أخطار التجوية على حصون سد أبي قير - غربي ساحل خليج أبي قير "دراسة في الجيومورفولوجيا التطبيقية"

د. أحمد فرحات حسن السيد(*) & أ. كوثر صبحي مرضي أبوالريش(**)

المستخلص:

تقع حصون سد خليج أبي قير على الجزء الغربي من شاطئ خليج أبي قير مباشرة، ويأخذ سور الحصن الواحد شكل المعين تقريباً يتوسطه البرج الدائري، ويتراوح متوسط المسافة بين كل منها حوالي ١٥٠٠ متر، وتسعى الدراسة إلى إبراز الظروف البيئية المؤثرة في نشاط التجوية بالحصون، وخضعت عينات مواد البناء لعدة تحليلات مثل حيود الأشعة السينية والميكروسكوب الالكتروني الماسح والموجات فوق الصوتية وجهاز الضخ الزئبقي، وتبين من الدراسة الميدانية، والفحص المعملي سيادة معدن الكالسيت (كربونات الكالسيوم $CaCO_3$) حيث يحتوى الحجر الجيري على أكثر من٥٠ % كالسيت، ونسبة قليلة من الأراجونيت، وبالتحليل البتروجرافي باستخدام الميكروسكوب الإلكتروني الماسح، تبين أن الأحجار تنتمى إلى الحجر الجيري البطروخي، وتعرض نسيجها لدورات متلاحقة من عمليات التجوية، وزادت المسامية في أغلب العينات على ٢٠٪، واتضح تأثير العوامل المناخية من حرارة وأمطار ورياح على زيادة معدلات التجوية في الحصون، وتبين أن مواد البناء المستخدمة في بناء الحصون، من المواد المستجيبة للأملاح، ورصدت الدراسة عدة آثار للتجوية منها: تساقط الملاط، والتجوية التمايزية، والتجوية المتوازية، والتقويض السفلي، وتكهفات التجوية، والفتات الحبيبي، والشروخ والفواصل، وخرجت الدراسة بمجموعة من النتائج والتوصيات، قد تساعد في الحفاظ على الحصون من الاندثار، وتزيد من فرص استثمار تاريخها وتراثها العريق.

الكلمات المفتاحية: خليج أبي قير، التجوية، الحجر الجيري، تساقط الملاط.

مقدمة:

تمتلك مصر بحكم كونها واحدة من أقدم الحضارات على وجة الأرض تراثًا كبيراً في شتى مجالات الحياة ، وفي مقدمتها المجال العسكري ، فالعسكرية المصرية بجذورها الضاربة في التاريخ تركت خلفها الكثير من الإنشاءات الموزعة على طول الحدود المصرية، ومع تغير فنون وأساليب القتال ظلت هذه الآثار شاهدة على هذا التاريخ، وكانت تمثل خطوطًا أمامية متقدمة للدفاع عن البلاد مما جعلها عرضة بشكل أكبر لتأثير عوامل التعرية وعمليات التجوية بشتى أشكالها، فموقع حصون سد أبي قير على الشاطئ مباشرة جعلها عرضة لفعل الأمواج والرياح بشكل متكرر خاصة أثناء العواصف، كما تعمل فيها التجوية بكامل طاقتها طوال العام، وقد أدى ذلك إلى التدهور

(*) مدرس بقسم الجغرافيا كلية الآداب – جامعة دمنهور ahmed.farahat@art.dmu.edu.eg

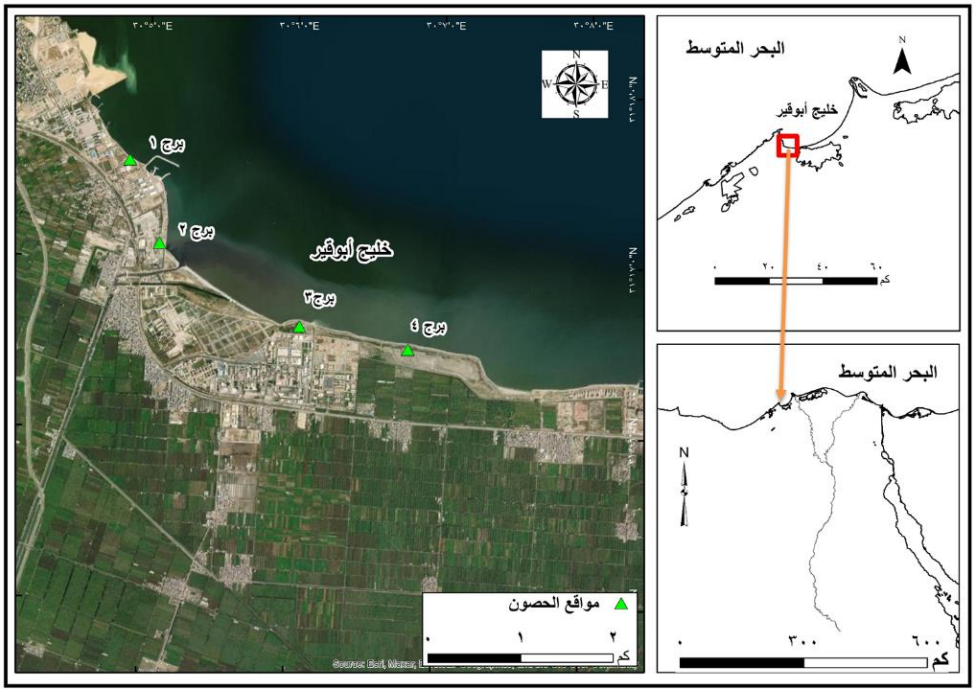
(**) دكتوراه في الجغرافيا الطبيعية . kawther.sobhy@yahoo.com

الكبير في حالة الحصون وإزالة أجزاء كبيرة منها مع غياب عمليات الترميم والتجديد لها، وتحاول الدراسة الوقوف على مدى تأثير عمليات التجوية في الحصون ومشتملاتها عن كثب، من خلال الدراسة الميدانية والفحص المعملي لعينات الصخور المكونة لها.

وحُصنت سواحل خليج أبي قير، خاصة الجانب الغربي منه – إبَّان حكم محمد علي باشا وأسرته من بعده– بمجموعة من الحصون الدفاعية تمتد فى خط دفاعي واحد موزع على الساحل من أهمها حصون ساحل سد أبي قير(موضوع الدراسة)، وتشمل أبراج (١)[١]،(٢)،(٣)،(٤)، وكان السد معروفًا قبل محمد على باشا، وكان يفصل بين بحيرة أبي قير القديمة، وبحيرة مريوط.

موقع الحصون :

تقع الحصون محل الدراسة على الجزء الغربي من شاطئ خليج أبي قير مباشرة، ويأخذ سور الحصن الواحد شكل المعين تقريباً يتوسطه البرج الدائري، ويتراوح متوسط المسافة بين كل منها حوالي ١٥٠٠ متر (شكل ١)، وتتشابه الحصون فى تخطيطها العام، حيث تتبع للتخطيط المعروف باسم " البلانقة " أى الشكل المقفول كثير الأضلاع، وعلى الرغم من عدم اشتراكها فى المعارك عند قدوم الأسطول الإنجليزى إلى الإسكندرية سنة ١٨٨٢م– مما جعلها لا تتأثر أو تتهدم من أثر ضرب الأسطول الإنجليزى عليها مثل حصون الإسكندرية– فإنها تهدمت بمرور الزمن نتيجة الإهمال وعدم الحفاظ عليها، مما أدى إلى اندثار بعض عناصرها المعمارية.



المصدر: صور جوية من Google earth، وخرائط طبوغرافية مقياس ١:٥٠٠٠٠ .

شكل (١) موقع حصون سد أبي قير على خليج أبي قير.

[١] تذكر المصادر التاريخية اندثار البرج (١) ، ولكن من مراجعة الصور الجوية تبين وجوده داخل حرم الكلية البحرية.

مشكلة الدراسة:

أتضح من الدراسة الميدانية الوضع المتردي الذي تعاني منه الحصون، التي كانت تمثل يوماً ما نقاط الدفاع المتقدمة عن البلاد ضد الأعداء، حيث كان العدو قادماً من البحر في معظم الأحيان، وترى الدراسة إمكانية الاهتمام بالحصون والاستفادة من مواقعها بشكل ثقافي وسياحي وتنموي، فهي تؤرخ لحقبة زمنية مهمة من تاريخ مصر الحديث، فضلاً عن كونها تجسد جزء حي من تاريخ وتطور العسكرية المصرية عبر العصور.

دراسات سابقة:

تعددت الدراسات التى تناولت التجوية بشكل عام، وأخرى تناولت منطقة الدراسة، ويمكن إلقاء الضوء على بعضٍ منها على النحو التالى :

اهتمت دراسة (Fitzner, et al ,2002) : بتجوية الحجر الجيرى بالآثار التاريخية بمدينة القاهرة، وتناولت دراسة (الكفافي ٢٠٠٦) علاج الأحجار الجيرية فى بعض المبانى الأثرية فى مصر وصيانتها من التلف الميكروبيولوجى، كما اهتمت دراسة (عبدالحكيم ٢٠٠٨)، بمقارنة تأثير عمليات التجوية على النقوش الصخرية التسجيلية بالصحراء الشرقية والصحراء الغربية، واهتمت دراسة (دويرى ٢٠١٠) بأثر التجوية على أشكال السطح والمعالم الأثرية والمنشآت فى مناطق مختارة من مصر مثل الساحل الشمالى الغربى، ومعبد الكرنك، وواحة سيوة، وتناولت دراسة (البيومى ٢٠١٢) أشكال التجوية الملحية، والعوامل المؤثرة فيها، وأثرها في المبانى والطرق ببعض المناطق المصرية، وعرضت دراسة (حسن ٢٠١٨) بدراسة أخطار التجوية على هرمي هوارة واللاهون بمنخفض الفيوم.

وفيما يخص منطقة الدراسة تناولت دراسة (العوضي ١٩٩٨) تحليل قوى العمليات البحرية على شواطئ خليج أبي قير، وتحديد الأوقات التى تشكل فيها هذه العمليات خطورة على الشواطئ، واهتمت دراسة (السمني ٢٠٠٦) جغرافية منطقة الساحل الغربى لخليج أبي قير، ودرس (جمعه ٢٠٠٧) التحصينات الحربية بسواحل مصر الشمالية فى القرن الثالث عشر الهجرى / التاسع عشر الميلادى، أما دراسة (شعلة ٢٠٠٧) فعرضت المنشآت الهندسية بميناءى المعدية والإسكندرية والتغييرات الجيومورفولوجية التى انتابت نطاق الشاطئ، وقام (الأنصاري ٢٠١٤) بدراسة أخطار التجوية الملحية على المنشآت بمدينة الإسكندرية، وعنت دراسة (عبدالفتاح ٢٠١٦) بجيومورفولوجية شواطئ خليج أبي قير، والعوامل والعمليات الجيومورفولوجية المؤثرة فيه، وتناولت دراسة (أبوالريش ٢٠١٨) أثر عمليات التجوية على الحصون الدفاعية القديمة بالجانب الجنوبى الغربي لخليج أبي قير.

اتضح من العرض السابق، عدم تفرد أياً من الدراسات السابقة بحصون سد أبو قير، للوقوف على تأثير عمليات التجوية عليها، والوقوف على حالة مكوناتها الصخرية، خاصة في ظل موقعها في مواجهة كافة العمليات البحرية التي تؤثر في بنيتها الصخرية.

وتطرح الدراسة عدة تساؤلات ترنو إلى الإجابة عليها، على النحو التالي:

ماهي الحالة الإنشائية للحصون؟

هل تتم صيانة الحصون بشكل دوري؟

ما مدى تأثير عمليات التجوية في بنية الحصون؟

ما هي الوسائل الممكنة للحفاظ على الحصون من الاندثار؟

هل يمكن الاستفادة من هذه الحصون؟

وتسعى الدراسة إلى إبراز الظروف البيئية المؤثرة في نشاط التجوية بالحصون، والمتمثلة فى الظروف المناخية السائدة بالموقع، والأملاح، والغطاء البيولوجي المرئي، إضافة إلى دراسة ميكانيكية عمل التجوية بنسيج أحجار البناء، ورصد آثارها التدميرية على الحصون، مع عرض أنسب الطرق للتدخل وحماية هذه الآثار من عوامل الهدم والتدمير.

واعتمدت الدراسة المنهج الوصفي التفسيري لدراسة العوامل المؤثرة فى نشاط عمليات التجوية بالحصون، والمدخل التاريخى لدراسة تاريخ الحصون، والمدخل التحليلى لنتائج الدراسة الحقلية والمعملية للعينات.

واعتمدت الدراسة على عدة أساليب أهمها :

١– اسلوب الدراسة الميدانية: وتمثل المصدر الرئيس للبيانات الواردة بالدراسة، وتمت خلال زيارات متفرقة للحصون خلال شتاء عام ٢٠٢٢، وتم خلالها أخذ الصور الفوتوغرافية والعينات الصخرية ورسم الاسكتشات للحصون.

٢- الأسلوب الكمي: استخدم فى تقييم أثر عمليات التجوية بالحصون اعتماداً على القياسات الحقلية، إضافة إلى قياس الخواص الفيزيائية، وقياس معامل استجابة مواد البناء للأملاح، وقياس إجمالى الأملاح الذائبة والتوصيل الكهربائى بعينات مواد البناء بالحصون، مثل قياس معاملات الارتباط بينها

٣ -الصور الفوتوغرافية : استخدمت الصور لإبراز الواقع الذى تعانى منه الحصون.

وخضعت عينات مواد البناء الممثلة لمواقع الدراسة لعدة تحليلات تمثلت فى:

١. حيود الأشعة السينية : " X – ray diffraction" ، وهى الأشعة الخاصة بتحديد المعادن المكونة للحجر الخاضع للفحص، ويعتمد الأساس العلمى لها على انعكاس الأشعة وحيدة الموجة عن مسارها، وذلك بسقوطها على المستويات الذرية للبناء البلورى المميز لكل مادة، واستقبال هذه الانعكاسات على مستقبله الذى يعرف بنمط حيود الأشعة السينية.

٢. الميكروسكوب الالكترونى الماسح : استخدم لدراسة مورفولوجيا مواد البناء (الشكل الداخلى لمواد البناء) لتحديد مدى تأثرها بعمليات التجوية، إضافة إلى إبراز نواتج تلك العمليات على النسيج الداخلى لتلك المواد .

٣. الموجات فوق الصوتية: استخدمت فى قياس الخواص الميكانيكية لمواد البناء، والتى تمثلت فى سرعة الموجات ومدى احتكاكها الداخلى داخل العينات المختبرة، وقوة تحملها للضغوط .

٤. جهاز الضخ الزئبقى : (MIP) استخدم فى تحديد معامل استجابة مواد البناء للأملاح.

