Study of the Growth Rate of Rust Spots on Steel Surface Under the Effect of Low-Temperature Heating and Cooling in Different Media

Rama Jaabari*
Dr.Ahmad Salamah **
Dr. Rami Mansour ***

(Received 16 / 6 / 2025. Accepted 17 / 9 / 2025)

□ ABSTRACT □

This research investigates the corrosion rate on the surface of steel samples exposed to low-temperature heating and cooled in two different media (freshwater and natural seawater).

The surface of steel samples were first cleaned with a steel brush and then heated to a temperature of 125℃. They were then immediately quenched in basins containing either freshwater or natural seawater for 1 minute. After cooling, the samples were kept in laboratory conditions to monitor surface changes using visual inspection and a microscope. After Microscopic images were taken over specific time periods, the change in the area of a specific rust spot on the surface of each steel sample was calculated over time using MATLAB software, in order to determine the corrosion propagation rate.

The results showed an increase in the rate of growth of rust spots (corrosion rate) and a change in the color of rust spots formed on the steel surfaces that were heated and cooled in seawater, compared to those cooled in freshwater.

Keywords: Corrosion, Steel Samples, Rust Spot Area Change, Rust Spot Color.

Copyright **:**Latakia University journal (Formerly Tishreen) -Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

*PHD Student- Dept. of design and production Engineering - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering -Lattakia University (Formerly Tishreen) - Lattakia -Syria. rama.jaabari@tishreen.edu.sy ramajaabari87@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-6031-6713
**Associate Professor- Dept. of design and production Engineering - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Lattakia University (Formerly Tishreen) - Lattakia - Syria. salamahahmad@gmail.com
*** Professor- Dept. of Design and Production Engineering - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Lattakia University (Formerly Tishreen) - Lattakia -Syria.

دراسة سرعة نمو بقع الصدأ على سطح الفولاذ تحت تأثير التسخين لدرجة حرارة منخفضة والتبريد بأوساط مختلفة

راما جعبري *

د. أحمد سلامة **

د. رامي منصور ***

(تاريخ الإيداع 16 / 6 / 2025. قُبِل للنشر في 17/ 9 / 2025)

□ ملخّص □

تم في هذا البحث دراسة مقدار التآكل الحاصل على سطح العينات الفولاذية، المعرضة للتسخين، عند درجة حرارة منخفضة، والمبردة بوسطين مختلفين (ماء عذب، ماء بحر طبيعي).

تم تسخين العينات الفولاذية بعد تنظيف سطحها بواسطة فرشاة فولاذية عند درجة حرارة 125℃، وتم غمرها مباشرة للتبريد في أحواض تحوي ماء عذب وأخرى ماء بحر طبيعي لمدة (1 min)، ووضعت بعدها ضمن جو المخبر لمراقبة التغيرات الحاصلة على سطحها بواسطة جهاز الميكروسكوب.

وبعد أخذ الصور الميكروسكوبية، أجري حساب مقدار تغير مساحة بقعة الصدأ محددة على سطح كل عينة فولاذية مع مرور الزمن، بواسطة برنامج ماتلاب لمعرفة سرعة انتشار التآكل.

بيّنت النتائج زيادة في سرعة نمو بقع الصدأ(معدل التآكل)، وتغير لون بقع الصدأ المتشكلة على سطح العينات الفولاذية المعرضة للتسخين والمبردة بماء البحر، مقارنة بالعينة المبردة بالماء العذب.

الكلمات المفتاحية: التآكل، عينات فولاذية، تغير مساحة بقعة الصدأ، لون بقعة الصدأ.

حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)– سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

* طالبة دكتوراه - قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)– اللاذقية - سورية. rama.jaabari@tishreen.edu.sy، ramajaabari87@gmail.com

https://orcid.org/0009-0009-6031-6713

** أستاذ مساعد – قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)- اللاذقية - سورية. salamahahmad@gmail.com

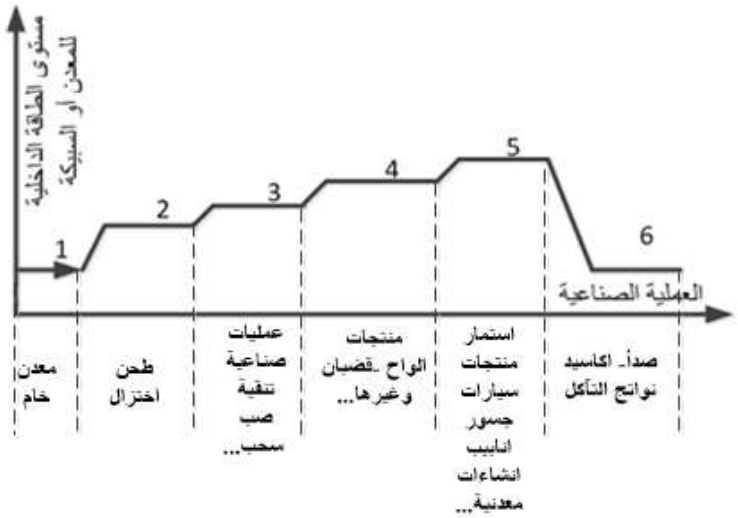
*** أستاذ – قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)- اللاذقية - سورية.

مقدمة:

حتى ستينيات القرن العشرين، كان مصطلح التآكل مقتصراً فقط على المعادن وسبائكها، ولم يتضمن السيراميك والبوليمرات، والمواد المركبة، وأشباه الموصلات. أما الآن يشمل مصطلح التآكل جميع أنواع المواد الطبيعية والمصنعة بما في ذلك المواد الحيوية والنانوية، ولا يقتصر على المعادن والسبائك وحدها [1].

يعرف التآكل بأنه تلف في المادة من خلال التفاعل الكيميائي أو الكهروكيميائي مع الوسط المحيط بها، والذي يكون في حالة تلامس مباشر معها سواء كان الهواء الجوي العادي أو أي محيط كيميائي آخر، وفي أي درجة حرارة كانت.

فالتآكل ظاهرة طبيعية لا نستطيع منعها، بل فقط تثبيطها وتقليلها والحد من آثارها السلبية، وذلك لأن المعادن والفلزات تم العثور عليها في الطبيعة كخامات، والتي عادة ما تكون على شكل أكاسيد معدنية، أو كربونات، أو كبريتيدات، طاقتها الحرة الكيميائية سالبة $\Delta G = -ve$ (أي أن الفلز يكون علي هيئة أيون موجب)، كاتيونات موجبة (تنقصها إلكترونات). ثم يتم تنقية واستخلاص الفلزات من خاماتها، وذلك بإخضاعها لعمليات اختزال بالحرارة (اعطائها طاقة)، بحيث تتخلى أيونات الفلز عن شحناتها الموجبة، وتصبح ذرات متعادلة (رغماً عنها). وبالتالي تختزن هذه الطاقة في الفلز، ويكون في وضع مثار، يخالف طبيعته، الموجود عليها أصلاً في الطبيعة، وبالتالي تكون طاقته الحرة الكيميائية موجبة $\Delta G = +ve$ (أي يكون الفلز دائماً في وضع قلق (يخالف طبيعته))، فعندما تتاح أي فرصة للفلز وذلك لكي ينتقل من الوضع الذري الفلزي غير المستقر للحالة الأيونية المستقرة التي كان عليها أصلا، من خلال وجود رطوبة أو غازات، أو أي ضغط عليه، فإنه يتفاعل مع الوسط المحيط به فوراً، ويترك الحالة الذرية الفلزية غير المستقرة ويتحول إلي الحالة الأيونية المستقرة، سواء علي هيئة أكسيد أو أي مركبات أخرى، وتتم عمليات التآكل processes corrosionكما يوضح الشكل 1. إن القوة الدافعة التي تجعل المعدن يتآكل، هي عبارة عن عملية طبيعية تعيد المعدن إلى طبيعته أي الحالة الخام [1,3].



