماترين (2016). **دراسة تحليلية لمشروعات ترميم المباني التاريخية والمنشآت الاثرية وذات القيمة التراثية**، مجلة جمعية المهندسين المصرية، العدد الثاني، ص. 51-66.
- الحوراني، فاتن (2022). **العلوم التطبيقية ودورها في خدمة علم الاثار**، مجلة الدراسات التاريخية، المجلد 38، العدد 145، ص. 52- 73.
- درويش، سوسن سيد؛ إمام، هشام محمود؛ محمد، ايمن صلاح طه. (2013). **استخدام تقنيات الليزر في تنظيف بقع الـ Foxing من المخطوطات الورقية**، مجلة الاتحاد العام للآثاريين العرب، المجلد 14، العدد 1، ص. 47- 61.
- الزهراني، عبد الناصر بن عبد الرحمن (2025) **الكيمياء في ترميم المواد الأثرية**. مجلة جامعة الملك سعود – كلية السياحة والآثار. المجلد السابع والثلاثون (1) ص: 21-45

- الزهراني، عبد الناصر بن عبد الرحمن؛ وغنيم، محمد أبو الفتوح (2015م). **"كيمياء الترميم والصيانة"** الرياض. الناشر جامعة الملك سعود، السعودية.
- ستيورات، باربرا (1435هـ). **تقنيات التحليل لمواد ترميم الاثار**، ترجمة عبد الناصر الزهراني، دار جامعة الملك سعود للنشر، السعودية.
- صادق، رشا؛ درويش، سوسن؛ مرسى، محمود؛ عزالدين، حربي (2021). **تقييم تأثير استخدام البلازما في إزالة البقع من المنسوجات القطنية: دراسة تجريبية**، مجلة كلية الآثار. جامعة القاهرة، مجلد، 10، مقال 11، ص.207- 227
- العزواي، عمر جسام (2013). **علم الاثار والتكنولوجيا الحديثة العلاقة والاستخدام**، مجلة كان التاريخية، العدد 20، السنة السادسة، ص. 111- 115.
- عطاالله، ميشيل (2009). **أساسيات الجيولوجيا**، دار المسيرة للنشر والتوزيع، الأردن.
- غنيم، محمد أبو الفتوح؛ الزهراني، عبد الناصر بن عبد الرحمن (1438هـ/ 2017م). **التراث الثقافي، ماهيته، مهدداته والحفاظ عليه**، مركز الملك فيصل للبحوث والدراسات الإسلامية. الرياض.
- غنيم، محمد أبو الفتوح؛ الزهراني، عبد الناصر بن عبد الرحمن (2021م). **تلف الآثار ومواد وآليات ترميمها والحافظ عليها"** الرياض. الناشر جامعة الملك سعود، السعودية
- غنيم، محمد أبو الفتوح؛ الزهراني، عبد الناصر بن عبد الرحمن (2025م). **ترميم الاثار والحفاظ عليها ـ مفاهيم ومبادئ واليات واخلاقيات**، تحت النشر.
- فهيم، نيفين (2022). **تقييم إمكانية استخدام مادة النانو سيليلوز في تقوية المنسوجات الكتانية الأثرية: دراسة تجريبية على عينات من الأقمشة الكتانية الحديثة**، مجلة كلية الاثار، جامعة جنوب الوادي، مجلد 17، ص. 789- 814.
- قاموس أكسفورد، https://www.oxfordlearnersdictionaries.com/definition/american_english/chemistry
- أبو كرورة، أماني (2018). **بعض التطبيقات العملية الحديثة الواجب استخدامها في مجال ترميم وصيانة القطع الاثرية**، مجلة العمارة والفنون، العدد العاشر، ص. 56- 66.
- مصطفي، بسام (2009). **دور عمليات إعادة البناء في الحفاظ على المباني الأثرية والمواقع التاريخية**، مجلة الاتحاد العام للآثاريين العرب، مجلد 10، عدد 1، مقال رقم 5، ص. 100-152.
- موسي، احمد؛ خلاف، محمد؛ الهجرسي، عبير؛ الطاير، سامح (2023). **استخدام جسيمات أكسيد الزنك النانوميترية في تثبيط التلف الحيوي للأحجار الجيرية الاثرية**، مجلة الاتحاد العام للأثريين العرب، المجلد 24، العدد 1، ص. 387- 410.