٥. جهاز : (Electrical Conductivity Meter) استخدم فى قياس التوصيل الكهربائى للماء، والذى يحدد مدى قابلية نقل الماء للتيار الكهربائى بوحدة المايكروسيمنس، حيث تعتمد قيمة التوصيل الكهربائى على تركيز الأيونات فى المياه، وينتج التوصيل الكهربائى العالى عن ارتفاع نسبة الأملاح.

٦. العمل المعملى اليدوى: استخدم فى قياس الخواص الفيزيائية لمواد البناء.

وتركز الدراسة على المحاور الآتية لتحقيق أهدافها:

- الخصائص العامة للحصون.
- العوامل المؤثرة فى نشاط التجوية بالحصون .
- الآثار التدميرية للتجوية بالحصون.
- أساليب حماية الحصون.

أولاً: الخصائص العامة للحصون.

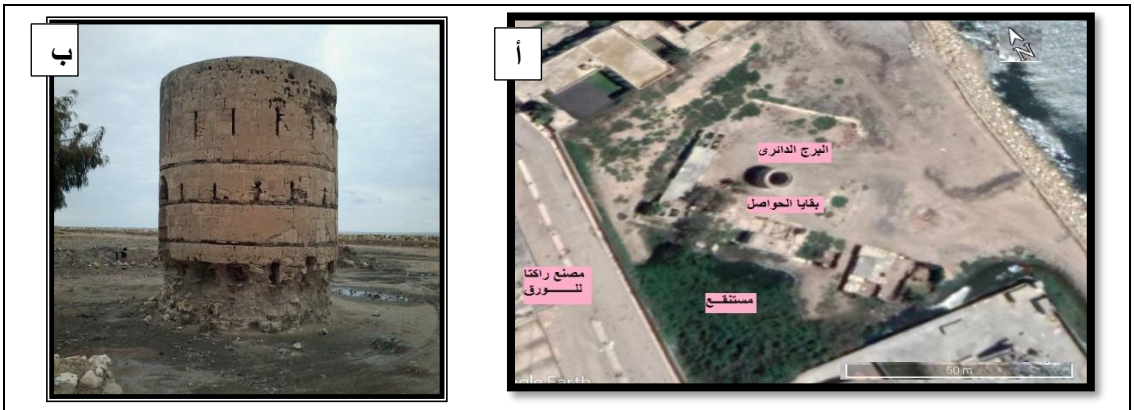
وتضم خصائص مواقع الحصون وخصائصها الهندسية والإنشائية، وخصائص مواد البناء، ويمكن عرضها على النحو التالي:

١- خصائص مواقع الحصون:

أ- **برج (٢)** : يقع على شاطئ خليج أبي قير مباشرة خلف مصنع راكتا للورق، وتمثل الإحداثيات (٤.٤١ً ١٧َ ٣١ْ شمالًا ، ٤.٦٨ً ٥َ ٣٠ْ شرقًا) النقطة المركزية لموقع الحصن، ولازال محتفظًا ببعض عناصره المعمارية، سواء أكانت الحواصل(سكن الجنود) أم البرج الدائرى إلا أنه فى حاجة ماسة إلى عمل ترميمات سريعة، حيث تهدمت جميع أسواره الخارجية، ولم يتبق منها سوى آثار مختفية مع مستوى سطح الأرض المحيط، (شكل ٢ -أ).

ويمثل البرج الدائرى المبنى الرئيس بالحصن، والذى ما زال محتفظًا بتصميمه المعماري، بالرغم من سقوط أحجار كثيرة من جزئه السفلى، ويبلغ قطره ٧.٦٠ أمتار، وارتفاعه ١٢ متراً، ويتكون من ثلاثة طوابق تفصلها العوارض الخشبية، ويحتوى على عدد كبير من المزاغل[٢] ، ويقع مدخله بالطابق الثانى بمنتصف البرج ويفتح جهة الغرب، وتهدم السلم الحجرى الخارجى للبرج ، (شكل ٢ - ب).

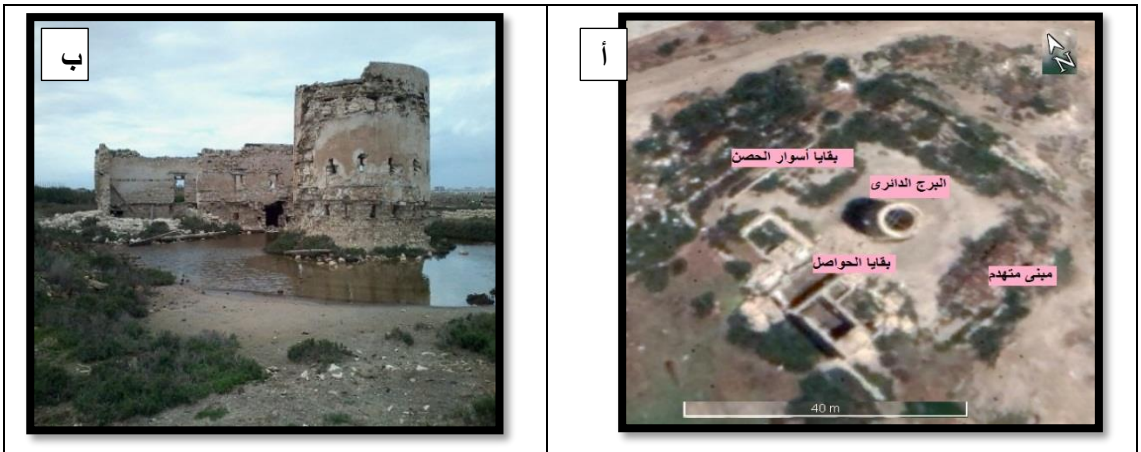
[٢] المزاغل : هى فتحات طولية أو رأسية ضيقة من الخارج ومتسعة من الداخل ، وهى من العناصر المعمارية التى ظهرت منذ بداية العصر الإسلامى (القطري، ١٩٩٧: ٣٨).



شكل (٢) أ – مخطط حصن برج (٢)، ب– البرج الدائرى بحصن برج (٢)(متجهًا صوب الشمال الشرقى).

ب– برج (٣) : يقع على شاطئ الخليج مباشرة خلف شركة أبي قير للأسمدة، وتمثل الإحداثيات (٣٧.٠٤ً ١٦ َ ٣١ ْ شمالًا ، ٣.١٦ً ٦ َ ٣٠ ْ شرقًا) النقطة المركزية لموقع الحصن، ويشبه فى تخطيطه المعمارى حصن برج (٢)، وما زال محتفظًا بجميع عناصره المعمارية، سواء أكانت الحواصل أم البرج الدائري، وكان يحيط بالحصن أسوار خارجية ما زالت آثارها بالموقع (شكل٣).

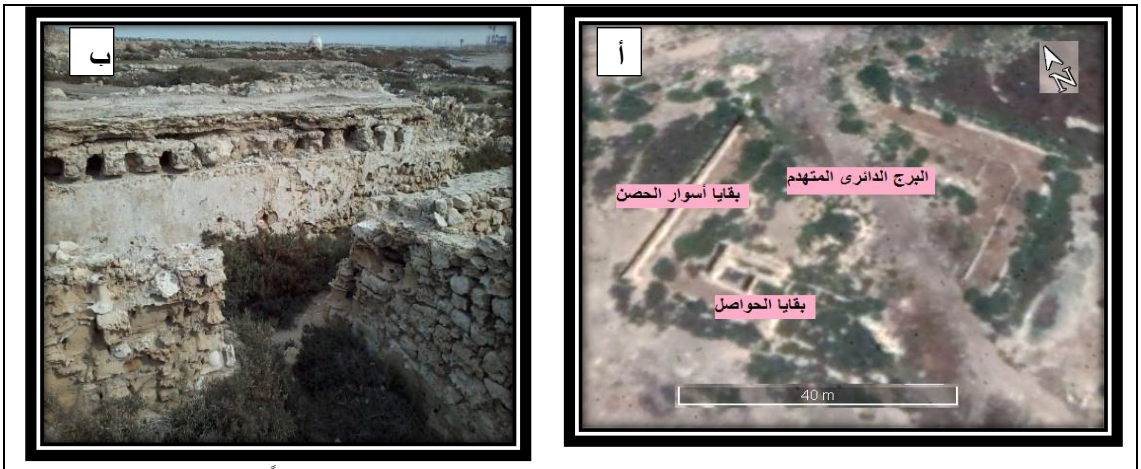
ويمثل البرج الدائرى المبنى الرئيس بالحصن، وما زال محتفظًا بتصميمه المعماري، بالرغم من سقوط أحجار كثيرة من جزئه السفلى، ويبلغ قطره ٧.٦٠ أمتار، وارتفاعه ١٢ متر، ويتكون البرج من ثلاثة طوابق تفصلها العوارض الخشبية، ويحتوى على عدد كبير من المزاغل، ويقع مدخل البرج بالطابق الثانى بمنتصف البرج، ويفتح جهة الشمال الغربى ولكنه متهدم، وما زالت بقايا السلم الحجرى الخارجى للبرج موجودة.



شكل (٣) أ– مخطط برج (٣)، ب– شكل (٧) العناصر المتبقية من برج (٣)، متجهًا صوب الغرب.

ج– برج (٤) : يقع على شاطي الخليج مباشرة أيضاً، بالقرب من قرية رسلان، وتمثل الإحداثيات (٢٩.٧٨ً ١٦ َ ٣١ ْ شمالًا ، ٤٧.٧٥ً ٦ َ ٣٠ ْ شرقًا) النقطة المركزية لموقع الحصن، ويشبه فى تخطيطه المعمارى العام حصن برج (٣)، ولم يتبق منه سوى بعض العناصر المعمارية التى تعطي تصوراً عما كان عليه فى سابق عهده مثل الأجزاء المتبقية من الأسوار الداخلية والخارجية، وبقايا الحواصل والبرج الدائرى متهدم بالكامل (شكل ٤).

ويتوسط البرج الدائرى الفناء الداخلى للحصن، وتهدم هذا البرج تماماً فى الوقت الحالى، ولم يتبق منه سوى أساساته وبقايا الجدارن المتهدمة، وبالرغم من تهدم البرج حالياً، فإن تخطيطه المعمارى كان يشبه برجي (٢) و(٣)، وقد تهدمت الحواصل، ولم يتبق من تخطيطها الداخلى سوى جزء مستطيل منخفض مقسم إلى حجرتين اثنين لكلٍ منهما مدخل، حيث كانت تتكون الحواصل من طابقين اثنين، كما هو الحال بحواصل حصنى (٢)و (٣).



شكل (٤) أ- مخطط حصن برج (٤)، ب- بقايا حواصل حصن برج (٤) المتهدمة (متجهاً صوب الشمال الشرقى).

٢- خصائص مادة بناء الحصون :

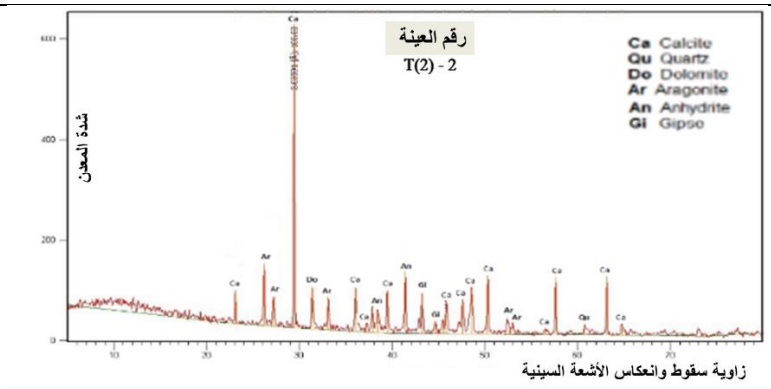
تعد مواد البناء المسرح الذى تحدث على سطحه عمليات التجوية، ويعد الحجر الجيرى مادة البناء الأساسية المستخدمة فى بناء الحصون، وتباينت ألوان الحجر الجيرى المستخدم فى بناء الحصون بين ثلاث درجات لونية هى الأبيض، والرمادى والأصفر، لذلك تم الأخذ فى الاعتبار ذلك التباين اللونى بين العينات الحجرية المستخدمة للفحص المعملى، ويرجع ذلك التباين إلى كثرة الشوائب به، ويمكن دراسة خصائص مادة البناء من خلال ثلاثة عناصر على النحو التالي:

أ- التركيب المعدنى :

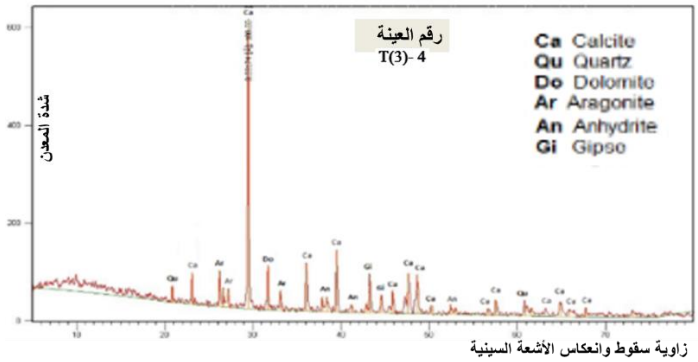
تبين من الدراسة الميدانية، والفحص المعملى للعينات الحجرية ونتائج التحليل بحيود الأشعة السينية لعينات مواد البناء (شكل ٥) ما يلي:

- تتكون العينات بصفة أساسية من معدن الكالسيت (كربونات الكالسيوم $CaCO_3$) مع معادن ثانوية مثل معدنى الدولوميت والكوارتز، ويرجع الحجر الجيرى الدولوميتى لوجود معدن الدولوميت فى العينات.
- يحتوى الحجر الجيرى على أكثر من٥٠ % كالسيت، ونسبة قليلة من الأراجونيت.
- اتضح أن الكوارتز المختلط بحبيبات الحجر الجيرى معدن ثانوى ترسب حول الحبيبات الأصلية للحجر؛ ولذلك فمن شأنه إضعاف الحجروتسهيل تجويته.
- ويعزى تواجد الجبس بالعينات إلى أنه يعد شائبة طبيعية فى الحجر، ويمكن أن يكون ناتجاً من التجوية الكيميائية للأحجار الجيرية.

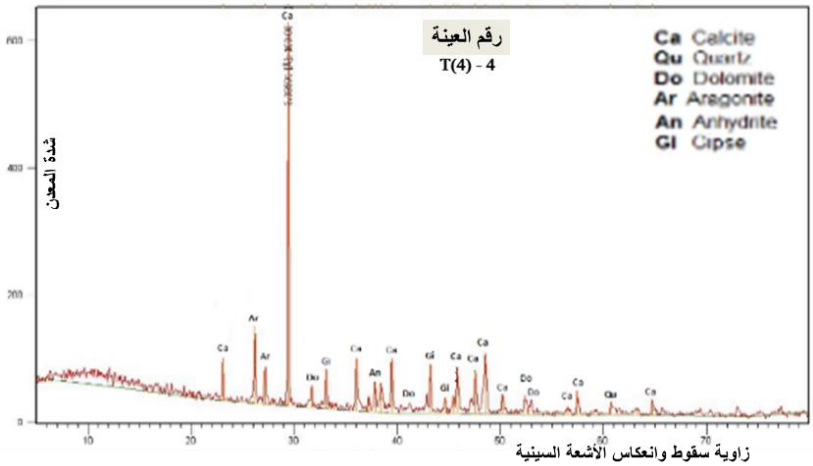
– يوجد الانهدريت بالعينات لتحول معدن الجبس إلى معدن الانهدريت، لفقد معدن الجبس للماء المتحد كيميائياً مع جزيئاته، ومن ثم تحوله من طور الديهيدريت إلى الانهيدريت، لتعرضه لظروف الحرارة والجفاف.