الشكل 1. عودة المعادن الى طبيعتها (التآكل) بعد عمليات التصنيع المختلفة [1].

ولا يمكن تعريف التآكل دون الإشارة إلى البيئة. حيث تعتبر جميع البيئات مسببة للتآكل بدرجة ما، ونذكر منها: (الهواء والرطوبة، المياه العذبة والمقطرة والمالحة والبحرية، العوامل الجوية الطبيعية والحضرية والبحرية والصناعية، البخار والغازات مثل الكلور، الأحماض، القلويات، التربة).

بالنسبة للغالبية العظمى من الناس، فإن التآكل يعني الصدأ، وهو شيء مكروه عموماً. يستخدم مصطلح الصدأ مؤخراً خصيصاً لتآكل الحديد والفولاذ، في حين أن التآكل هو الظاهرة المدمرة التي تؤثر على جميع المعادن تقريباً. على الرغم من أن الفولاذ لم يكن أول معدن يستخدمه الإنسان، إلا أنه كان بالتأكيد الأكثر استخداماً، إذ يعتبر من أوائل المعادن التي واجهت مشاكل التآكل الخطيرة[2].

وبالتالي يمكن القول أن التآكل هو قوة فعّالة تدمر الاقتصاد وتستنزف الموارد وتتسبب في خسارة باهظة الثمن وغير متوقعة للمصانع والمعدات والأجهزة [1].

يحدث كل لون صدأ مختلف بسبب الشوائب الجوية، ومحتوى الرطوبة المرتفع أو المنخفض، وبيئة الأكسجين المرتفعة أو المنخفضة مع مرور الزمن. على سبيل المثال يعود السبب الرئيسي في تكوّن الصدأ الأصفر إلى البيئة ذات الرطوبة العالية على مدى فترة من الزمن، والتي تكون بشكل قطرات. بينما ينتج الصدأ البني الجاف والقشري، عن تلامس الماء والأكسجين مع بقع موضعية على أسطح المادة. أما الصدأ الأسود وهو الشكل الأكثر استقراراً، يحدث في بيئة منخفضة الرطوبة والأكسجين، تظهر بقايا الصدأ مكان بدء التفاعل، خاصة عند ملامسته للكلوريدات. وبالنسبة للعوامل المسببة للصدأ الأحمر، هي عوامل جوية وتشبه الصدأ الأسود في البيئة المحتوية على الكلوريد. يمكن للتوصيف البصري للصدأ أن يستبق الأسباب الجذرية والأدوات التحليلية للتحقق من صحتها[4].

ولتحديد دور المعالجة الحرارية على تحسين مقاومة التآكل، أجريت دراسة لتأثير تبريد الفولاذ الطري بعد إجراء المعالجة الحرارية المختلفة، وتعريضه لاحقاً لبيئة التآكل(محلول كلوريد الصوديوم)، لمراقبة سلوك تآكل المعدن، وعلى الرغم من استخدم الفولاذ الطري على نطاق واسع في المجال الهندسي، بسبب محتواه المنخفض من الكربون، وغالباً ما يكون قابلاً للسحب والتشكيل، إضافة الى خصائص القساوة، لكنه يتآكل بسهولة عند تعرضه لأوساط التآكل. حيث تم تقطيع عينات من الفولاذ الطري إلى أبعاد mm (75× 25 × 4.5) ومعالجتها بالحرارة عند درجات حرارة ℃(100 ، 300 ، 500)، وثم تبريدها بالتسقية في كل من الماء والزيت. من المتوقع أن تؤدي درجة الحرارة المطبقة على العينات إلى إنتاج بنية طورية في منطقة البيرليت، وبالتالي تحسين خصائصه. يؤثر وسط التسقية على البنية المجهرية للفولاذ الطري وقيم القساوة، بالإضافة إلى قدرات المعدن على مقاومة التآكل [5].

وبمقارنة سلوك وآلية التآكل لعينات من الفولاذ الطري بقطر 1.2 cm وطول 8.5 cm، حيث تمت دراستها لمدة خمسة أسابيع، يتخللها فاصل زمني، لأخذ الوزن، وإعادة الغمر في خمسة أوساط مختلفة وهي: (حمض الهيدروكلوريك بتركيز 0.1 M، تحت الأرض (التربة)، الغلاف الجوي، المياه المالحة، المياه العذبة). لوحظ أن الفولاذ الطري، يتآكل في البيئات المختلفة، وبكثافة متناقصة على التوالي: حمض الهيدروكلوريك تركيزه 0.1 M، تحت الأرض (التربة)، الغلاف الجوي، المياه المالحة، المياه العذبة. وتم التوصل إلى أن اختبار الغمر المخبري يبقى أفضل طريقة لفحص المعادن، والوسيلة الأسرع والأكثر ملاءمة من الناحية الاقتصادية، لتوفير اختبار أولي، لاختيار المواد المناسبة للتطبيقات الهندسية [6].

ولتصنيف درجة الضرر، الناتج عن التآكل، على سطح قطع من الفولاذ، المتعرضة للعوامل الجوية المحيطة (weathering)، تم الاعتماد على معالجة الصور الرقمية، وتبين أنه يمكن تصنيف أضرار التآكل إلى خمس درجات عن طريق الفحص البصري، وهي (تآكل متقشر على شكل طبقات رقيقة Laminated flaky corrosion، تآكل متداخل أو متراكب بشكل قشري Imbricate corrosion، تآكل غير طبيعي في المرحلة المبكرة Abnormal

corrosion of the early phase، طبقات اللمعان المنتجة Productive lust layers، في المرحلة الأولى من تكوين طبقات اللمعان lust المنتجة)، ومع ذلك فإن عملية التصنيف ذاتية ونوعية للغاية، وبالتالي تختلف النتائج باختلاف المراقبين[7].

يعد الكشف عن الصدأ في الهياكل المعدنية أمراً بالغ الأهمية، لمنع التدهور، وضمان السلامة. ويمكن تحديد مناطق الصدأ تلقائياً في الصور المأخوذة للمنشآت المعدنية، بطريقة تعتمد على معالجة الصور، باستخدام برنامج ماتلاب. حيث تتضمن المنهجية خطوات مثل تحويل الألوان، وتحسين التباين، وتقنيات التجزئة، لتحديد المناطق المتآكلة. وأظهرت النتائج أن النظام يمكنه تحديد الصدأ بدقة في مجموعة متنوعة من ظروف الإضاءة بمعدل نجاح 90٪ في اكتشاف الصدأ في الصور التي تحتوي على صدأ، ولم يتم الحصول على أي أخطاء في الصور التي لا تحتوي على صدأ [8].