- مياطه، التجانى (2022م). **الطرق العلمية لصيانة المواد الأثرية العضوية – العظام والعاج والجلود نموذجا-**، مجلة قبس للدراسات الإنسانية والاجتماعية، المجلد ،60 العدد 60، ص 06-43
- النجار، حربي عزالدين (2014م). **دراسات في ترميم وصيانة المنسوجات الاثرية- الجزء الثاني - مدخل لصيانة المنسوجات الاثرية، مبادئ وتطبيقات عملية**، الدولية للنشر والتوزيع، القاهرة.
- نعناعة، توأمة (2023). **الجيوفيزياء الأثرية: تقنياتها، استخداماتها وآفاقها**، مجلة الانسان والمجال، مجلد 9، عدد 1، ص. 239- 256.
- النيف، احمد (2024). **دور الهندسة المعمارية في ترميم وحماية المواقع الاثرية دراسة حالة: المواقع الاثرية في ام الرصاص**، مجلة المجتمع العربي لنشر الدراسات العلمية، الإصدار رقم 75، ص. 1083- 1114.
- ونس، ياسمين (2024). **من تطبيقات التكنولوجيا الحديثة في مجال الآثار**، مجلة البحوث والدراسات الاثرية، العدد 15، ص. 546- 569.
- النجار، حربي عزالدين (2015م). **دراسات في ترميم وصيانة المنسوجات الأثرية- الجزء الأول - تكنولوجيا صناعة المنسوجات الأثرية وخاماتها عبر العصور**، الدولية للنشر والتوزيع، القاهرة.

ثانياً: المراجع الأجنبية

- Abdou, Wafaa (2014). To Professionals: Chemical Safety and Chemical Security Overview, *African Journal of Chemical Education*, Vol 4, Issue 3, P. 110-132
- Ahmed, Harby (2010). An Extensive Study of the Effect of the Enzyme α- amylase that Used in Textile Conservation on Silk Fibers Dyed with Safflower, Madder Dye" *e-conservation magazine*, No.17 pp 41- 51.
- Ahmed, Harby; Kolisis, Fragiskos (2011). An Investigation into the Removal of Starch Paste Adhesives from Historical Textiles by using the enzyme α – amylase" *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 12 (2011) pp. 169-179
- Ahmed, Harby; Kolisis, Fragiskos (2012). A Study on using of Protease for Removal of Animal Glue adhesive in Textile Conservation*" Journal of applied polymer science*. Vol. 124, Issue 5, pp 3565–3576.
- Ahmed, Harby; Kolisis, Fragiskos; and Gremos, Stavros (2010). Enzymatic removal of the oily dirt from a Coptic tunic using Lipase enzyme" *Journal of Textiles Apparel. Technology and Management*, U.S.A. Vol. 6, No. 3, pp 1-17.
- Ahmed, Harby; Marouf, Sherif; Mohamed, Weal (2022). Antifungal activity assessment of nanocomposites of natural chitosan and gelatin with a mahogany plant extract for conservation of historical textiles, *Heritage Science*, Vol. 10, Issue.198, p. 1- 12.

- Ali, Walid (2018). Characterization and Treatment of Rock Inscriptions in Wadi Nasib in South Sinai, Egypt, Case Study, Middle East *Journal of Applied Sciences*, Vol. 08, Issue. 01, P. 64-78.
- Bayda, Samer; Adeel, Muhammad; Tuccinardi, Tiziano; Cordani, Marco; Rizzolio, Flavio (2020). The History of Nanoscience and Nanotechnology: From *Chemical–Physical Applications to Nanomedicine, Molecules*, Vol. 25, Issue. 112, P.1-15.
- Casillo, Mario; Colace, Francesco; Gaeta, Rosario; Lorusso, Angelo; Pellegrino, Michele (2025). *Artificial Intelligence in Archaeological Site Conservation: Trends, Challenges, and Future Directions, Journal of Computer Applications in Archaeology*, 8(1): 224–241
- *Chemical Safety Manual, Indian Institute of Technology Bombay* https://www.iitb.ac.in/safety/sites/www.safety.iitb.ac.in/files/Chemical%20Safety_0.pdf
- El shafeay, Nagwa and Ahmed, Harby (2022). Evaluation of using essential oil constituents isolated from aromatic plants against insect pests attacking historical textiles in Egyptian Museum, *Egyptian Journal of Chemistry*, Vol. 65, No. 9 pp. 139 - 146
- Elhosary, Mohamed (2024). AI Role in Identifying Archaeological Sites and Uncovering Artifacts, *Journal of Archaeological Research and Studies* Vol.15, p.26-44.
- Gadd, Geoffrey. Fomina, Marina; Pinzari, Flavia (2024). Fungal biodeterioration and preservation of cultural heritage, artwork, and historical artifacts: extremophily and adaptation, *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, Vol. 88, Issue. 1, p. 1- 62.
- Goussous, Jawdat (2020). Artificial Intelligence-based Restoration: The Case of Petra, *Civil Engineering and Architecture* 8(6), p. 1350-1358.
- Hatherly, P (2010). The Science of Physical Archaeology, *Measurement + Control*, Vol 43/6, P. 186- 189.
- Pollard, A; Batt, C; Stern B; Young S (2007). analytical chemistry in archaeology, Cambridge University Press, UK. http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/53122/1/35.A.M.%20Pollard.pdf