(أ) الحجر الجيرى الأبيض.



(ب) الحجر الجيرى الرمادى.



(ج) الحجر الجيرى الأصفر.

المصدر :التحليل المعملي لعينات الصخورباستخدام حيود الأشعة السينية "X – ray diffraction " بالمعمل القومي للبحوث ٢٠٢٢.

شكل (٥) التركيب المعدنى لبعض عينات مواد البناء.

ب - الوصف البتروجرافى(الصخري) :

يساعد الوصف البتروجرافي لمواد البناء فى التعرف على نسيج الحجر ومظهره الداخلى، وبالتالى تحديد نظام ترتيب الحبيبات ودرجة اندماجها وتماسكها ببعضها، إضافة إلى تحديد مدى تأثر نسيجها بعمليات التجوية، وما حدث لها من تغير فيزيوكيميائى نتيجة تفاعل مواد البناء مع عوامل التجوية المختلفة، وتم عمل التحليل البتروجرافى باستخدام الميكروسكوب الإلكترونى الماسح، وكانت نتائجه (شكل ٦) كالتالي:

- يلاحظ تطابق نتائج الدراسة البتروجرافية مع نتائج التحليل بحيود الأشعة السينية، وقد أظهرت الدراسة أن تلك الأحجار تنتمى إلى الحجر الجيرى البطروخى، كما أوضحت أن المكون الأساسي لتلك الأحجار هو معدن الكالسيت الذى يختلف فى درجة تبلوره من دقيق إلى متوسط إلى خشن التبلور، والمسام متوسطة الحجم ومتصلة مع بعضها.

- تعد الأحجار الجيرية المستخدمة فى بناء الحصون من الأحجار الرسوبية ذات التركيب البنائى الطبقى، واتجاه التركيب الطبقى بالنسبة للأحجار الرسوبية يعبر عن طاقة الوسط الحامل لترسيب هذه المواد طبقًا لمعدلات ميكانيكية أو كيميائية فى الفترات الزمنية التى تكونت فيها هذه الأحجار.

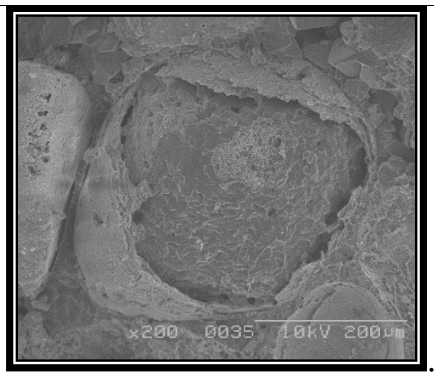
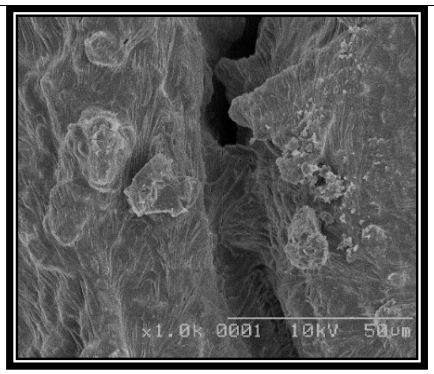
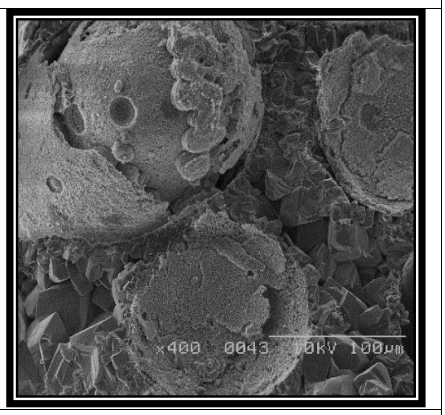
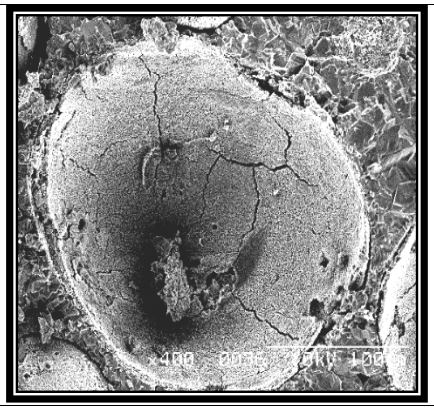
- الأحجار الجيرية الخاضعة للفحص وفق تصنيف (دنهام Dunham)[٣]، حجر معبأ، حيث تظهر الحبيبات البطروخية شديدة الترابط ويتخللها السباريت والميكروسبار، ويميل شكل الجبيبات البطروخية بالنسيج إلى الاستدارة، وتدل هذه الاستدارة على مسامية الحجر، حيث تصل المسامية إلى أعلى قيمة لها فى النسيج ذات الحبيبات المستديرة وشبه المستديرة، إضافة إلى تساوى وتقارب حجم الحبيبات البطروخية والذى من شأنه زيادة مساميتها.

- تعرض نسيج العينات الخاضعة للفحص لدورات متلاحقة من عمليات التجوية، مما أدى إلى تفتت النسيج، ومن أهم آثار التجوية التى تم رصدها على المستوى الدقيق : تعرض أسطح الحبيبات البطروخية للتقشر فى شكل راقات "تقشر بصلي"، وتفتت الحبيبات البطروخية، إضافة إلى ظهور الشروخ والفجوات بأسطح الحبيبات البطروخية، وانفصال الحبيبات البطروخية عن المادة اللاحمة، وتراكم الأملاح على سطح الحبيبات وفى ثنايا النسيج الداخلية.

-تعد التجوية الملحية أهم عمليات التجوية، وبالتالى هى المتحكم الرئيس فى تفتت النسيج الداخلى لمواد البناء، حيث ارتبطت جميع آثار التجوية التى تم رصدها على المستوى الدقيق بنشاط التجوية الملحية داخل النسيج، ويرجع ذلك إلى طبيعة المواقع الساحلية وتأثرها بالمؤثرات البحرية بشكل مباشر.

---

[٣] تصنيف دنهام للحجر الجيرى (Dunham) ١٩٦٢ : يعتمد على كمية كلٍ من المادة اللاحمة والحبيبات الجيرية بالصخر، بصرف النظر عن نوعيتها، واعتمادًا على ذلك يُصنف الحجر الجيرى إلى الأنواع الأتية: الحجر الحبيبى (Grain stone)، والحجر المعبأ (Pack stone)، والحجر الواكى (Wacke stone)، والحجر الطينى (Mud stone)، والحجر المترابط (Bound stone) ، الحجر المعبأ: هو الحجر الجيرى الذى يتكون من حبيبات جيرية شديدة الترابط، ويتخللها كميات قليلة من راسب الأرضية (أقل من ٥٪)، (عوض & محمود ، ٢٠٠٧ :١٩٣).

	
أ – أحد العينات الجيرية بحصن برج (٢)، تظهر به إحدى الحبيبات البطروخية المكونة للحجر الجيرى، التى تعرض سطحها للتقشر فى شكل طبقات، إضافة إلى ظهور النقر الدقيقة بسطحها بسبب تعرضها لدورات متلاحقة من عمليات التجوية	ب– أحد العينات الجيرية بحصن برج (٣)، يظهر به الحبيبات البطروخية المكونة للحجر الجيرى، المغطاة بأملاح الكلوريدات النصف متبللورة، إضافة إلى ظهور الأملاح متصلة عبر الشروخ والأجزاء الخالية من المادة اللاحمة بنسيج العينة.
	
ج– أحد العينات الجيرية بحصن برج (٣)، يظهر به الحبيبات البطروخية المكونة للحجر الجيرى، والمتلاحمة مع بعضها بالميكروسبار، والتى تعرض سطحها للتقشر الشديد فى شكل راقات، إضافة إلى ظهور الفجوات بسبب تعرضها لدورات متلاحقة من عمليات التجوية.	د– أحد العينات الجيرية بحصن برج (٤)، تظهر به إحدى الحبيبات البطروخية المكونة للحجر الجيرى، التى تأثر سطحها بالشروخ المتداخلة، والتى تعد المرحلة الأولى لتعرض سطح الحبيبة للتقشر، إضافة إلى ظهور الفجوات بجوانب الحبيبة البطروخية التى أدت إلى تفتتها.

المصدر :صور الميكروسكوب الالكترونى الماسح، المعامل المركزية بالهيئة العامة للمساحة الجيولوجية والثروة المعدنية، ٢٠٢٢.

شكل (٦) نتائج الفحص البتروجرافي(الصخري) باستخدام الميكروسكوب الإلكترونى الماسح.

ج- الخواص البتروفيزيائية :

هى مجموعة من الخواص تعتمد على حجم الحبيبات وشكل النسيج الداخلى لمادة البناء، وتشمل مسامية المادة، والنسبة المئوية لامتصاصها للمياه، وذلك لتحديد درجة جودة المواد المستخدمة، ومدى استجابتها لعوامل التجوية الخارجية بالوسط المحيط بها، ومن خلال الدراسة الميدانية تم أخذ عينات من كل أنواع الصخور الموجودة في كل حصن واخضاعها للتحليل(جدول ١) وكانت النتائج كالتالي:

- المسامية[٤] Porosity :

تساعد المسام على تسهيل عمليات التجوية وإتمامها، كما أنها تسهم فى التعجيل بتفكك مواد البناء وتحطمها، وتعد مؤشراً مهماً لمدى قابلية الأحجار للتلف والتحلل، حيث إن معدلات التجوية للأحجار تزداد بزيادة المسامية بها، وتعد مسامية عينات الحجر الجيرى ومونة البناء وملاط الحوائط مرتفعة، وفق تصنيف (Farmer,1968)[٥]، حيث زادت المسامية في أغلب العينات على ٢٠٪ في الكتل الصخرية المكونة للحصون.

- امتصاص المياه :

تعبر نسبة امتصاص المياه عن مدى قابلية الحجر لامتصاص الماء والمحاليل المائية الأخرى، وتوجد علاقة وثيقة بين مسامية الحجر، ونسبة امتصاصه للمياه، فالأحجار ذات المسامية العالية، يمكنه امتصاص قدر كبير من الماء فى وقــت قصير، ومثل تلك الأحجار لا تصلح لأغراض التشيد أو الترميم، لأن امتصاص الماء يعنى دخول أملاح ذائبة إلى مسام الحجر، ومع تكرار العملية يبدأ عمل التجوية الملحية.

وتبين من نتائج تحليل عينات الدراسة ارتفاع نسب امتصاص المياه بالعينات المختبرة، حيث تتناسب هذه الخاصية طردياً مع مسامية الحجر، إلا أن الحجر أحياناً لا يمتص الماء بالقدر الذى يملأ الفراغات به، نتيجة فقاعات الهواء التي تمنع تغلغل الماء داخل الفراغات، وقد يرجع ذلك إلى بعض المعادن الطينية بداخل الفراغات، والتى تمتص الماء ويزيد حجمها لتسد الفراغات الداخلية للحجر.

- سرعة الموجات فوق الصوتية والاحتكاك الداخلى للموجات :

وتؤثر معدلات التجوية بصورة مباشرة فى سرعة الموجات فوق الصوتية وقيم الاحتكاك الداخلى للموجات بمواد البناء، حيث تقل سرعة الموجات، وتزيد قيم الاحتكاك كلما زادت درجة

---

[٤] تم حساب نسبة المسامية بطريقتين هما: طريقة الغمر بالماء وهذه الطريقة التقليدية وتعد الأولى لمسامية الصخر، والطريقة الثانية طريقة حديثة يستخدم فيها الزئبق لحساب نسبة توزيع المسام ذات الأقطار المختلفة من مسامية الصخر أو ما يسمى Pore Size Distribution) PSD)والتي تجعله يستجيب للتجوية أو لا يستجيب وهذه الطريقة تستخدم جهاز الضخ الزئبقى MIP ، وتعد هذه الطريقة واحدة من المعاملات الأساسية فى متابعة صلابة الصخر ومدى تأثره بالتجوية الملحية (Kamh, 2017:١) .

[٥] تصنيف (Farmer,1968) لمسامية الحجر الجيرى، حيث قسم درجة المسامية إلى ثلاث فئات هى: منخفضة(١٠-١ %) ومتوسطة(١٠- ١٥٪) ومرتفعة(٢٠٪-١٥) (Kamh, 2007: 39).

تلف النسيج الداخلى لمواد البناء، ومن خلال العلاقة بين سرعة الموجات فوق الصوتية، وقيم الاحتكاك الداخلى بعينات الحجر الجيرى المختبرة بأنواعها المختلفة، وعينات المونة والملاط، وجد أنها علاقة عكسية قوية بمعامل ارتباط (-٠.٩)، حيث انخفضت سرعة الموجات وارتفعت قيم الاحتكاك الداخلى بجميع العينات المختبرة.

جدول (١) الخواص البتروفيزيائية لعينات مواد بناء الحصون.

الموقع	كود العينة	نوع العينة	المسامية (%)	امتصاص المياه (%)	سرعة الموجات فوق الصوتية	قيم الاحتكاك الداخلى
برج (٢)	T(2) - 1	حجر جيرى أبيض	٢٦.٩	١٣.٠	١.٥	٨.٩٩
	T(2) - 2	بيضاء بها رواسب رملية	١٨.٤	١٠.٧	١.٨٢	٦.٨٦
	T(2)- 3	حجر جيرى رمادى	٢٤.١	١١.٠	١.٦١	٨.٥
	T(2)- 4	حجر جيرى مصفر	١٦.٩	٩.١	١.٨٩	٦.٦١
	T(2)- 5	مونة البناء	٣٤.٠	٢٥.٢	١.٥٢	٩.٢
	T(2)- 6	ملاط الجدران	٣٠.٠	١٨.٦	١.٨٣	٦.٩
برج (٣)	T(3)- 1	حجر جيرى أبيض	١٥.٠	٩.٨	١.٩٧	٦.٥٩
	T(3)- 2	حجر جيرى مصفر	١٣.٤	٦.٣	٢.١	٦.٤٤
	T(3)- 3	بيضاء بها رواسب رملية	٢٥.٧	١٣.٢	١.٦	٨.٥٣
	T(3)- 4	حجر جيرى رمادى	١٨.٣	١٤.٢	٢.٤١	٥.٢
	T(3) - 5	مونة البناء	٣٠.٠	١٥,٤	١.٨١	٦.٩
	T(3)- 6	ملاط الجدران	٣٢.٢	٢٠.٦	١.٨٦	٦.٧
برج (٤)	T(4) - 1	حجر جيرى أبيض	٢٢.٥	١٢.٧	١.٦١	٨.٥١
	T(4) - 2	حجر جيرى مصفر	٢٢.٩	١٢.٤	١.٦٢	٨.٥٠
	T(4) - 3	حجر جيرى رمادى	٢٤.١	١١.٠	١.٤٥	٧.٥
	T(4) - 4	بيضاء بها رواسب رملية	٢٣.٧	١٣.٢	١.٨١	٦.٨٥
	T(4) - 5	مونة البناء	٣٧.٩	٢٧.٩	١.٨٣	٦.٥
	T(4) - 6	ملاط الجدران	٤١.٣	٢٦.٦	١.٨٣	٦.٨

المصدر: نتائج تحليل العينات بمعمل علوم البيئة بكلية العلوم جامعة المنوفية.