ولضمان سلامة البنى التحتية مثل (السفن والهياكل البحرية والساحلية والجسور... وغيرها) يجب التنبؤ الدقيق بالتآكل على المدى الطويل، لتقليل تكاليف الصيانة وتأجيلها لأطول فترة ممكنة. في السابق كانت تلبى هذه التوقعات من خلال التصميم الأولي واتباع قواعد التصميم والسلامة (Over design)، والتي غالباً ما تكون محددة في المعايير الوطنية أو الصناعية. حيث كان من المفترض أن تضمن متوسط عمر لمعظم البنى التحتية ما بين 40 إلى 100 عام. ومع ذلك تبين أن مثل هذه الافتراضات المسبقة ليست كافية دائماً، وهناك حاجة متزايدة لتقييم سلامة وكفاءة المنشآت القائمة، وتقدير عمرها المتبقي إذا أمكن. أحد العوامل الأساسية لمثل هذه التقييمات هو توفر نموذج للتنبؤ بالتدهور المستقبلي المحتمل، بما في ذلك نماذج التآكل للفولاذ والمعادن الأخرى، في البيئات القاسية مثل البيئة البحرية والتراب. ومن نماذج التآكل مع الزمن: نموذج قانون القوة وهو الأكثر استخداماً لتوصيف التآكل المنتظم ويعتمد على معادلة رياضية ترتبط بالزمن، وله قيود كبيرة في التنبؤ طويل الأمد. والنموذج الثاني هو ثنائي الطور أو النموذج اللوغاريتمي ويعد أكثر دقة حيث يأخذ سلوك غير خطي ثم سلوك خطي طويل الأمد ويسمح بإضافة تأثير درجة الحرارة والاكسجين وسرعة الماء وهو الأكثر قدرة على التنبؤ بسلوك التآكل خاصة البيئات البحرية. ومعظم النماذج الحالية تعتمد على التجريب [9].

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث في تحديد تأثير التسخين المسبق، عند درجات حرارة منخفضة، والتبريد السريع بالماء العذب وماء البحر على سرعة زيادة مساحة بقع الصدأ المتشكلة على سطح الفولاذ.

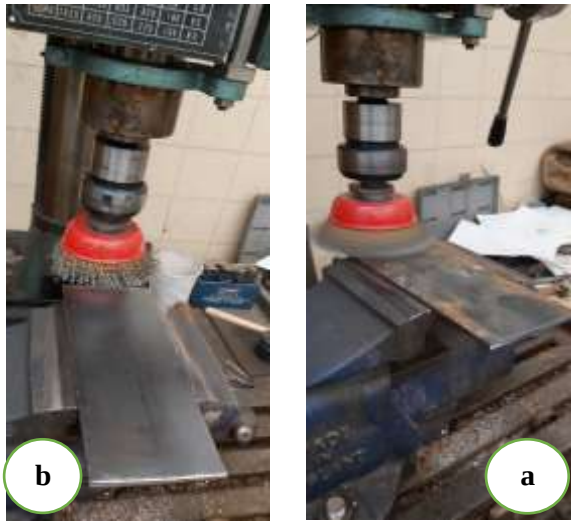
طرائق البحث ومواده:

- **المواد والتجهيزات المستخدمة في البحث:**

استخدمت عينات من الفولاذ Kst37-3 لأنه أكثر الأنواع استخداماً في الانشاءات المعدنية، ونظراً لتعدد استخداماته وخصائصه الميكانيكية الجيدة يعد الخيار الأفضل لمختلف التطبيقات، بالرغم من كونه عرضة للصدأ والتآكل، مما يؤثر على سلامته وعمره الاستثماري. والتركيب الكيميائي للفولاذ المستخدم موضح في الجدول 1. تم تنظيف أسطح العينات بواسطة فرشاة فولاذية للحصول على سطح أملس خال من وجود بقايا الصدأ، وقد تم تثبيت الفرشاة على فارزة عامودية كما هو موضح في الشكل 2.

الجدول 1. التركيب الكيميائي للفولاذ المستخدم3-Kst37 .

العنصر	Fe	C	Ni	Cr	Mn	Si	Mo	S	P
الوزن %	98.5	0.170	0.070	0.0571	0.246	0.222	0.0074	0.0400	0.0400



الشكل 2. العينة الفولاذية (a قبل الجلخ ، و b بعد الجلخ).

تم مراقبة سطح العينات بواسطة ميكروسكوب (Digital Microscope) بتكبير X 500 الموضح في الشكل 3.

الشكل 3. الجهاز الميكروسكوبي (Digital Microscope) بتكبير X 500.

تم تحليل ماء البحر الطبيعي المستخدم في الدراسة باستخدام جهاز Milwaukee، ووجد أن كمية الاملاح المنحلة بالماء هي بين %(3.79-3.9)، ونسبة Nacl المنحلة % 77.8 وذلك في g 100 من ملح مستخرج من ماء البحر.

- **طرق تحضير العينات:**

تم تحضير عينات من الفولاذ بأبعاد mm (5×80×200)، وأجري تنظيف لسطح العينات بواسطة الفرشاة الفولاذية، كما هو مبين بالشكل 2، للحصول على سطح أملس ونظيف وتستمر عملية التنظيف حتى التأكد من عدم وجود بقايا صدأ أو أوساخ على سطحها.

بعد إجراء عملية التنظيف تم وضع العينات في فرن عند درجة حرارة (125 ℃)، مع زمن ابقاء قدره ساعتين بهدف تنشيط السطح للتفاعل مع وسط التبريد دون التأثير على بنية الفولاذ، ثم تم أخذ العينات وتبريدها على الفور في وسطين مختلفين ماء عذب وماء البحر الطبيعي لمدة دقيقة. وبعدها تم وضع العينات في درجة حرارة الغرفة لمراقبة

التغيرات التي تطرأ على سطح العينات بواسطة الفحص البصري باستخدام الجهاز المبين في الشكل 3، وذلك بشكل أسبوعي خلال الشهر الأول بعد التسخين ومن ثم كل مرة واحدة كل شهر. يوضح الجدول 2 النظام الحراري المستخدم في العمل التجريبي.

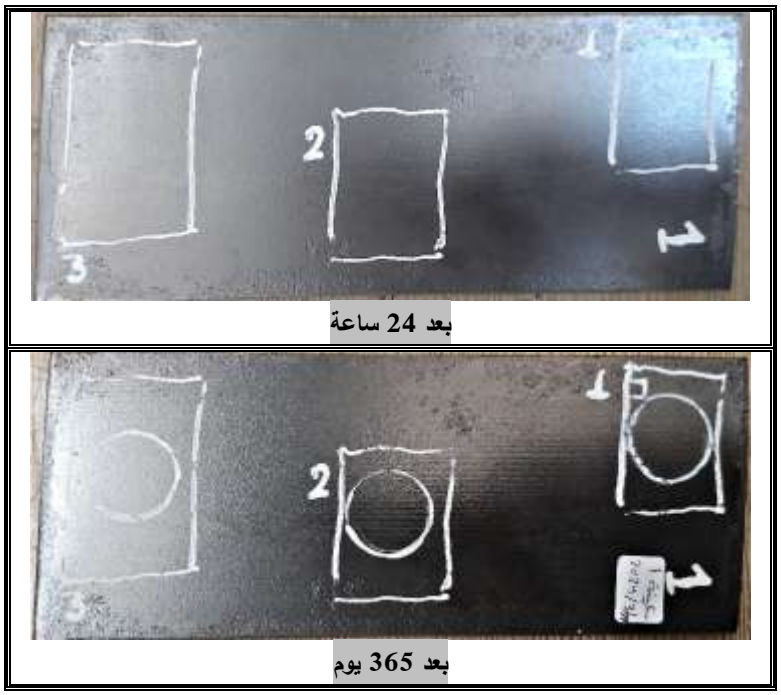
الجدول 2. نظام تحضير عينات الفولاذ المستخدمة.

رقم العينة	درجة حرارة المعالجة	مدة الإبقاء عند درجة الحرارة	وسط التبريد	تكرار التسخين
العينة 1(شاهد)	-	-	-	-
العينة 2	125°C	ساعتين	ماء عذب	-
العينة 3	125°C	ساعتين	ماء بحر	-
العينة 4	125°C	ساعتين	ماء بحر	6 مرات

النتائج والمناقشة:

يتم مراقبة التغيرات الحاصلة على سطح العينات الفولاذية لكل عينة على حدا وذلك بعد تحضيرها ووضعها في جو المخبر كما يلي:

❖ يوضح الشكل 4 العينة الفولاذية 1 التي لم تتعرض لعملية تسخين ولا للماء العذب أو ماء البحر الطبيعي، فقط تم تنظيف سطحها بنفس الآلية (بواسطة فرشاة الجلخ) ثم وضعت في جو المخبر كعينة شاهد بالنسبة لبقية العينات المدروسة.

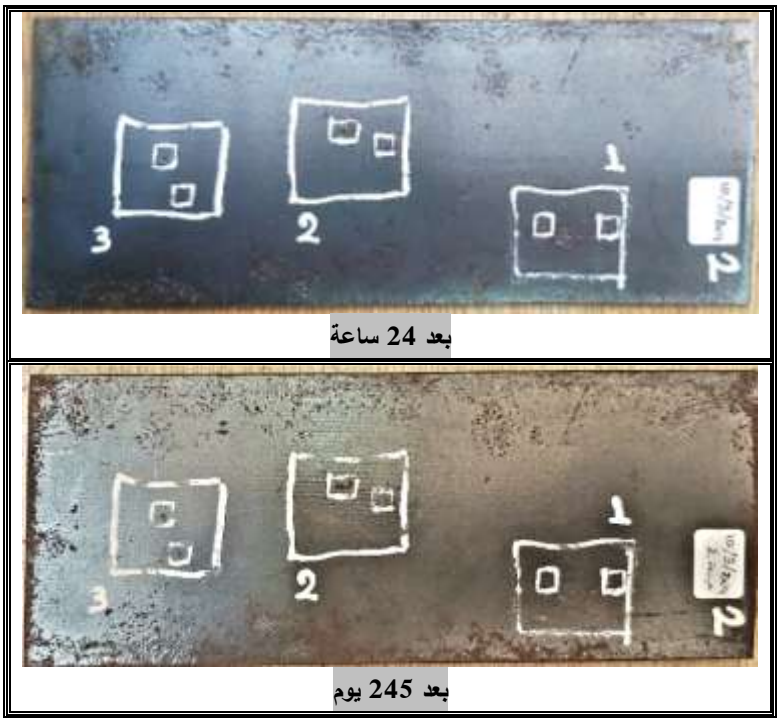


بعد 24 ساعة

بعد 365 يوم

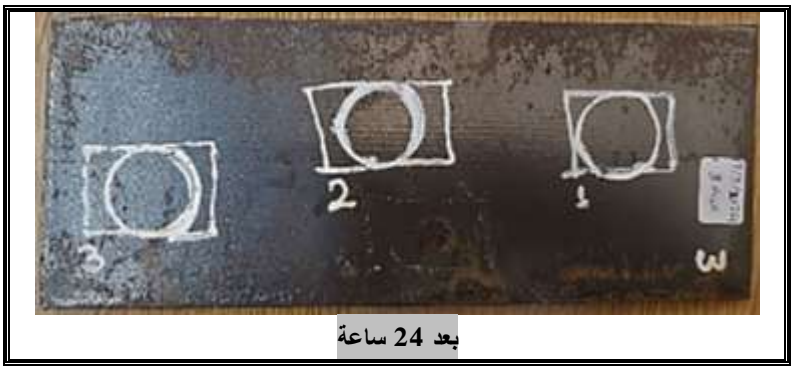
الشكل 4. صور فوتوغرافية للعينة 1 من الفولاذ Kst37-3 .

❖ يظهر الشكل 5 التغيرات الحاصلة على سطح العينة الفولاذية 2 التي تم تسخينها عند درجة حرارة 125°C وتبريدها بالماء العذب، حيث تم اختيار مناطق صغيرة محددة ضمن المربعات المرقمة (1–2–3) كما هو موضح في الشكل من أجل تكرار فحصها مع الزمن.



الشكل 5. صور فوتوغرافية للعينة 2 من الفولاذ Kst37–3.

❖ بينما يوضح الشكل 6 التغيرات الحاصلة على سطح العينة الفولاذية 3، التي تم تسخينها عند درجة حرارة 125°C ثم غمرها بأحواض تحوي ماء البحر بهدف تبريدها، وتم تحديد المناطق المدروسة في هذه العينة ضمن الدوائر المرقمة (1–2–3)، وهنا أخذ شكل الدائرة من أجل مراقبة مركزها بالإضافة الى المناطق الصغيرة المحددة على أطرافها.



بعد 245 يوم

الشكل 6. صور فوتوغرافية للعينة 3 من الفولاذ Kst37-3 .

❖ أما بالنسبة للعينة الفولاذية 4 الموضحة بالشكل 7. أجري تسخين العينة عند درجة الحرارة 125℃ لـ (6) مرات متتالية والتبريد بماء البحر، ثم التوقف بسبب حدوث تكسر في طبقة الفيلم الأكسيدية المتكونة. وتم تحديد المناطق المدروسة على سطحها بنفس الآلية المتبعة للعينة 3.

بعد 24 ساعة من التسخين الأول

بعد 24 ساعة من التسخين للمرة السادسة

بعد 257 يوم من التسخين للمرة السادسة

الشكل 7. صور فوتوغرافية للعينة 4 من الفولاذKst37-3 .

بمقارنة الصور الموجودة في الأشكال (7،6،5،4) يظهر لنا تأثير التسخين المسبق أو المتكرر على عملية التآكل (التأكسد) على سطح العينة، ويبدو أن التسخين المتكرر يساهم بشكل كبير في إحداث الأكسدة السطحية لكامل العينة أكثر بالمقارنة مع الأشكال الأخرى.

إن عمليات التآكل التي تم تحقيقها تجريبياً هي عمليات واقعية (طبيعية)، وما غاية النظام الحراري المستخدم إلاّ تسريع عمليات التآكل (كونها بالحالة الطبيعية تستغرق زمناً طويلاً)، لإجراء المراقبة البصرية.

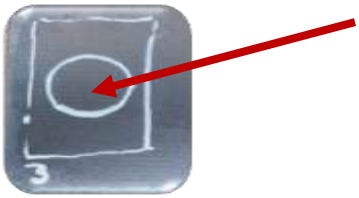
ويمكن القول استناداً إلى الأشكال السابقة الذكر أن التسخين بالدرجة ℃ 125 لـ(6) مرات قد ساهم في إجراء صدأ(أكسدة) لكامل سطح العينة كما هو مبين في الشكل 7.