ثانيًا: العوامل المؤثرة فى نشاط التجوية بالحصون

تعد عملية التجوية نتاج التفاعل بين البنية الداخلية للصخور ومكوناتها المعدنية والظروف البيئية السائدة، وتتأثر الحصون كغيرها من المبانى بالظروف البيئية المحيطة من ظروف مناخية سائدة بالموقع، وأملاح، وغطاء بيولوجى، وحيوانات وحشرات.

١- الظروف المناخية :

يُعد المناخ من أهم العوامل البيئية المؤثرة فى نشاط التجوية والمحرك الرئيس لعملياتها بالحصون؛ حيث تتمتع منطقة الدراسة –طبقاً لموقعها– بخصائص المناخ الانتقالي الذي يجمع بين

خصائص المناخ شبه الجاف ومناخ البحر المتوسط، ويمكن تتبع أثر عناصر المناخ في الحصون على النحو التالي(ملحق ١):

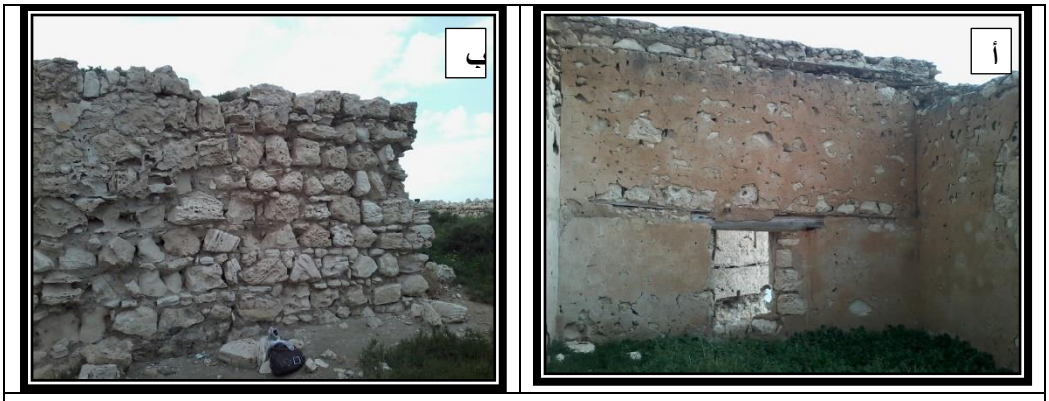
أ- درجة الحرارة :

تُعد درجة الحرارة أهم العناصر المناخية، لتأثيرها المباشر وغير المباشر في بقية العناصر المناخية، حيث يصل المعدل الشهرى للحرارة أقصاه فى شهور الصيف، خاصة شهر أغسطس(٢٦.٥ درجة مئوية)، في حين يصل أدناه فى شهور الشتاء، خاصة شهر يناير(١٣.٧ درجة مئوية)، نتيجة تأثر المنطقة خلال هذه الفترة بالمؤثرات البحرية القادمة من خليج أبي قير، والرياح الشمالية والشمالية الغربية، والمنخفضات الجوية الجبهية.

وتؤثردرجة الحرارة المرتفعة تأثيراً كبيراً في نشاط التجوية الملحية؛ حيث تتسبب فى التبخر السريع للسوائل الحاملة للأملاح مؤدية فى النهاية إلى تبلور هذه الأملاح فى الأجزاء المختلفة للجدران أو على أسطح الأحجار أو تحت الأسطح مباشرةً، إضافة إلى تأثيرها فى تحول بعض معادن الأحجار مثل تحول الجبس إلى الأنهدريت نتيجة فقد جزئ الماء المتحد بمعدن الجبس.

ويؤدى انخفاض درجة الحرارة خلال فصل الشتاء، وأثناء الليل إلى إحداث عمليات نمو لجزيئات المياه وبلورات الأملاح داخل مسام الأحجار بالتميؤ، مما يؤدى إلى تغير حجمها، ومن ثم تحطم البناء المسامي لهذه الأحجار.

كما تعد درجة الحرارة من العوامل المساعدة لنمو الكائنات الحية الدقيقة بكل أنواعها فى ظل الرطوبة، ومن ثم إصابة مواد البناء بالتجوية البيولوجية، وتؤدى أشعة الشمس إلى جفاف وتشقق الأخشاب و"المونات" التي تغطي الجدران (شكل ٧).



شكل (٧): أثر الحرارة فى انفصال الطبقات السطحية من الجدران فى صورة قشور أ- بالطابق العلوى لحواصل حصن برج (٣)(متجهًا صوب الغرب)، **ب- الواجهة الشرقية لحواصل حصن برج (٤)**(متجهًا صوب الشرق).

ب – الرياح:

تُسهم دراسة اتجاهات الرياح وسرعتها فى معرفة مدى تأثيرها في الأسطح الخارجية للمبانى، حيث تتحكم سرعة الرياح فى مدى قدرتها على حمل حبيبات الرمال والغبار الملحي، ومدى اختراقها لمسام الصخر، ويوضح (جدول ٢) المتوسطات الفصلية والسنوية لقيمة سرعة الرياح (كم/ الساعة) في منطقة الدراسة ويتبين منه الآتي :

جدول (٢) المتوسطات الفصلية والسنوية لسرعة الرياح (كم/ الساعة) في مدينة الإسكندرية للفترة (٢٠١٢-١٩٨٠)

فصل الشتاء	فصل الربيع	فصل الصيف	فصل الخريف	المتوسط السنوي
15.47	14.58	14.41	12.65	١٤.٢٨

المصدر: الهيئة العامة للأرصاد الجوية، القاهرة، بيانات غير منشورة.

- ارتفاع متوسط سرعة الرياح السنوي في منطقة الدراسة إلى ١٤.٢٨كم/ الساعة وتزداد تلك القيمة في فصل الشتاء، حيث تصل إلى ١٥.٤٧كم/ الساعة، في حين تقل في فصل الخريف (١٢.٦٥كم/ الساعة)، وتتقارب سرعة الرياح خلال فصلي الربيع والصيف حيث تكون في الربيع ١٤.٥٨كم/ الساعة وفي الصيف ١٤.٤١كم الساعة.
- يصل المعدل الفصلى لسرعة الرياح بمنطقة الدراسة أقصاه خلال فصلي الشتاء والربيع، بسبب هبوب الرياح الجنوبية الغربية والرياح الشمالية الغربية خلال الفصلين.

وتهب الرياح من جميع الاتجاهات ولكن بنسب متفاوتة، فالرياح الشمالية تشكل ٣٧.٥% من عدد مرات هبوب الرياح يليها الشمالية الغربية (٣٤.٣٪)، ثم الشمالية الشرقية (١١.٢٪)، ومن ثم فإن لاتجاه الرياح دوره في تحديد درجة التجوية الملحية على المنشآت تبعاً لمواقعها بالنسبة لاتجاهات الرياح الرئيسة، فواجهات المنشآت المواجهة للشمال أو الشمال الغربية يتضح التأثير الكبير لعمليات التجوية الملحية (الأنصاري، ٢٠١٤: ١١٠٧).

ويعتمد تأثير الرياح على عدة متغيرات أهمها: طبيعة الأسطح المعرضة للرياح من حيث صلابتها ونوعية المادة اللاحمة بين حبيباتها، إضافة إلى مدى الالتحام بين بلورات وحبيبات الصخور. واتجاه الرياح، وسرعتها، وطبيعة وحجم الحبيبات التى تحملها، حيث تزداد مقدرتها على النحت كلما كانت الحبيبات المستخدمة فى النحت غير منتظمة الشكل، وأكثر صلابة.

ج –الرطوبة النسبية:

يبلغ المتوسط السنوى للرطوبة النسبية في منطقة الدراسة ٦٩.٣٪، بسبب المسطحات المائية المتمثلة فى خليج أبي قير، والمصارف، فضلًا عن الأرض الزراعية والسبخات، وتؤثر الرطوبة

تأثيراً واضحاً فى تجوية الحصون؛ حيث إن قطرات الماء تتجمع على الأسطح الخارجية للحصون، وعندما تصل هذه المياه للداخل، تذيب الأملاح القابلة للذوبان فى الماء، وبارتفاع درجة الحرارة نهاراً تصعد هذه المياه إلى سطح مادة البناء حاملة معها الأملاح المتبلورة على الأسطح الخارجية لأحجار البناء حيث تنمو وتزدهر، وبتكرار هذه العملية فإنها تُحدث ضغوطًا شديدة على الطبقات السطحية لأحجار البناء مُؤدية فى النهاية إلى تفتتها وتساقطها.

ويصاحب الرطوبة المرتفعة إذابة المواد اللاحمة لحبيبات الأحجار الجيرية، وحملها إلى الأسطح المكشوفة؛ حيث تترسب على هذه الأسطح عند جفاف محاليلها مكونة ما يُعرف بالقشرة الصلدة والتى تعمل على حماية أسطح الأحجار من عوامل التجوية الميكانيكية، إلا أن الطبقات الواقعة أسفلها تكون هشة جداً نتيجة سحب المواد اللاحمة منها، ومن ثَمَ يسهل انفراط حبيباتها إذا حدث وأزيلت القشرة الصلدة، وتعد الرطوبة عاملًا مهماً لإتمام عمليات التجوية الكيميائية؛ لأن الماء يساعد فى تحريك الأيونات لكى تتفاعل مع بعضها.

د -الأمطار:

تحظى منطقة الدراسة بنصيبٍ وافر نسبياً من الأمطار الشتوية تميزها عن غيرها من المناطق الداخلية، بسبب موقعها على خليج أبي قير مباشرةً، حيث يصل متوسط كمية المطر الشهرى بمنطقة الدراسة أقصاه فى شهري يناير وديسمبر (٥٢ ملليمتر)، مع تركز معظم الأمطار بمنطقة الدراسة فى فصل الشتاء.

وتبلغ خطورة الأمطار على المبانى الأثرية أقصاها فى المناطق الصناعية والساحلية كما هو الحال بمواقع الحصون، ففى المناطق الصناعية تختلط الأمطار بنواتج التلوث الصناعى (الغازية – الصلبة – السائلة) وتحولها إلى أحماض ترسبها على الأسطح الحجرية، وفى المناطق الساحلية تختلط الأمطار برذاذ البحر الذى يحتوى على نسبة عالية من الأملاح الذائبة.

وتختلط مياه الأمطار بالملوثات الجوية مكونة حمض الكربونيك، وعندما تتساقط فوق مواد البناء التى تحتوى على كربونات الكالسيوم والماغنسيوم، كما هو الحال بالحجر الجيرى و"مونة" وملاط البناء، تتحول هذه الكربونات إلى بيكربونات سهلة الذوبان فى الماء(Pininska & Hemdan, 2008: S128)، إضافة إلى ما تحمله مياه الأمطار من غازات التلوث مثل ثانى أكسيد الكبريت، وثانى أكسيد النيتروجين، وثانى أكسيد الكربون فى شكل أحماض مخففة بعد امتزاجها مع مياة الأمطار، فتؤثر تأثيراً شديداً على مواد البناء المستخدمة فى الحصون.

وتسهم الأمطار فى تفكك "مونة" البناء وتساقط ملاط حوائطها، وتحرك الأساسات، وإذابة الأملاح وحملها إلى أماكن مختلفة من الجدران، ثم تبلورها عند جفاف محاليلها مؤدية إلى تقشر الكتل الحجرية وتفتت سطوحها (شكل ٨).

شكل (٨) تجمع مياه الأمطار حول حصن برج (٣)(متجهًا صوب الشمال).

ويتكون فوق أسطح العناصر المعمارية للحصون التى لم تتعرض مباشرةً لسقوط الأمطار طبقات متفاوتة فى السمك والصلادة تحتوى على مخلفات عناصر التلوث الجوى مثل (الأتربة – الرمال – حبيبات الكربون)، إضافة إلى الأملاح المتبلورة بنسب متفاوتة.

وعندما تتعرض العناصر المعمارية للحصون لسقوط الأمطار مباشرةً، لا يتكون فوق أسطحها طبقات ملحية صلبة؛ لأن مياه الأمطار تقوم بتنظيف الأسطح من المواد المترسبة فوقها، وتساعد مياه الأمطار المتسربة إلى داخل مكونات البناء " العناصر المعمارية " للحصون على زيادة المحتوى الرطوبى داخلها، مما يؤدى إلى نمو الكائنات الحية الدقيقة على أسطح وواجهات وداخل الجدران.

٢-الأملاح :

تؤثر الأملاح فى مواد البناء بأحد شكلين، إما فيزيقيًا من خلال تغير طبيعة مادة البناء، والمتمثلة فى المسامية، وامتصاص المياه، وقدرة تحمل الصخر لقوى الضغط، ويتم ذلك التغير نتيجة تبلور الأملاح أو هيدرتها أو تمددها الحراري داخل مسام الأحجار مع اختلاف حرارة الوسط المحيط بتلك الأملاح، أو كيميائيًا من خلال تحويل المواد الكربونية بالحجر إلى أملاح مثل الجبس (قمح،٢٠١١ :81).

ولا يرتبط أثر التجوية الذى يقع بفعل الأملاح بكميتها فقط، لكنه يرتبط أيضًا بعدد مرات إذابة الأملاح وتبلورها داخل مسام الأحجار التى تصاحب التغيرات اليومية فى معدلات الرطوبة النسبية فى الأجواء المحيطة، مما يؤدى إلى حدوث ضغوط تدريجية لجدران المسام تتسبب فى تشويه نسيج الحجر الحاوى لها، وللأملاح دور واضح فى تجوية جميع مواد البناء، إلا أن تأثيرها يكون أكثر وضوحًا، وأخطر مدىً فى حالة مواد البناء ذات المسامية والنفاذية العالية، كما هو الحال بمواد بناء الحصون.