ومن الأشكال السابقة نلاحظ التأثير الكبير لماء البحر على عملية التآكل الحاصل على سطح العينة، حيث يبين الشكل 5 أن تأثير الماء العذب بالمقارنة مع الشكل 7 – والذي يمثل تأثير ماء البحر – يبدو ضعيفاً وهذا ما يثبت التأثير الفعال لماء البحر على عملية التآكل.

من مراقبة السطح بالميكروسكوب و حساب مساحة بقع الصدأ لتحديد نموها مع مرور الزمن:

أظهرت العينات سمات مختلفة من حيث اللون والملمس والمظهر السطحي بعد تعرضها للتآكل، وتم مناقشة كل عينة فولاذية من خلال مراقبة بقعة تأكسد محددة تشكلت على سطحها بواسطة الميكروسكوب. وأجري حساب المساحة للبقعة المراقبة باستخدام برنامج الماتلاب، وأخيراً تم تمثيل مساحة سطح التآكل لكل بقعة مع مرور الزمن بالمخططات الموضحة لاحقاً.

❖ **العينة الفولاذية1:** تم مراقبة منطقة محددة (3) من سطح العينة 1 لاستخدامها كعينة شاهد كما هو موضح في الشكل 8.

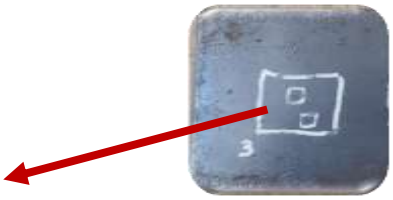


الشكل 8. مراقبة المنطقة 3 من العينة1

من خلال الصور الميكروسكوبية للبقعة المأخوذ من سطحها في مركز المنطقة 1 كما في الشكل 9، لم يلاحظ حدوث بقع صدأ واضحة ومميزة على سطح العينة الفولاذية 1 ضمن هذه المنطقة، لذلك تم وضع أول وآخر صورة تمت مراقبتها مع مرور الزمن.

الشكل 9. صور ميكروسكوبية بتكبير (500X) تظهر التغيرات الحاصلة لبقعة الصدأ في المنطقة 1 من العينة الفولاذية 1 مع الزمن.

❖ **العينة الفولاذية 2:** تم مراقبة بقعة الصدأ المتشكلة في المنطقة رقم 3 والمحددة بالمربع الصغير المشار إليه كما هو موضح في الشكل 10.

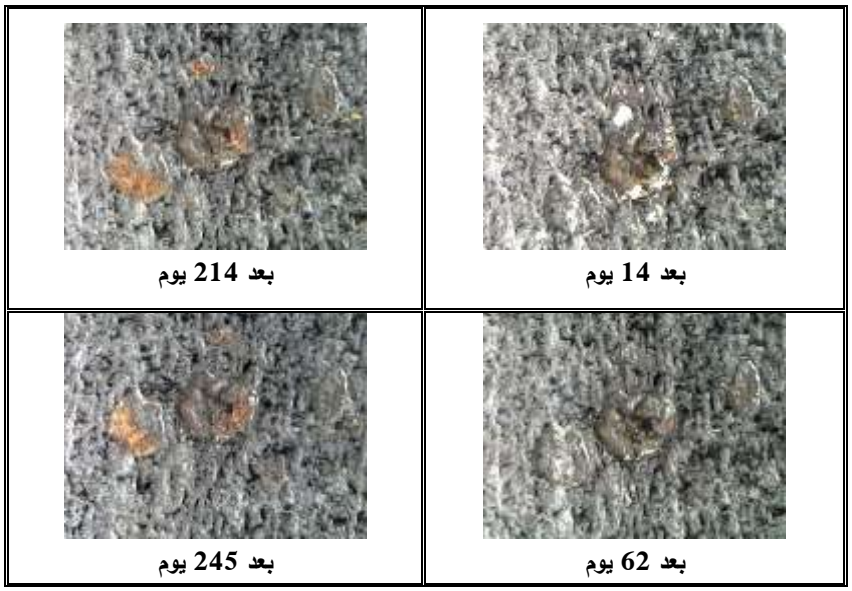


الشكل 10. مراقبة المنطقة 3 من العينة 2.

لوحظ بعد 24 ساعة من تسخين العينة الفولاذية 2 وتبريدها بالماء العذب، تشكل بقع على سطح العينة ذات لون بني فاتح جداً. حيث تمت مراقبة تطور بقعة الصدأ المتشكلة خلال فترات زمنية موضحة بالشكل 11. ووجد أن هذه البقع بعد مرور 214 يوم (حوالي 9 أشهر) بدأت تكتسب لون بني أغمق مع المحافظة على نفس الشكل للبقعة تقريباً. وسبب تدرجات اللون البني في صدأ الفولاذ المتعرض للماء العذب هو تشكل مركبات مختلفة من أكاسيد وهيدروكسيدات الحديد (مثل هيدروكسيد الحديديك $(Fe(OH)_3)$ والذي ينتج من تأكسد$(Fe(OH_2))$ ويعطي لوناً بنياً محمراً مميز للصدأ، والهيماتيت$(Fe_2\ O_3)$ والمغنيتايت (Fe_3O_4) والليبدوكروسيت$(Y-FeOOH)$ والجيوثيت $(\alpha-FeOOH)$)، وكل منها يساهم في تدرجات اللون البني، وهي تتشكل وتتحول بناءً على الظروف البيئية المحيطة مثل توافر الأوكسجين.

بعد 24 ساعة

بعد 184 يوم



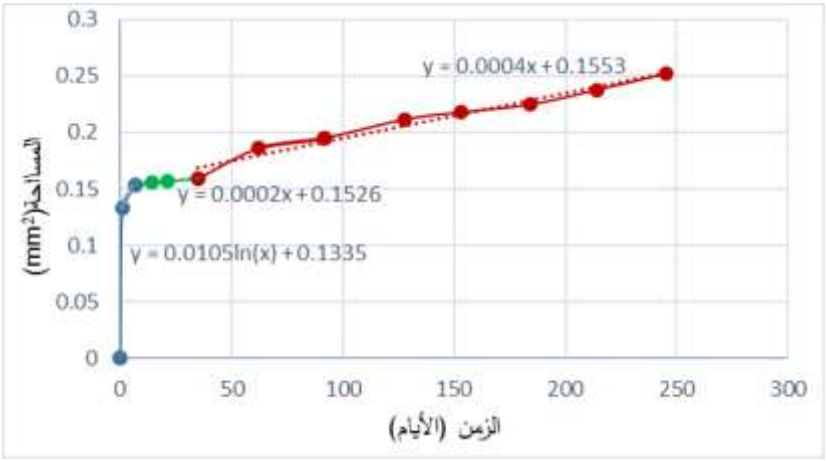
الشكل 11. صور ميكروسكوبية بتكبير (500X) تظهر التغيرات الحاصلة لبقعة الصدأ في المنطقة 3 من العينة الفولاذية 2 مع الزمن.

تم حساب المساحة المتغيرة للبقعة المدروسة مع الزمن باستخدام برنامج الماتلاب، وذلك من خلال الاستعانة بالصور الميكروسكوبية الموضحة بالشكل 11 لتحديد مدى سرعة النمو للبقعة، ويظهر الجدول 3 بعض هذه القيم:

الجدول 3. تغير مساحة بقعة الصدأ على سطح العينة الفولاذية 2 مع الزمن.

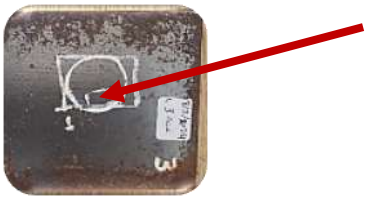
الزمن (الأيام)	المساحة (mm^2)	تغيير مساحة بقعة الصدأ مع الزمن (معدل التآكل) mm^2/day
يوم واحد (24 ساعة)	s_1 =0.133516	$\frac{\Delta s}{\Delta t_{0-7}}$ = 0.021980 تزايد لوغاريتمي
7-0	s_7=0.153861	
7-35	s_{35}=0.159137	$\frac{\Delta s}{\Delta t_{7-35}}$ = 0.00018842 شبه استقرار
35-245	s_{245}=0.251896	$\frac{\Delta s}{\Delta t_{35-245}}$ = 0.00044170 تزايد خطي

وأخيراً تم تمثيل تغير المساحة للبقعة المدروسة مقابل الزمن بالمخطط البياني الموضح في الشكل 12، حيث نجد خلال المرحلة الأولى (من 0 – 7 أيام) كان هناك تآكل سريع جداً، مما يشير لعدم تكون طبقة حماية على السطح في البداية، و بعد ذلك خلال المرحلة الثانية بين (7–35 يوم) كان هناك تباطؤ في معدل التآكل وذلك بسبب تكون طبقة أكسيد واقية على السطح، وبعدها خلال المرحلة الثالثة بين (35 –245 يوم) كانت الزيادة في مساحة البقعة صغيرة جداً وبنسب متقاربة تكاد تكون خطية مما يدل على تباطؤ كبير في معدل التآكل بسبب تكون طبقة أكسيد واقية على السطح وانخفاض الرطوبة خلال هذه الأشهر من السنة(نيسان، أيار، أيلول، تشرين الأول).



الشكل 12. تغير المساحة لبقعة الصدأ في المنطقة 3 من العينة الفولاذية 2 مقابل الزمن.

❖ **العينة الفولاذية 3:** تم مراقبة بقعة الصدأ المتشكلة في المنطقة رقم1، والمحددة بالمربع الصغير المشار إليه كما هو موضح في الشكل 13.

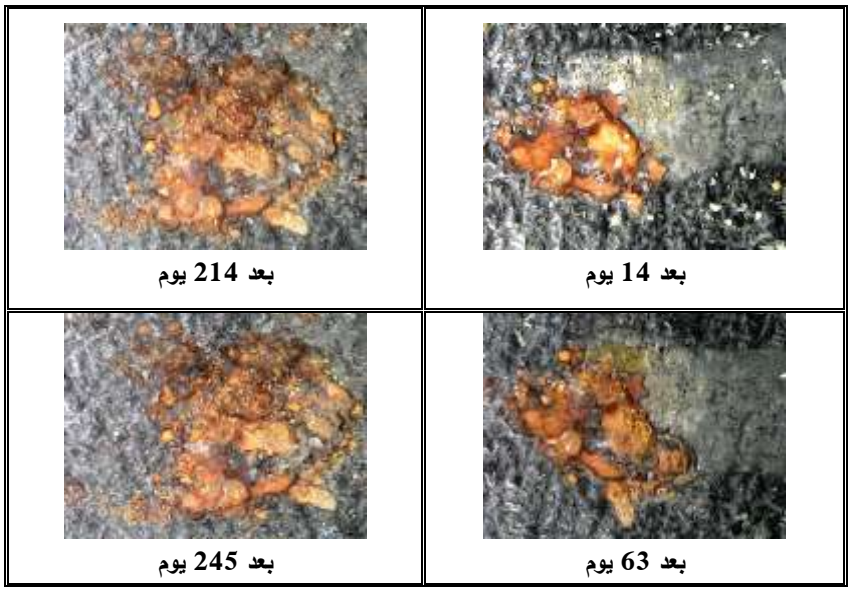


الشكل 13. مراقبة المنطقة 1 من العينة 3.

لوحظ بعد24 ساعة من تسخين العينة الفولاذية 3 وتبريدها بماء البحر وتفاعل المعدن مع أيونات الكلور، ظهور بقع من اللون الرمادي والأسود على سطحها. ثم أصبح منتج التآكل بعد أسبوعين بلون بني مصفر، وبعد 245 يوم أصبح بلون بني مصفر داكن مع وجود حفر(نقر) بنية داكنة نتيجة تقشر الطبقة الأكسيدية الرقيقة، يعود السبب في ذلك إلى التفاعل الأولي بين الفولاذ وماء البحر الغني بالأيونات خاصة أيونات الكلوريد (Cl^-)، بالإضافة لنقص الأكسجين في بعض المناطق القريبة من سطح الفولاذ، هذه الظروف تؤدي إلى تكوّن مركبات الحديد الثنائي(Fe^{+2}) مثل أكسيد الحديد الثنائي (FeO) أو هيدروكسيد الحديد الثنائي($Fe(OH)_2$)، وهي مركبات داكنة اللون(رمادي إلى أسود).

مع مرور الوقت وتعرض الفولاذ لمزيد من الأكسجين، تتحول هذه المركبات السوداء إلى مركبات حديد ثلاثي مثل أكسيد الحديد الثلاثي (Fe_2O_3) والذي يكون باللون الأحمر أو البني المألوف للصدأ. يوضح الشكل 14 مقدار التغير الحاصل في شكل ومساحة بقعة الصدأ المتشكلة على سطح العينة الفولاذية 3 مع مرور الزمن.

بعد 24 ساعة	**بعد 184 يوم**



الشكل 14. صور ميكروسكوبية بتكبير (500X) تظهر التغيرات الحاصلة لبقعة الصدأ في المنطقة 1 من العينة الفولاذية 3 مع الزمن.

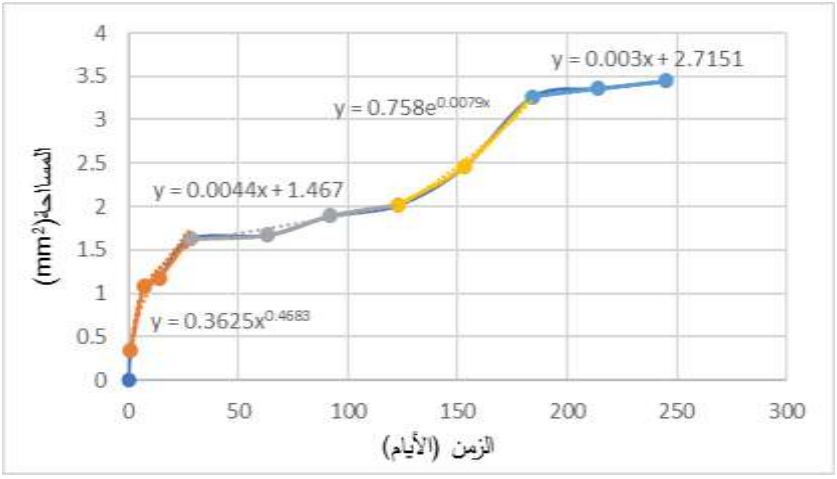
وبعد حساب المساحة المتغيرة للبقعة المدروسة مع الزمن باستخدام برنامج الماتلاب، وذلك من خلال الاستعانة بالصور الميكروسكوبية الموضحة بالشكل 14 لتحديد مدى سرعة النمو للبقعة، كان مقدار التغير الحاصل في مساحة البقعة بين أول قيمة (أي بعد24 ساعة) وآخر قيمة تم فحصها لحد الآن (أي بعد 245 يوم) كما هو موضح في الجدول4:

الجدول 4. تغير مساحة بقعة الصدأ على سطح العينة الفولاذية 3 مع الزمن.