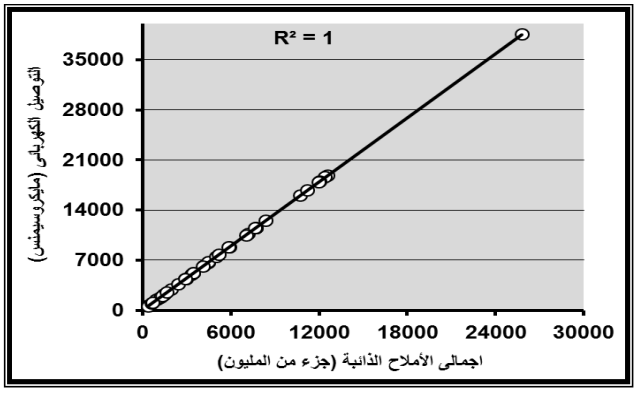
وتتباين مواد البناء المستخدمة فى بناء الحصون فى معامل استجابتها للأملاح (جدول ٣)، ولكن جميعها مستجيب للتجوية الملحية بدرجات متفاوتة، نتيجة موقع الحصون على ساحل خليج أبي قير بشكل مباشر، إضافة إلى الأملاح بالأحجار الكربونية الجيرية المبنى منها الحصون، وتعد "مونة" البناء أكثر مواد البناء استجابة للأملاح، حيث تبين أنها مستجيبة للأملاح بدرجة عالية، وقد سجل الحجر الجيرى الأبيض والطلاء الخارجى للحصون استجابة للأملاح أيضاً، وانطلاقًا من تلك القياسات تبين أن مواد البناء المستخدمة فى بناء الحصون، من المواد المستجيبة للأملاح، والتى تظهر آثارها بجميع مواقع الدراسة.

جدول (٣) معامل الاستجابة للأملاح(SSI) بمواد البناء المستخدمة بالحصون.

كود العينة	نوع العينة	معامل الاستجابة للأملاح	التفسير	المسامية الكلية (%)	التوزيع الحجمى للمسام (%)			
					٠.١-٠.٥	٠.٥-١	١ – ٢.٥	٢.٥ – ٥
T(2) -1	حجر جيرى أبيض	١٠.٣٧	مستجيب للأملاح	٢٩.٤	٢٥.١	٢٢.٥	٢٧.١	-
T(2) -2	مونة	١٢.٩	مستجيب بدرجة عالية	٣٣.٩	٣١.٣	-	١٨.٢	٢٣.٣
T(2) - 3	طلاء	٦.٧٤	مستجيب للأملاح	٤٠.٣	٤٠.٩٩	٣٩	-	-

المصدر : القياسات المعملية باستخدام جهاز الضخ الزئبقى(اقتصر التحليل على عينات برج ٢ فقط كنموذج).

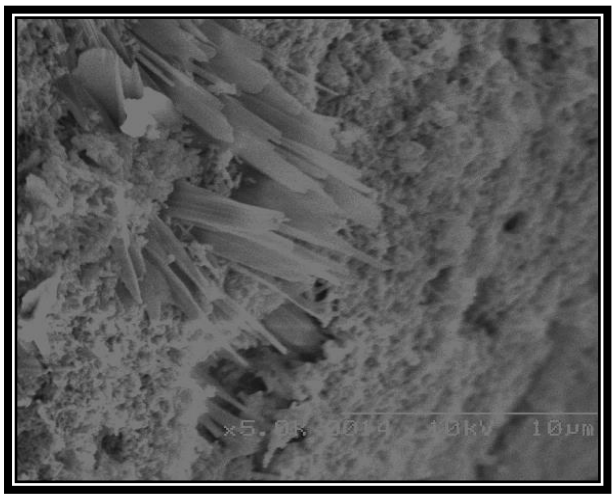
ويرتبط التوصيل الكهربائى للماء بالأملاح الذائبة فيه، إذ إنه كلما كان تركيز الأملاح فى الماء كبير، كانت قابلية الماء لنقل التيار الكهربائى أكبر، وقد أوضحت نتائج التحليل الهيدروكيميائى لعينات مواد البناء (ملحق ٢)، العلاقة بين قيم التوصيل الكهربائى، وإجمالى الأملاح الذائبة بجميع العينات المختبرة باختلاف أنواعها سواء كانت أحجار البناء الجيرية أو "المونة"، إضافة إلى طلاء البناء، واتضح أنها علاقة طردية تامة، حيث ارتفعت قيم التوصيل الكهربائى، فى ظل ارتفاع إجمالى الأملاح الذائبة، شكل(٩).



المصدر: ملحق (٢).

شكل (٩) العلاقة بين التوصيل الكهربائى، والأملاح الذائبة بعينات مواد البناء.

وتراوحت قيم التوصيل الكهربى للعينات الممثلة لمواقع الدراسة بين (٩٦٧- ١٨٥٧٠) مايكروسيمنس/ سم، في حين تراوح إجمالى الأملاح الذائبة فى العينات الممثلة لمواقع الدراسة بين (٦٤٦.٩- ١٢٤٤١.٩) جزء من المليون (ملحق ٢)، كما تبين أن أملاح الكلوريدات (تمثل ٤٧٪ من إجمالى الأملاح الذائبة)، والكبريتات (تمثل ٤٥٪ من إجمالى الأملاح الذائبة) هى أكثر الأملاح تواجداً بالعينات، وتوجد أملاح الكربونات بنسبة بسيطة، شكل (٨).



شكل (٨) إحدى عينات حصن برج (٢) – (T(2)-7)، يظهر بها جانب من المادة اللاحمة المتمثلة فى الميكروسبار المكونة للحجر الجيرى المصفر، مغطاة بطبقة من الأملاح، والتى تعرضت للتفتت الشديد بسبب تأثرها بعمليات التجوية، إضافة إلى ظهور أملاح الكبريتات الإبرية بصورة متبلورة.
المصدر:صور الميكروسكوب الالكترونى الماسح، المعامل المركزية بالهيئة العامة للمساحة الجيولوجية والثروة المعدنية، ٢٠٢٢.

ومن أهم الأملاح التى تم رصدها بالعينات كلوريد الصوديوم (الهاليت) الذى يتميز بقدرته العالية على التوصيل الحرارى. ودرجة حرارة هذا الملح عادةً تكون مرتفعة عما يحيط به من مواد البناء؛ حيث ينشأ عن ذلك خلل فى التوازن الحرارى بين الملح المترسب ومواد البناء، ويرجع هذا الخلل إلى الحرارة المتولدة نتيجة الاحتكاك الداخلى لبلورات الملح مع حبيبات تلك المواد، إضافة إلى قدرته على امتصاص جزيئات الماء من الجو عند الرطوبة النسبية المنخفضة، مما يجعل الحجر فى حالة رطبة باستمرار.

إضافة إلى ملح كبريتات الكالسيوم الذى يعد من الأملاح واسعة الانتشار فى الأحجار، ويعزي تكونه إلى ارتفاع قيم التلوث الجوى الناتجة عن المناطق الصناعية القريبة من موقع الدراسة، إضافة إلى رذاذ البحر القادم من خليج أبي قير.

٣- النباتات :

تأثرت الحصون بنمو النباتات فى التربة المحيطة بها، فتعرضت أحجار البناء والمونات وطبقات الملاط الكربوناتية للتآكل بفعل الإفرازات الحمضية والأملاح التى تفرزها خلايا الجذور، إضافة إلى تنفس كميات من ثانى أكسيد الكربون تذوب فى الماء منتجة حامض الكربونيك، الذى يتفاعل مع كربونات الكالسيوم غير الذائبة ويُحولها إلى بيكربونات الكالسيوم الذائبة (شكل ٩- أ).

وتقوم النباتات بامتصاص كميات كبيرة من المياه بالتربة المحيطة بالحصون تنقلها إلى الجدران؛ مما يؤدى إلى زيادة المحتوى المائى للجدران، كما أن هناك بعض الأحماض العضوية التى تنتج عن تحلل النباتات عندما تموت وتتحول إلى وسط ملائم لنمو الكائنات الحية الدقيقة، مما يؤدى إلى تجوية مواد البناء المختلفة (شكل ٩- ب).

شكل (٩) نمو النباتات والأحياء الدقيقة بالحصون أ- بحواصل حصن برج (٣) من الداخل(متجهاً صوب الشرق)، **ب- أحد الحوائط الداخلية للحاصل الشمالى لبرج (٣)**(متجهاً صوب الشمال الشرقى).

٤- الحيوانات والحشرات :

تستخدم الحشرات الشقوق بالحصون موطناً لها، أو تقوم بحفر جحور تمتد إلى مسافات طويلة أسفل الجدران والأساسات، مما قد يؤدي إلى اختلال توازن المبانى، وهناك حيوانات أخرى لها القدرة على تسلق الجدران، بما تحمله فى أرجلها وأجسامها من طفيليات وكائنات دقيقة تنشرها على أسطح تلك الجدران، ومع تكاثر تلك الحيوانات فى أي من المبانى، فإنها تجعل أماكنها قذرة ذات رائحة كريهة، مما يجعل تلك الأماكن ملاذاً للحشرات والكائنات الدقيقة، كما أن الحيوانات الحفارة كالكلاب وغيرها تساعد عوامل التجوية عن طريق تعريض أجزاء جديدة من الأحجار إلى السطح، وأيضاً بتهيئة مسالك سهلة لعوامل التجوية لكى يصل تأثيرها إلى ما تحت سطح الأرض (شكل ١٠-أ).

وتتسبب الحشرات فى تجوية الحصون عن طريق الأعشاش والحفر التى تقيمها على أسطحها، مما يؤدى إلى تلف وتشويه الأسطح الخارجية (شكل ١٠-ب).

ومن أهم تلك الحشرات خنفساء نخر الخشب التى تتغذى على المواد السليولوزية والألياف المكونة للخشب، وتعد إصابة الخشب بالحشرات أخطر بكثير من إصابته بالفطريات، وذلك لسرعة النخر الذى يحدث بسرعة؛ مما يؤدى إلى تلاشى الخواص الفيزيائية والميكانيكية للخشب،(شكل ١٠-ج).

شكل(١٠) أ- أحد جحور الحيوانات بحصن برج (٤) (متجهًا صوب الشرق)، **ب- أحد أعشاش الدبابير بحصن برج (٣)، متجهًا صوب الشمال، ج- آثار تلف الكتل الخشبية بالحائط الغربى للحاصل الشمالى بحصن برج (٣)**(متجهًا صوب الغرب).

ثالثًا: الآثار التدميرية للتجوية بالحصون

أصبحت الحصون الثلاثة فى ظل غياب أعمال الترميم والصيانة مجهولة وطي النسيان، وستفقد قيمتها التاريخية مع الوقت، ولن تستمر صامدة لفترة طويلة، فلا زال حصن برج (٢) محتفظًا ببعض عناصره المعمارية وخصوصاً البرج الدائرى والحواصل، لكن تهدمت أجزاء كبيرة من الحواصل، واختفت أسواره نهائيًا،(شكل ١١-أ).

وتشابه حصن برج (٣) مع حصن برج (٢) فى احتفاظه ببعض عناصره المعمارية، خاصة البرج الدائرى والحواصل، ولكن تهدمت أجزاء كبيرة من الحواصل، إضافة إلى تهدم المبنى الإضافى المبني من الطوب الأحمر، وتهدمت أجزاء كبيرة من أسواره (شكل ١١-ب).

وتهدم حصن برج (٤) ولم يتبق منه سوى بعض الأساسات التى تعطى بعض التصور عما كان عليه الحصن فى سابق عهده؛ حيث تهدم البرج الدائرى بالكامل؛ وتساقطت جدرانه على هيئة كتل حجرية كبيرة فى اتجاهات مختلفة حول الأساسات التى بنى عليها البرج، وتهدمت أجزاء كبيرة من حواصل حصن برج (٤)، ولم يتبق سوى بعض أجزاء من الجدران، التى تعطى تصور عما كانت عليه الحواصل فى سابق عهدها، ولم يتبق سوى أجزاء بسيطة من أسواره (شكل ١١ج).

شكل(١١) أ- جانب من حواصل حصن برج (٢) المتهدمة(متجهًا صوب الشمال الغربى)، **ب- حواصل حصن برج (٣) المتهدمة** (متجهًا صوب الشمال الغربى)، **ج- حواصل حصن برج (٣) المتهدمة**(متجهًا صوب الشمال الغربى).

وتم رصد الآثار التدميرية للتجوية بالحصون الثلاثة ميدانيًا، وكانت على النحو التالى :

١- تساقط الملاط :

يعد تساقط الملاط المستخدم فى تكسية الحوائط أولى آثار تعرض الحصون لعمليات التجوية، حيث تحدث تحولات طورية للحبيبات المعدنية المكونة للملاط نتيجة اختزانها لطاقة حرارية عالية من جراء تعرضها لأشعة الشمس المباشرة، ويؤدى اختلاف الملاط الخارجى للجدران فى تعامله الحرارى سواء عند اختزان الحرارة أو فقدها عن مواد البناء الداخلية إلى انفصال طبقات الملاط عن الجدران فى صورة قشور، إضافة إلى أثر الأملاح التى تتبلور فى الطبقات الخارجية لأسطح مواد البناء وطبقات الملاط عند جفاف محاليلها بالتبخر، وبتكرار هذه العملية فإنها تحدث ضغوطًا شديدة على أسطح مواد البناء وطبقات الملاط مُؤدية فى النهاية إلى تفتتها وتساقطها.

وسجلت الدراسة الميدانية لتساقط الملاط بالحصون ما يلي:

- تعرضت الواجهات الخارجية والحوائط الداخلية لحصن برج (٢) لتساقط الملاط بنسب متفاوتة نتيجة تعرضها المباشر لعوامل وعمليات التجوية بصورة مباشرة، وتعرضها لدورات متلاحقة من التجوية، مما أدى إلى انفصال الملاط الخارجى، والذى يعد أضعف مواد البناء بالحصون.

- تأثر الأجزاء السفلية من البرج الدائرى بالنصيب الأكبر من تساقط الملاط، ومرد ذلك إلى تركز المياه تحت السطحية حول أساسات البرج، والتى تنتقل بدورها إلى جدارن البرج بما تحمله من أملاح عن طريق الخاصية الشعرية مؤدية إلى ضغوط كبيرة تتسبب فى تساقط طبقات الملاط،(شكل ١٢-أ).

– استحوذت الحوائط الداخلية الشمالية والغربية للحواصل بالنسبة العظمى من تساقط الملاط، نتيجة لاستقبالها المؤثرات البحرية القادمة من خليج أبي قير بشكل مباشر، إضافة إلى تأثرها المباشر أيضاً بالمؤثرات الجوية السائدة بالموقع من حرارة ورطوبة وأمطار ورياح (شكل ١٢ب).

– تعرضت الواجهات الخارجية للبرج الدائرى لتساقط الملاط بنسب متفاوتة، حيث استأثرت الواجهتان الشرقية والجنوبية للبرج الدائرى بالنسبة العظمى من تساقط الملاط.

–لم يتبق من حصن برج (٤) سوى حواصله، والتى تعرضت واجهاتها الخارجية وحوائطها الداخلية لتساقط الملاط بنسب متفاوتة (شكل ١٢–ج).

شكل (١٢) تساقط الملاط، أ– بالحائط الشرقى بالبرج الدائرى من الخارج لحصن برج (٢) (متجهاً صوب الغرب)، **ب– بالحوائط الداخلية للحاصل الشمالى بحصن برج (٣)** (متجهاً صوب الشرق)، **ج– بالواجهة الشرقية لحواصل حصن برج (٤)** (متجهاً صوب الجنوب).

٢– التجوية التمايزية :

تتفاوت مواد البناء فى استجابتها لعمليات التجوية، فهناك أجزاء شديدة المقاومة تظل ثابتة فى مكانها فى شكل بروزات، في حين أن الأجزاء الأقل صلابة ومقاومة تستجيب بسهولة لعمليات التجوية وتتأثر بها، كما هو الحال بمونة البناء التى تتعرض لعمليات التجوية بصورة أسرع من أحجار البناء التى تظل بارزة بسطح البناء، نتيجة فقدان هذه المونة لخاصية التماسك، حيث تحولت إلى مونة هشة بمرور الوقت نتيجة تفاعلها مع عوامل التلف المختلفة، وهذا النوع من التجوية يسمى التجوية التمايزية، وتحدث نتيجة للتباين فى التركيب المعدنى واختلاف المواد اللاحمة فى مواد البناء المختلفة، وتم تسجيل الملاحظات التالية في الدراسة الميدانية:

- ظهور التجوية التمايزية بالواجهات الخارجية للبرج الدائرى بحصن برج (٢)، خاصة الواجهتان الشمالية والغربية، وبالأجزاء السفلية منهما، بسبب تأثر تلك الواجهات بالمؤثرات الجوية السائدة

بمحيط الموقع، إضافة إلى تعرض الأجزاء السفلية لدورات التجوية الملحية المتلاحقة، والتى أدت بدورها إلى تفتت "مونة" البناء وتساقطها (شكل ١٣-أ).

- تعرض الأجزاء السفلية من البرج الدائرى بحصن برج (٣) سواء من الداخل أو الخارج للتجوية التمايزية، حيث تبرز الكتل الحجرية بشكلها المميز، وذلك لتجمع المياه تحت السطحية حول أساسات البرج، ولم تظهر التجوية التمايزية بشكلها الواضح بحواصل الحصن إلا بالواجهة الغربية للحواصل، حيث وصلت قيمة التجوية التمايزية بتلك الواجهة إلى ٥٠٪ من إجمالى الواجهة (شكل ١٣-ب).

- تعرض الأجزاء المتبقية من حواصل حصن برج (٤) سواء من الداخل أو الخارج للتجوية التمايزية بنسب متفاوتة، حيث تبرز الكتل الحجرية بشكلها المميز، نتيجة تعرضها لدورات متلاحقة من التجوية (شكل ١٣-ج).

شكل (١٣) التجوية التمايزية أ- بالواجهة الغربية للبرج الدائرى بحصن برج (٢)، متجهًا صوب الشرق، **ب- بالواجهة الغربية لحواصل حصن برج (٣)**، متجهًا صوب الشرق، **ج- بالحوائط الداخلية لحواصل بحصن برج (٤)**، متجهًا صوب الشرق.

٣- التجوية المتوازية Parallel Weathering :

هو فقد منتظم للمادة الصخرية فى وضع موازٍ للسطح الأصلى للحجر، وتظهر نواتج تلك العملية فى شكل فقد راقات من سطح الحجر، أو فقد قطع من الحجر بشكل متساوٍ نتيجة تفكك مواد البناء نتيجة تآكل مونة البناء، مما يؤدى فى النهاية إلى اختلال توازن المبنى، ومن ثَم انهياره، وتظهر آثاره ميدانيًا في:

– التجوية التوازية بالأجزاء العليا للبرج الدائرى بحصن برج (٢)، نتيجة تعرضها للمؤثرات الجوية السائدة بالموقع من حرارة وأمطار ورياح، حيث استأثرت الواجهتان الشمالية والشرقية بالنسبة الأكبر منها (شكل ١٤–أ)، كما تعانى الواجهات الخارجية للحواصل من التجوية المتوازية، وخاصة الواجهة الغربية، ويبرر ذلك تسرب مياه الصرف الصناعى الخاصة بشركة راكتا للورق داخل جدران تلك الواجهة محملة بالأملاح.

– التجوية المتوازية بالأجزاء العليا للبرج الدائرى بحصن برج (٣)، وخاصة الواجهتان الشرقية والجنوبية من البرج، نتيجة تأثرها المباشر بالمؤثرات البحرية القادمة من خليج أبي قير(شكل ١٤–ب)، كما استأثرت الواجهة الغربية من الحواصل بالنصيب الأكبر من التجوية المتوازية.

-تأثر الأجزاء المتبقية من حواصل حصن برج (٤) بالتجوية المتوازية بنسب متفاوتة، نتيجة تعرضها لدورات متلاحقة من عمليات التجوية، والمرتبطة بالمياه تحت السطحية المتجمعة حول أساسات الحواصل (شكل ١٤–ج).

شكل (١٤) التجوية المتوازية أ– بالواجهة الشرقية للبرج الدائرى بحصن برج (٢)(متجهاً صوب الغرب)، **ب– بالواجهة الجنوبية للبرج الدائرى بحصن برج (٣)** (متجهاً صوب الشمال)، **ج– بالحوائط الداخلية لحواصل حصن برج (٤)** (متجهاً صوب الشمال الشرقى).

٤– التقويض السفلي :

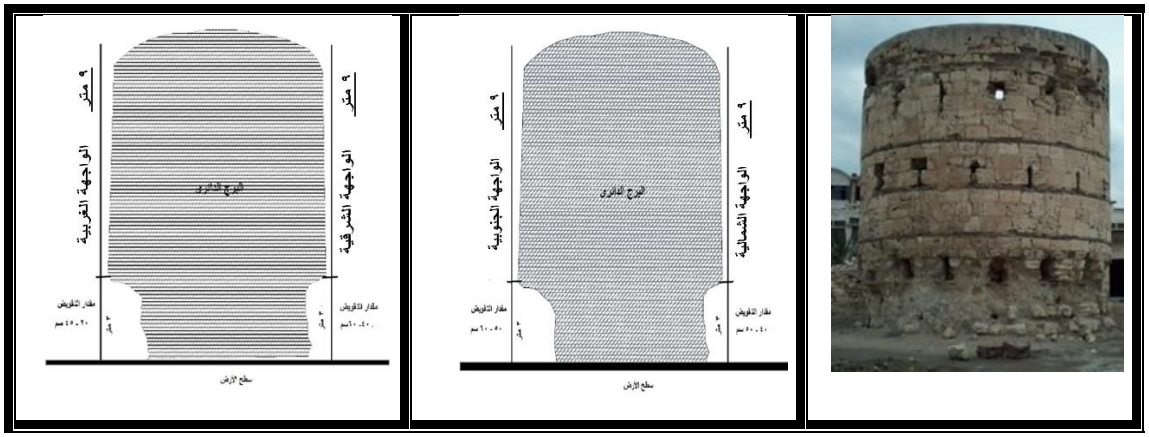
تعرضت الأجزاء السفلية بالحصون المدروسة للتقويض السفلى نتيجة تجمع المياه تحت السطحية حول أساسات المباني، حيث ترتفع بفعل الخاصية الشعرية بفعل خواص المسامية والنفاذية

لمواد البناء ولزوجة المياه وكمياتها ومنسوبها أسفل الأساسات، وينتج عن هذا السريان غسل المواد اللاحمة والحبيبات والمونة بين الكتل الحجرية، مما يؤدى إلى تفككها وتحولها إلى أجسام هشة من الداخل ضعيفة التماسك سهلة الانهيار تحت تأثير الأحمال الواقعة عليها، وقد كشفت الدراسة الميدانية عما يلي:

- ظهور التقويض السفلى في مبانى حصن برج (٢)، وإن كان البرج الدائرى أشد تأثراً من الحواصل، حيث يظهر التقويض من سطح الأرض المجاور للحواصل وحتى ارتفاع يتراوح بين (٢٥٠ – ٣٠٠ سم)، (شكل ١٥).

- تأثرت الواجهات الخارجية للبرج الدائرى بالتقويض السفلى بنسبة ١٠٪ من إجمالى الواجهات، ولكن تباينت فى مقدار تأثرها به، حيث تراوح بالواجهتين الشمالية والشرقية (٤٠–٦٠سم)، وبالواجهة الجنوبية (٥٠– ٦٠ سم)، وبالواجهة الغربية (٢٠– ٤٥سم).

- تعرض الحوائط الداخلية للبرج الدائرى للتقويض السفلى بنسبة ١٠٪ من إجمالى الحوائط، ولكن تباينت الحوائط فى مقدار تأثرها به، حيث تراوح بالحائط الشمالي (٣٠– ٥٠ سم)، وبالحائط الشرقي (٣٠ – ٤٥ سم)، وبالحائطتين الجنوبي والغربي (٣٠–٤٠ سم).



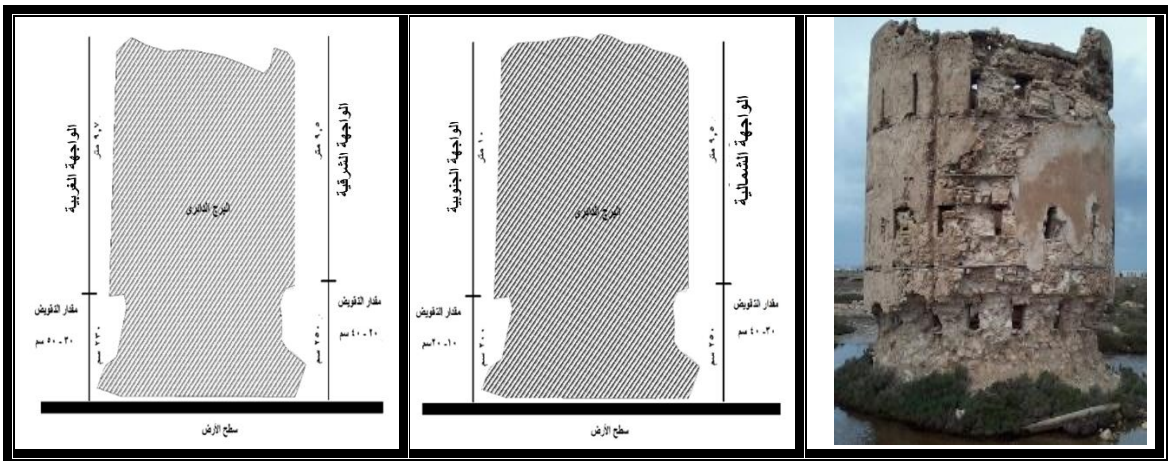
المصدر : الدراسة الميدانية.

شكل (١٥) اسكتش للتقويض السفلى بالواجهات الخارجية للبرج الدائرى بحصن برج (٢).

– بروز التقويض السفلى في مبانى حصن برج (٣)، وإن كان البرج الدائرى أشد تأثراً من الحواصل، حيث يظهر التقويض من سطح الأرض المجاور للحواصل وحتى ارتفاع يتراوح بين (٢٠٠ – ٢٥٠ سم)، (شكل ١٦).

- تأثر جميع الواجهات الخارجية للبرج الدائرى بالتقويض السفلى بنسبة ١٠٪ تقريباً من إجمالى الواجهات، ولكن تباينت الواجهات فى مقدار تأثرها به، حيث تراوح بالواجهة الشمالية بين (٣٠– ٤٠ سم)، وبالواجهة الشرقية بين(٢٠– ٤٠ سم)، وبالواجهة الجنوبية بين (١٠– ٢٠ سم)، وتراوح بالواجهة الغربية (٣٠– ٥٠ سم).

- تعرض جميع الحوائط الداخلية للبرج الدائرى للتقويض السفلى بنسبة ١٥٪ من إجمالى الحوائط تقريباً، ولكن تباينت الحوائط فى مقدار تأثرها به، حيث تراوح بالحائط الشمالي بين (١٠– ٣٠ سم)، وبالحائط الشرقي بين (١٠– ٣٠ سم)، وبالحائط الجنوبي بين (١٠– ٢٥ سم)، وبالحائط الغربي بين (١٠ – ٢٠ سم).



المصدر : الدراسة الميدانية.

شكل (١٦) اسكتش للتقويض السفلى بالواجهات الخارجية للبرج الدائرى بحصن برج (٣).

٥– تكهفات التجوية caverns Weathering:

تظهر تكهفات التجوية بالحوائط الداخلية وبالأجزاء السفلية من الحصون، نتيجة تجمع المياه تحت السطحية أسفل أساسات الحصون، والتى ترتفع بفعل الخاصية الشعرية بما تحمله من أملاح تبدأ فى التبلور على أسطح الجدران أو تحتها، مما يؤدى إلى تفتت مواد البناء وتفككها الواحدة تلو الأخرى ، كما أسهم اندماج فجوات الإذابة إلى ظهور تلك التكهفات، وتشبه فى شكلها الكهوف صغيرة الحجم (شكل ١٧).

أ– نموذج لتكهفات التجوية بالأجزاء السفلية للبرج الدائرى من الداخل بحصن برج (٢)، متجهًا صوب الشرق.	ب– نموذج لتكهفات التجوية بالبرج الدائرى من الداخل بحصن برج (٣)، متجهًا صوب الشمال الشرقى.	ج– نموذج لتكهفات التجوية بالحوائط الداخلية للحواصل بحصن برج (٤)، متجهًا صوب الجنوب الغربى.

شكل (١٧) نماذج تكهفات التجوية بحصون الدراسة.

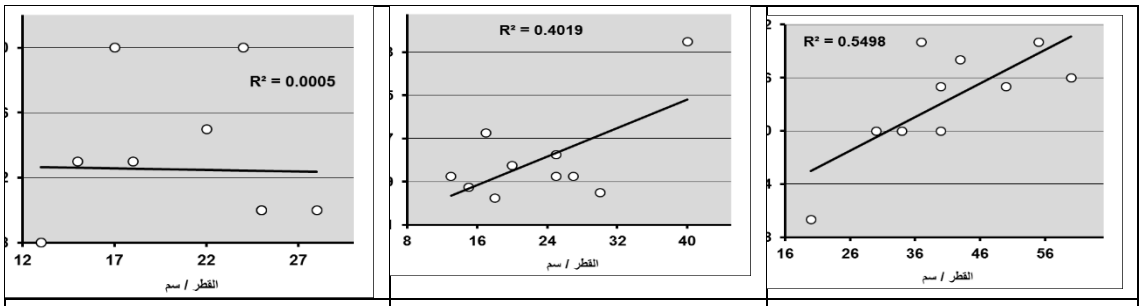
وأظهرت نتائج القياس الحقلي لنماذج تكهفات التجوية بالحصون ما يلي :

- تأثرت الحصون بتكهفات التجوية، والتى تباينت أبعادها من موقع إلى آخر، وقد يرجع ذلك إلى طبيعة الأسطح المعرضة لعوامل وعمليات التجوية، وتعرضها لدورات متلاحقة من عمليات التجوية.