الزمن (الأيام)	المساحة (mm^2)	تغيير مساحة بقعة الصدأ مع الزمن (معدل التآكل) $mm^2/daymm^2/day$
يوم واحد (24 ساعة)	s_1=0.340807	$\frac{\Delta s}{\Delta t_{0-28}}$ = 0.058221 تزايد أسي
28-0	s_{28}=1.630149	
123-28	s_{123}=2.021045	$\frac{\Delta s}{\Delta t_{28-123}}$ = 0.004114 تزايد خطي
184-123	s_{184}=3.264629	$\frac{\Delta s}{\Delta t_{123-184}}$ = 0.020386 تزايد أسي
245-184	s_{245}=3.447406	$\frac{\Delta s}{\Delta t_{184-245}}$ = 0.002996 تزايد خطي

وبعدها تم تمثيل مقدار التغير في المساحة مقابل الزمن بالمخطط البياني الموضح في الشكل 15، ويظهر المنحني زيادة تراكمية في التآكل مع مرور الزمن وعدم حدوثه بمعدل ثابت بل هو متغير مع مرور الزمن، فخلال المرحلة الأولى (من 0 – 28 يوم) كان هناك تآكل سريع جداً مما يشير لعدم تكون طبقة حماية على السطح في البداية، ثم حدث تباطؤ كبير في معدل التآكل خلال المرحلة الثانية بين (28 – 123 يوم) وذلك بين أشهر السنة (نيسان وأيار وحزيران) بسبب تكون طبقة أكسيد واقية على السطح و انخفاض في الرطوبة خلال هذه الأشهر، ثم نلاحظ عودة التآكل بمعدل أسرع خلال الفترة الزمنية الثالثة الممتدة بين (123 – 184 يوم) وذلك بسبب تغير الظروف البيئية المحيطة خلال أشهر(تموز وآب) مثل زيادة الرطوبة ودرجة الحرارة وتآكل أجزاء من طبقة الحماية، وبعدها خلال المرحلة الرابعة بين (184– 245 يوم) يحدث استقرار نسبي في معدل التآكل، وذلك بسبب تكون طبقة جديدة من

الأوكسيد. وهنا نجد أن التآكل يبدأ بسرعة ثم يتباطأ ويعود للزيادة مما يشير الى دورة تآكل غير مستقرة، والمنحني ليس خطياً مما يعني أن التآكل غير منتظم ويتأثر بالعوامل المحيطة والسطحية.



الشكل 15. تغير المساحة لبقعة الصدأ في المنطقة 1 من العينة الفولاذية 3 مقابل الزمن.

❖ **العينة الفولاذية 4:** تم مراقبة بقعة الصدأ المتشكلة في مركز المنطقة رقم 2 والمشار اليها، كما هو موضح في الشكل 16.

الشكل 16. مراقبة المنطقة 2 من العينة 4.

ويمكن ملاحظة مراحل تغير بقعة الصدأ، المتشكلة على سطح العينة الفولاذية 4 من الشكل 17، حيث تكوّن على سطح العينة بقع من اللون البني المصفر، وذلك بعد 24 ساعة من التسخين السادس عند الدرجة 125°C والتبريد بماء البحر. ثم أصبح منتج التآكل بعد أسبوعين من التسخين السادس بلون بني داكن محاط بلون أسود. وبعد 78 يوماً من مراقبة العينة (أي بعد 64 يوم من التسخين السادس) أصبح بلون بني مصفر داكن مع وجود حفر(نقر) بنية داكنة وسوداء وأصبحت بعدها مساحة البقعة أكبر من مجال تركيز الميكروسكوب. وهنا الأكاسيد المتكونة والتي تفسر التغيرات اللونية مشابهة للعينة الفولاذية 3 إلاّ أن تطور بقعة الصدأ كان أسرع عند التسخين المتكرر.

بعد 24 ساعة من التسخين الأول	بعد 24 ساعة من التسخين السادس

بعد 24 ساعة من التسخين الثاني	بعد 14 يوم من التسخين السادس
بعد 24 ساعة من التسخين الثالث	بعد 64 يوم من التسخين السادس
بعد 24 ساعة من التسخين الرابع	بعد 158 يوم من التسخين السادس أي(بعد 172 يوم من بداية دراسة العينة 4)
بعد 24 ساعة من التسخين الخامس	بعد 257 يوم من التسخين السادس (بعد 271 يوم من بداية دراسة العينة 4)

الشكل 17. صور ميكروسكوبية بتكبير (500X) تظهر التغيرات الحاصلة لبقعة الصدأ في المنطقة 2 من العينة الفولاذية 4.

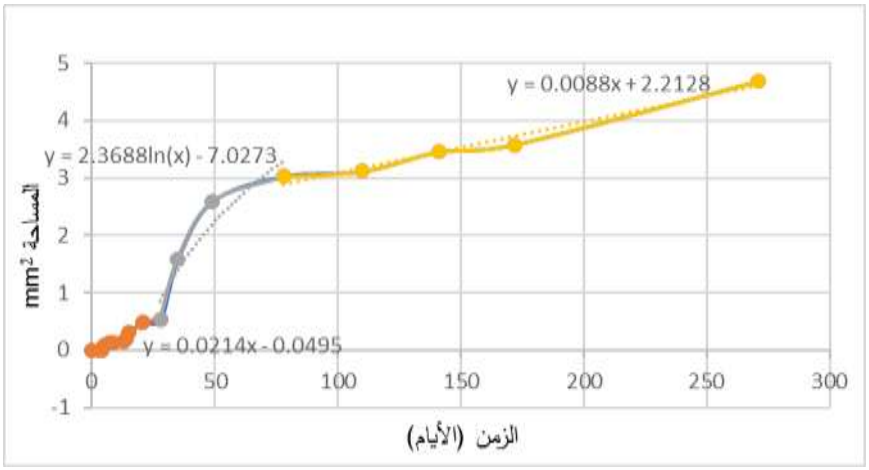
ثم أجري حساب المساحة المتغيرة للبقعة المدروسة مع الزمن، باستخدام برنامج الماتلاب، وذلك من خلال إدخال الصور الميكروسكوبية الموضحة بالشكل 17 للبرنامج، وكان مقدار التغير الحاصل في مساحة البقعة، بين أول قيمة (أي بعد24 ساعة من التسخين الثالث) وآخر قيمة تم فحصها لحد الآن (أي بعد 271 يوم)، كما هو موضح في الجدول 5:

الجدول 5. تغير مساحة بقعة الصدأ على سطح العينة الفولاذية 4 مع الزمن.