– تزايد أبعاد تكهفات التجوية (الطول، والعرض، والعمق، والمحيط) في اتجاه واحد لتشابه وتجانس عوامل وعمليات توسيعها وتعميقها، نتيجة تجانس طبيعة الحجر وتركيبه بالمواضع التى تشغلها تلك الفجوات، إضافة إلى استمرار توسيع التكهفات بفعل عمليات اندماجها، واستمرار تعميقها بفعل عمليات التحلل والإذابة.

- تجانس أعماق تكهفات التجوية ومساحاتها بالواجهات المدروسة، ويفسر ذلك استمرار تعميقها بفعل عمليات التحلل والإذابة، إضافة إلى تجانس عوامل وعمليات تشكيل تلك الفجوات.

- من خلال رصد العلاقة بين عمق وقطر تكهفات التجوية بالواجهات المدروسة، يتضح انحراف القيم عن الخط المستقيم، ويدل ذلك على أثر عمليات الاندماج في الحفر، إضافة إلى عمليات الإذابة والتحلل الرأسى فى ظهور هذه التكهفات، شكل (١٨).



أ بالحائط الشرقى لبرج (٢).	ب- بالحائط الشمالى للبرج (٣)من الداخل.	ج- الحاصل الجنوبى الغربى لبرج (٤).

المصدر: ملحق (٣).

شكل (١٨) العلاقة بين عمق وقطر تكهفات التجوية.

٦- الفتات الحبيبي Granular Disintegration :

يُعــد الفتات الحبيبى أهم النواتج المميزة لفعل التجوية فى أى مكان؛ حيث إن الفعل الأساس للتجوية هو تفتيت الصخر وتحلله فى مكانه، ويحدث نتيجة انهيار الترابط بين الحبيبات المعدنية المكونة للطبقات الخارجية من أسطح الأحجار الجيرية، لاختلاف مكوناتها المعدنية فى تعاملها الحرارى تغير درجة حرارة السطح؛ حيث تتفكك هذه الحبيبات المعدنية بفعل التمدد والانكماش الذى يصاحب التغير فى درجة الحرارة، ثم سقوطها بفعل عوامل أخرى كالرياح والعواصف، وتبين من الدراسة الميدانية ظهور الفتات الحبيبى أسفل الجدران بالحصون، وتأثرت الواجهات الخارجية والحوائط الداخلية للأبراج والحواصل بالفتات الحبيبى نتيجة تأثرها بعوامل وعمليات التجوية السائدة بالموقع (شكل١٩).

شكل (١٩) الفتات الحبيبى أ- بأحد مزاغل البرج الدائرى لحصن برج (٢)، متجهًا صوب الشمال الغربى، **ب- بأحد مزاغل البرج الدائرى لحصن برج (٣)**، متجهًا صوب الغرب، **ج- بأحد الحوائط الداخلية للحواصل بحصن برج (٤)**، متجهًا صوب الجنوب الغربى.

٧- الشروخ والفواصل Cracks and Joints :

تعد الحصون من المبانى ذات الحوائط الحاملة، المبنية لتقاوم الأحمال الرأسية فقط، فحوائط الدور تبنى، ثم يوضع فوقه العروق الخشبية، ثم يبنى الدور الذى يليه، ومن ثم لا يوجد نقل عزوم بين السقف والحوائط، وعند التعرض لأحمال الزلزال تصبح هذه الحوائط أعضاء رأسية مسنودة أفقيًا فقط عند منسوب الأسقف، وعند تعرض الحوائط للإجهادات نتيجة الحركة الأفقية مهما كانت صغيرة تحدث الشروخ والفواصل الرأسية والمائلة فى الحوائط(Ismael, 2015: 15-16).

وتظهر الشروخ والفواصل بالحصون أعلى المداخل وفتحات السهام وأسفلها، ويعزى ذلك إلى التغير المفاجئ لمحتوى التربة من المياه تحت السطحية أسفل الأساسات سواء ارتفاعًا أو انخفاضًا، حيث يؤدى ذلك إلى حدوث شروخ بالمبنى، خاصة عند الفتحات والأعتاب، كما تظهر الشروخ العشوائية بالطلاء الخارجى للواجهات، نتيجة ارتفاع المحتوى الرطوبى للجدران (شكل ٢٠)، ولعل أبرز الشروخ المائلة التى تتوسط حائط الحاصل الشرقى من الداخل في حصن برج (٤) ، الذى وصل طوله إلى ١٥٠ سم.

شكل (٢٠) نماذج الشروخ أ- بالواجهة الشرقية لحواصل برج (٢)، متجهًا صوب الغرب، **ب- بالحائط الجنوبى للبرج الدائرى من الداخل برج (٣)**، متجهًا صوب الجنوب، **ج- بالحائط الشرقى للحاصل الشرقى لبقايا برج (٤)**، متجهًا صوب الشرق.

رابعًا : أساليب حماية الحصون

تؤرخ الحصون فترة تاريخية مهمة من تاريخ مصر الحديث، إلى جانب براعة تصميمها المعمارى، ولكن نتيجة إهمال أعمال الترميم والصيانة الدورية اختفت أغلب عناصرها المعمارية التى كانت عليها من قبل سواء الأسوار الداخلية أو الخارجية، إضافة إلى تهدم أجزاء كبيرة من حواصلها وأبراجها.

فالحصون فى حاجة ماسة إلى وضع خطة شاملة تتضمن أسساً لمنع مصادر التلف من التأثير فيها، وفيما يلى خطة لترميم الحصون وصيانتها تشمل كثير من العناصر، التى تضمن الحفاظ عليها أطول فترة ممكنة، على النحو التالي:

١-التوثيق الأثرى والرفع المعمارى للحصون:

تعد عملية الرفع والتوثيق للحصون من الخطوات الأولية والأساسية فى عملية الصيانة، لذا من الضرورى القيام بأعمال رفع وتوثيق دقيقة ثنائية وثلاثية الأبعاد لجميع مكونات الموقع.

٢- إجراء أعمال تنظيف عامة ودقيقة للحصون:

تقع الحصون فى منطقة مكشوفة دائمة التعرض للأتربة والملوثات الجوية المنقولة بواسطة الرياح، لذلك لابد من إجراء أعمال تنظيف عامة ودقيقة لها بصفة دورية، وتحتاج عمليات التنظيف إلى دراسة قبل اتخاذ القرار؛ لأن عمليات التنظيف الخاطئة تؤثر فى قيمة الأثر.

٣- إزالة الأملاح:

لا يعتمد اختيار الطريقة الملائمة لاستخلاص الأملاح على نوع مادة البناء، وطبيعة الأثر المراد علاجه مثل حجمه وشكله، ولكن يعتمد على نوع الأملاح، هل هى قابلة للذوبان فى الماء أم لا؟ وكذلك توزيع هذه الأملاح وانتشارها وتركيزها.

وهناك اتجاه لإمكانية استخدم بعض المركبات المانعة لنمو بللورات الأملاح، كأحد الطرق الفعالة لعلاج الأحجار وصيانتها وحمايتها من تأثير ميكانيكية التجوية الملحية.

٤- الاستكمال وإعادة البناء :

تحتاج بعض العناصر المعمارية فى الحصون إلى إعادة البناء للحفاظ عليها أطول فترة ممكنة، وقبل القيام بذلك يجب دراسة أساسات العناصر المعمارية للحصون وأسلوب بنائها، وتحليل عينات من المونة الأصلية المستخدمة فى البناء، وانتقاء مواد مناسبة لإعادة البناء.

٥-علاج مونة البناء :

تتعرض جدران مكونات الحصون لعوامل التجوية المختلفة، مما يؤدى إلى فقد المادة الرابطة " المونة " بين الحجارة للأجزاء المختلفة من الجدارن، وتصبح مفككة وقابلة للتساقط، مما يهدد باستقرار الجدارن نتيجة تساقط أحجارها مع مرور الزمن، ولذا يجب إعادة ملء الفراغات والفواصل بين الأحجار للحفاظ عليها

٦-علاج الملاط الخارجى للجدران :

تظهر على الجدران أجزاء مفقودة من طبقة الملاط وتحتاج إلى استكمال، لحمايتها من التدهور والسقوط.

٧- إزالة النباتات والحشائش :

تغطى الحشائش والنباتات الموسمية أو الدائمة حصون أبراج (٣) ، (٤)، مما يصعب معها التجول خلال الموقع والوصول إلى العديد من أجزائها، لذلك لابد من:

- دراسة وتحليل النمو النباتى لتلك الحشائش الموجودة بالحصون.
- استخدام الأساليب الميكانيكية من أزاميل وفؤوس لقطع هذه الحشائش واقتلاعها من جذورها.
- المعالجة الكيميائية لبقايا جذور هذه النباتات والحشائش.

وللحفاظ على الحصون لابد من إزالة النباتات سريعة النمو والانتشار، والتى تشكل خطراً على عناصرها المعمارية، وخاصة النباتات التى تنمو على الجدران، وتمتد جذورها بين طبقات المونة والطلاء، حيث تتم إزالتها بشكل دوري ومستمر لمنع نموها وتأثيرها على الجدران، وهناك نباتات ذات نفع عندما تكون قريبة من الجدران، حيث تعمل على امتصاص الرطوبة، لهذا يفضل الإبقاء عليها، كما يراعى أيضاً الإبقاء على النباتات المحيطة بالحصون من الخارج؛ لأنها تساعد على حماية الموقع من تأثير الرياح والرمال المتحركة.

٨- تدعيم أساسات وقواعد الحصون :

يتم تدعيم أساسات وقواعد الحصون، وذلك لعلاج تلف الأساسات وتفكك مواد بناء الأجزاء السفلية من الحوائط، فهناك بعض كتل الحجر الجيرى التالفة بأساسات وقواعد الحصون، والتى تحتاج لاستبدالها بنفس نوع الحجر، كما تحتاج الأجزاء الضعيفة من الأساسات إلى تدعيم بكتل حجرية أخرى وملء الفواصل بينها، لذلك نحتاج إلى الكشف عن أساسات الحصون، للتأكد من سلامة الأساسات واتزانها.

٩- المتابعة والصيانة الدورية للحصون :

تعد المتابعة والصيانة الدورية للعناصر المعمارية للحصون من الخطوات المهمة فى صيانتها، فأعمال الترميم والصيانة السابق ذكرها تحتاج إلى متابعة دورية للوقوف على مدى ثبات ونجاح ما تم انجازه وتسجيل حالة الموقع بين فترة وأخرى ومراقبة مظاهر التلف.

ولابد أن تسند المراقبة الدورية للموقع إلى المختصين، ويتم تقديم تقرير دوري عن حالة الموقع مزوداً بالصور بشكل دوري منتظم، ويفضل أن يتم عمل استمارة تقدم كتقرير دورى يوضع فى ملف خاص بكل موقع لتسهيل عملية المتابعة.

النتائج والتوصيات

كشفت دراسة التجوية وآثارها التدميرية بحصون سد أبي قير عن توصيات عدة، يمكن اجمالها على النحو التالى:

- اختفاء أغلب العناصر المعمارية للحصون التى كانت عليها من قبل، سواء الأسوار الداخلية أو الخارجية، إضافة إلى تهدم أجزاء كبيرة من حواصلها وأبراجها.

- تقع الحصون على شاطئ خليج أبي قير مباشرة بحيث يأخذ كل منها شكل رباعى الأضلاع يتوسطه البرج الدائري الذي يواجه البحر وتقع خلفه الحواصل، وتمثل الحصون بذلك نقاط متقدمة في مواجهة أي خطر قادم من البحر، وهو ما أدى إلى تأثرها الشديد بالعوامل البحرية نتيجة لموقعها.

- احتفظ حصنا برج (٢) و(٣) بمعظم عناصرهما المعمارية باستثناء السور الخارجي في حين تهدم برج (٤)، ولم يتبقى من عناصره سوى أساسات البرج الدائري والحواصل.

- يسود معدن الكالسيت (كبريتات الكالسيوم) على التركيب المعدنى لمادة بناء الحصون، مع وجود معادن ثانوية مثل الدلوميت والكوارتز والجبس.

- ارتفاع نسبة مسامية الصخور والأحجار المستخدمة في بناء الحصون وقدرتها الكبيرة على امتصاص المياه، ويدل عليها إنخفاض سرعة الموجات فوق الصوتية وزيادة قيم الاحتكاك الداخلى التي تشير إلى زيادة درجة تلف النسيج الداخلى لمواد البناء.

- تؤثر العوامل المناخية بشكل مباشر وغير مباشر في تجوية مواد بناء الحصون من خلال عناصر المناخ المختلفة من حرارة ورياح وأمطار، مستمده خصائصها موقع الحصون على شاطئ خليج أبي قير على البحر المتوسط.

– تؤثر الأملاح في تجوية مواد البناء في الحصون فيزيائياً من خلال تغيير طبيعة مادة البناء من حيث المسامية وامتصاص المياه، وكيميائياً من خلال تحويل المواد الكربونية إلى أملاح مثل الجبس، حيث جاءت العلاقة طردية تامة بين إجمالي الأملاح الذائبة وقيم التوصيل الكهربي للعينات.

– تسهم النباتات التي تنمو داخل الحصون وعلى جدرانها في تسريع عمليات التجوية بشقيها الميكانيكي والكميائي، كما تسهم الحشرات والقوارض في نحت الصخور وتفكيكها.

– تركت عمليات التجوية آثار عديدة في بنية الحصون تدل على مدى تأثرها بعمليات الهدم والتدمير، تتجلى فى تساقط الملاط، والتجوية التمايزية، والتجوية المتوازية، والتقويض السفلي، وتكهفات التجوية، والفتات الحبيبي، والشروخ والفواصل.

– عرضت الدراسة لعدة أساليب لحماية الحصون والحفاظ عليها من التدهور، تضم عدة خطوات للاهتمام بها تبدأ من التوثيق الأثري والرفع المعماري للحصون، وإجراء عمليات التنظيف بشكل دوري، وإزالة الأملاح والنباتات والحشائش، وترميم الأجزاء المنهارة، وعلاج مونة البناء والملاط الخارجي للجدران، وتدعيم أساسات الحصون وقواعدها، ثم أخيراً المتابعة والصيانة الدورية.

وتوصى الدراسة بعدد من التوصيات نجملها فيما يلى :

- تشكيل فريق من المختصين لدراسة حالة الحصون وتحديد أنسب الطرق لصيانتها ومتابعة ذلك بشكل دوري.
- إزالة التعديات على الحصون وأفنيتها سواء من قبل الأفراد أو المؤسسات (الشركات) بشكل فوري والبدء في ترميمها.
- استخدام أشعة الليزر، والموجات فوق الصوتية فى كشف العيوب وأعمال التنظيف وإزالة التكلسات الملحية والطبقات الملحية المترسبة على أسطح الحصون دون الإضرار بسطح الأثر.
- استخدام بعض المركبات المانعة لنمو بللورات الأملاح، كأحد الطرق الفعالة لعلاج وصيانة الأحجار وحمايتها من تأثير ميكانيكية التجوية الملحية، حيث أن استخدام مثل هذه المركبات المانعة لنمو بللورات الأملاح يعطى حماية أكبر وأطول لمواد التقوية المستخدمة لأحجار المبانى الأثرية خاصة مركبات السيليكون.
- مشاركة القطاع الخاص وهيئات المجتمع المدنى أو المؤسسات التي تقع الحصون في محيطها من مصانع وشركات في صيانتها والحفاظ عليها، ولعل أفضل مثال لذلك الحصن رقم (١) الذى يقع ضمن نطاق الكلية البحرية والتي تظهر الصورالجوية تماسك عناصره والحفاظ على مكوناته.

ملحق (١) بيانات المناخ بمنطقة الدراسة.

عناصر المناخ	يناير	فبراير	مارس	ابريل	مايو	يونيو	يوليو	أغسطس	سبتمبر	أكتوبر	نوفمبر	ديسمبر	سنوي
معدل الحرارة	١٣.٧	١٤.٣	١٦	١٨.٥	٢١.٦	٢٤.٦	٢٥.٩	٢٦.٥	٢٥.٥	٢٣.٥	٢٠	١٥.٩	20.5
درجة الحرارة الصغرى	٩.٧	١٠.٢	١١.٤	١٣.٦	١٦.٧	٢٠.٣	٢٢.١	٢٢.٥	٢١.٤	١٨.٩	١٥.٦	١١.٧	16.18
درجة الحرارة العظمى	١٧.٨	١٨.٤	٢٠.٦	٢٣.٥	٢٦.٦	٢٩	٢٩.٧	٣٠.٦	٢٩.٧	٢٨.٢	٢٤.٥	٢٠.١	24.89
المدى الحراري	٨.١	٨.٢	٩.٢	٩.٩	٩.٩	٨.٧	٧.٦	٨.١	٨.٣	٩.٣	٨.٩	٨.٤	8.72
السطوع الشمسي(ساعة)	٢٠٣.٥	٢١٠.٥	٢٢٤.٥	٢٦٣	٣٠٠	٣٣١	٣٦٢	٣٧١.٥	٣٥٩.٥	٣٢٣.٥	٢٩٠.٥	٢٣٩.٥	289.92
المطر (مم)	٥٢	٣١	٩	٢	٢	٠	٠	٠	٠	٧	٢٨	٥٢	183
الرطوبة النسبية (%)	٧٠	٧٠	٧٠	٦٥	٦٦	٦٦	٦٨	٧١	٧١	٦٩	٧٠	٧١	68.92
سرعة الرياح (عقدة)	٦.١	٦.٤	٦.٥	٦.٦	٦.٦	٥.٩	٦.٢	٦.٥	٥.٧	٥.١	٤.٥	٤.٩	5.92

درجة الحرارة: درجة مئوية

المصدر: الهيئة العامة للأرصاد الجوية، بيانات غير منشورة لمحطة الإسكندرية(٢٠٠٥-٢٠١٢).

ملحق (٢) اجمالى الأملاح الذائبة والتوصيل الكهربى بعينات مواد البناء.

الموقع	كود العينة	نوع العينة	مكان أخذ العينة	ارتفاع أخذ العينة (سم)	التوصيل الكهربى (مايكروسيمنس)	اجمالى الأملاح الذائبة (جزء فى المليون)
برج (٢)	T(2)– 1	حجر جيرى أبيض به سناج	الواجهة الشرقية للبرج الدائرى من الخارج	٢٠٠	١٨٥٧٠	١٢٤٤١.٩
	T(2)– 2	حجر جيرى أبيض به رواسب رملية	الحائط الجنوبى للبرج الدائرى من الداخل	١٢٠	٦٦٧٠	٤٤٦٨.٩
	T(2)– 3	حجر جيرى رمادى	الواجهة الشرقية لحواصل الطابية	٢٤٠	٨٨١٠	٥٩٠٢.٧
	T(2)– 4	حجر جيرى مصفر	الواجهة الجنوبية للبرج الدائرى من الخارج	١٨٠	٦٢٢٠	٤١٦٧.٤
	T(2)– 5	طوب أحمر	المبنى الإضافى من الطوب الأحمر	٢٠٠	٢١٨٥	١٤٦٤
	T(2) – 6	مونة	الواجهة الغربية للبرج الدائرى من الخارج	١٩٠	١٠٦٨٠	٧١٥٥.٦
	T(2)– 7	طلاء	الواجهة الشرقية لحواصل الطابية	١٤٠	١١٥٠٠	٧٧٠٥
برج (٣)	T(3) – 1	حجر جيرى أبيض	الواجهة الشرقية للبرج الدائرى من الخارج	٢١٠	١٦٠٢٠	١٠٧٣٣.٤
	T(3) – 2	حجر جيرى أبيض به رواسب رملية	الواجهة الغربية للبرج الدائرى من الخارج	١٥٠	١٢٤٨٠	٨٣٦١.٦

	T(3) – 3	حجر جيرى رمادى	الواجهة الشمالية للبرج الدائرى من الخارج	٥٠	١٧٩٥٠	١٢٠٢٦.٥
	T(3) – 4	حجر جيرى مصفر	الواجهة الشرقية للبرج الدائرى من الخارج	١٥٠	١٦٧٧٧	١١٢٤٠.٦
	T(3) – 5	مونة	الواجهة الشمالية للبرج الدائرى من الخارج	١٨٠	٦٧٠٠	٤٤٨٩
	T(3) –6	طلاء	الحائط الشمالى بالحاصل الشمالى من الداخل	١٥٠	٧٤٨٠	٥٠١١.٦
برج (٤)	T(4) – 1	حجر جيرى أبيض	بقايا حواصل الطابية	١٠٠	٨٧٧٧	٥٨٨٠.٥٩
	T(4) – 2	حجر جيرى أبيض به رواسب رملية		١٠٠	٥١٨٠	٣٤٧٠.٦
	T(4) – 3	حجر جيرى رمادى		١٠٠	١٤٢٠	٩٥١.٤
	T(4) – 4	حجر جيرى مصفر		١٠٠	٦١٢٠	٤١٤٥.٤
	T(4) – 5	مونة		١٠٠	٢١٧٨	١٤٥٩.٣
	T(4) - 6	طلاء		١٠٠	٩٦٧	٦٤٧.٩

المصدر: القياسات المعملية للعينات الميدانية.

ملحق(٣) الخصائص الإحصائية لبعض المتغيرات والمعاملات المورفومترية لنماذج فجوات الإذابة بطابية برج (٢).

الواجهة المدروسة / الخصائص المورفومترية	متوسط عمق الفجوة (سم)	متوسط العرض (سم)	متوسط الطول (سم)	متوسط المساحة (سم^{٢})	متوسط المحيط (سم)	متوسط نسبة الاستدارة	متوسط معامل الاندماج
الواجهة الشمالية للبرج الدائرى من الخارج	٥.٨	٣.١	٤.٤	١٣.٩	١٥	٠.٨	١.١٦
	١.٩٣	٠.٨٨	٠.٨٤	٥.٥١	٢.٨٧	٠.٠٤	٠.٠٤
	٣٣.٣	٢٨.٣	١٩.٢	٣٩.٦	١٩.١	٥.٧	٣.١
الواجهة الشرقية للبرج الدائرى من الخارج	٦	٤.٢	٥.٩	٢٨.٥	٢٠.٢	٠.٨	١.٢
	٢.٤	١.٤٠	٣.٢٨	٢٥.٦	٩.١٦	٠.٠٣	٠.٠٢
	٣٩.٣	٣٣.٣	٥٥.٦	٨٩.٨	٤٥.٤	٤.١	٢.١
الواجهة الجنوبية للبرج الدائرى من الخارج	٧.٥	٤.٢	٧.١	٣٣.٧	٢٢.٦	٠.٧	١.٢
	٣.٢٤	١.٥٥	٣.٧٥	٢٤.٥	١٠.٠٢	٠.٠٦	٠.٠٥
	٤٣.٢	٣٦.٩	٥٢.٩	٧٢.٦	٤٤.٤	٧.٨	٤.٣
الواجهة الغربية للبرج الدائرى من الخارج	٥.٦	٤.١	٥.٤	٢٣.٩	١٩	٠.٨	١.١٥
	١.٩٠	١.٥٢	١.٨٤	١٦.٣	٦.٢٠	٠.٠٤	٠.٠٣
	٣٣.٩	٣٧.٢	٣٤	٦٨.١	٣٢.٦	٥.١	٢.٨

المصدر: القياسات الميدانية.

قائمة المراجع والمصادر

أولاً: المراجع العربية:

١-أبو الريش، كوثر صبحي (٢٠١٨): أثر عمليات التجوية على الحصون الدفاعية القديمة بالجانب الجنوبي الغربي لخليج أبي قير، دراسة في الجيومورفولوجيا التطبيقية، رسالة دكتوراه غير منشورة، كلية الآداب، جامعة المنوفية.

٢-الأنصاري، مدحت سيد (٢٠١٤): أخطار التجوية الملحية على المنشآت بمدينة الإسكندرية، دراسة في الجيومورفولوجيا التطبيقية، مجلة كلية الآداب – جامعة بنها، العدد ٣٧، الجزء الثالث.

٣-البيومي، جيهان مصطفى(٢٠١٢): التجوية الملحية وأثرها على المباني والطرق في بعض المناطق المصرية، المجلة الجغرافية العربية، العدد ٦٠ جـــ ٢، الجمعية الجغرافية المصرية، القاهرة.

٤-السمني، محمد عوض (٢٠٠٦): منطقة الساحل الغربي لخليج أبي قير–دراسة جغرافية، رسالة ماجستير غير منشورة، كلية الآداب – فرع دمنهور، جامعة الاسكندرية.

٥- العوضي، حمدينه عبد القادر(١٩٩٨): مورفوديناميات شواطئ خليج أبى قير، اصدارات كلية الآداب، جامعة الاسكندرية، المجلد (٤٥).

٦-القطري، سحر محمد (١٩٩٧): المنشآت الدفاعية في مدينتي دمياط والاسكندرية في عهد أسرة محمد على، رسالة دكتوراه غير منشورة، كلية الآداب، جامعة طنطا.

٧-الكفافي، عبد الحميد السيد (٢٠٠٦): دراسات علمية تجريبية وتطبيقية في علاج وصيانة الأحجار الجيرية في بعض المباني الأثرية في مصر من التلف الميكروبيولوجي، رسالة ماجستير غير منشورة، كلية الآثار، جامعة القاهرة.

٨-جمعه، أمل محفوظ (٢٠٠٧): التحصينات الحربية بسواحل مصر الشمالية في القرن الثالث عشر الهجري/ التاسع عشر الميلادي، رسالة دكتوراه غير منشورة، كلية الأثار، جامعة القاهرة.

٩-حسن، هويدا توفيق (٢٠١٨): أخطار التجوية على هرمي هوارة واللاهون بمنخفض الفيوم، دراسة في الجيومورفولوجيا التطبيقية، الجمعية الجغرافية المصرية، سلسلة بحوث جغرافية، العدد ١١٠، القاهرة.

١٠-دويري، ضحى محمد(٢٠١٠): أثر التجوية على أشكال السطح والمعالم الأثرية والمنشآت في مناطق مختارة من مصر، رسالة ماجستير غير منشورة، كلية الآداب، جامعة عين شمس.

١١-شعلة، ماجد محمد (٢٠٠٧): نطاق الشاطئ بالمعدية – شرق الإسكندرية دراسة في الجيومورفولوجية التطبيقية، الجمعية الجغرافية الكويتية، العدد ٣٢٢، الكويت.

١٢-عبد الحكيم، أحمد البدري (2008) :دراسة مقارنة لتأثير عمليات التجوية على النقوش الصخرية التسجيلية بالصحراء الشرقية والصحراء الغربية وطرق علاجها وصيانتها تطبيقًا على المواقع المختارة، رسالة ماجستير غير منشورة، كلية الآثار، جامعة القاهرة.

١٣-عبد الفتاح، سمر أحمد (٢٠١٦): جيومورفولوجية شواطئ خليج أبي قير، رسالة ماجستير غير منشورة، كلية الآداب، جامعة الاسكندرية.

١٤-عوض، سمير أحمد& محمود، عبد المنعم أحمد (٢٠٠٧): مقدمه في علم الرسوبيات، مكتبة الأنجلو المصرية، القاهرة.

١٥-قمح، جمال محمد (٢٠١١): التجوية الملحية على المباني والأثار في بعض بلدان العالم، مطابع جامعة المنوفية.

ثانيًا: المراجع الأجنبية:

1. Fitzner, B., Heinrichs, K. and Dennis, L. B. (2002): Limestone Weathering of historical monuments in Cairo, Egypt, (Geological Society, London, Special Publications, 205, PP. 217 – 239).
2. Ismael, H., (2015): The Climate and its Impacts on Egyptian Culture Heritage: El Nadora Temple in El-Kharga Oasis, Western Desert of Egypt as a Case study, De GRUYETER, Present Environment and sustainable Development, PESD, VOL.9 No.1-35.Doi: Vol. 9, No. 1, 1-35.Doi: 10. 1515/pesd-2015-000, July.
3. Kamh, G. M. E., (2007): Petrographic, geotechnical and durability investigations of sandstone from El-Silsila Nubian quarries used for restoration, a case study. International Journal for Restoration of Buildings and Monuments, 13 (1), 39-56.
4. Kamh, G.M.E., (2017): Investigating Single and Mixed Resins for TreatingModerately Weathered Limestone of Archaeological Sites, New Applied Techniques, Earth Sciences Vol, x, No. x, 2017, pp.x-x. Doi: 10, 116481j.xxxx2017xxxxxx.
5. Pininska, J., Hemdan, E., (2008): Geomechanical study of building materials of the Hawara Pyramid (Fayoum, Egypt) GEOLOGIJA 2008 Vol. 50. Supplement.p. s126-s130, Doi: 10.2478/v/0056-008-0037-Y.

ثالثًا: المصادر:

١. الهيئة العامة للأرصاد الجوبة، بيانات غير منشورة لمحطة الإسكندرية، خلال الفترة (٢٠٠٥ -٢٠١٢)،.

٢. الهيئة المصرية العامة للمساحة (٢٠٠٦) خرائط طبوغرافية مقياس ١:٥٠٠٠٠ ، لوحة أبي قير رقم **(NH 36 M1c)**

٣. صور فضائية من موقع Google Earth.