الزمن (الأيام)	المساحة (mm^2)	تغيير مساحة بقعة الصدأ مع الزمن (معدل التآكل) mm^2/day
بعد يوم واحد (24 ساعة) من التسخين الثالث	s_1=0.000861	$\frac{\Delta s}{\Delta t_{0-42}} = 0.013366$ تزايد خطي

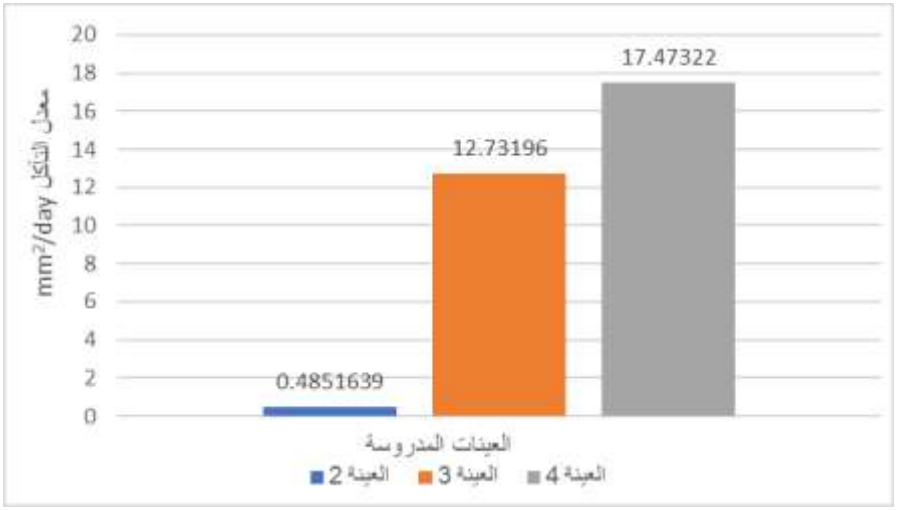
بعد 42 يوم (28 يوم من التسخين السادس)	s_{42}=0.534643	
خلال المدة الزمنية 92 -42	s_{92}=3.033008	تزايد لوغاريتمي $\frac{\Delta s}{\Delta t_{42-92}} = 0.049967$
خلال المدة الزمنية 271- 92	s_{271}=4.683686	تزايد خطي $\frac{\Delta s}{\Delta t_{92-271}} = 0.009221$

وبعد حساب المساحة للبقعة المدروسة عند كافة المراحل الزمنية التي أخذت فيها صور ميكروسكوبية، تم تمثيل مقدار التغير في المساحة مقابل الزمن، بالمخطط البياني الموضح في الشكل 18، والذي يظهر منحني متعدد الأطوار أيضاً، كما هو الحال في العينة الفولاذية 3، حيث نلاحظ في المرحلة الأولى (تآكل سريع بين 0- 42 يوماً تقريباً) تزايداً في تغير المساحة وذلك بسبب تعرض السطح لماء البحر والحرارة وعدم وجود طبقة حماية بعد، وبعدها يستمر التآكل خلال المرحلة الثانية وهي بين (42 -92 يوم تقريباً) ولكن بشكل أسرع مما يشير إلى أن التآكل كان في ذروته خلال هذه الفترة الزمنية الممتدة حتى شهر آب، نتيجة زيادة درجة الحرارة والرطوبة، أما عند المرحلة الثالثة وهي بين (92- 271) يوم كان التزايد في مساحة البقعة بنسب متقاربة جداً وأصبح المنحني خطي تقريباً وهذا يعني أن معدل التآكل أصبح بطيء جداً أو ثابت تقريباً، وذلك بسبب تكون طبقة حماية لسطح الفولاذ تفصله عن الوسط المحيط مما يؤدي إلى الحد من التآكل بشكل فعّال. وهذا المنحني مشابه للمنحني السابق (الشكل 15) أي أن التآكل غير منتظم ومتعلق بالعوامل السطحية والوسط المحيط.



الشكل 18. تغير مساحة بقعة الصدأ في مركز المنطقة 2 من العينة 4 مقابل الزمن.

من خلال مقارنة معدل التآكل الكلي للعينات الفولاذية المدروسة، والممثل بالتغير الكلي لمساحة بقع الصدأ المتشكلة على السطح، خلال كامل الفترة الزمنية التي تمت فيها مراقبة العينات$(\Delta s/\Delta t)$، نجد أن أكبر قيمة لمعدل التآكل كانت عند التسخين المتكرر والتبريد بماء البحر ($\Delta s/\Delta t_4 > \Delta s/\Delta t_3 > \Delta s/\Delta t_2$) كما هو مبين في الشكل 19.



الشكل 19. مقارنة معدل التآكل الكلي للعينات المدروسة (العينة 2 المعرضة للتسخين عند الدرجة 125 والمبردة بالماء العذب، العينة 3 المعرضة للتسخين عند الدرجة 125 و المبردة بماء البحر، والعينة 4 المعرضة للتسخين المتكرر عند الدرجة 125 عند الدرجة والمبردة بماء البحر) بالنسبة للزمن.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- زيادة مساحة بقع الصدأ مع الزمن في العينات المبردة في ماء البحر عنها في الماء العذب.
- التسخين المتكرر مع التبريد بماء البحر، أدى إلى أكبر زيادة في معدل التآكل ($\Delta s/\Delta t$) المتشكل على سطح العينات الفولاذية.
- المنحني الناتج من خلال مراقبة بقعة الصدأ المتكونة على سطح كلاً من العينتين (3، 4) المبردتين بماء البحر كان متعدد الأطوار.

التوصيات:

- دراسة تأثير زيادة درجة حرارة التسخين أعلى من 125℃ على معدل التآكل للفولاذ.
- دراسة تأثير أوساط تبريد أخرى على معدل التآكل.

References:

[1] Z.Ahmad, *principles of corrosion engineering and corrosion control*, India: Cepha Imaging Pvt. Ltd., 2006.

[2] P.R.Roberge ,*Corrosion Engineering Principles and Practice* , United States of America : McGraw-Hill Companies, 2008 .

[3] Q.K. Al-Khazraji , A. J. M. Al-Sharif. *corrosion: Its Causes, Types, and Methods of Protection Against It *, Amman: Dar Dijlah , (In Arabic), 2010.

[4] D. E. P. Klenam , M. O. Bodunrin , S.Akromah , E.Gikunoo, A.Andrews , F.McBagonluri , "Ferrous materials degradation: characterization of rust by colour – an overview ",* Researchgate *, June , 2021. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/352199286.

[5] A.O. Araoyinbo , "Low temperature heat treatment of steel and the effect of quenching on the strength and oxidation behavior" , *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, vol.42, no. (1), pp. 32-41, 2023. https://doi.org/10.22581/muet1982.2301.04

[6] CH. E. CHuka , B. O.Odio , J. L. Chukwuneke, J. E. Sinebe , "Investigation Of The Effect Of Corrosion On Mild Steel In Five Different Environment" ,*International Journal Of Scientific & Technology Research* ,Volume 3, Issue 7 ,5 p, 2014.

[7] P.Chun, K.Funatani, S.Furukawa ,M.Ohga , "Grade Classification Of Corrosion Damage On The Surface Of Weathering Steel Members By Digital Image Processing", * The Thirteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-13)*, Sapporo, Japan,7p, 2013. http://hdl.handle.net/2115/54426

[8] J.A.I. Diaz, M.I.Jr.Ligeralde ; J. A. C. Jose, A.A.Bandala , "Rust Detection using Image Processing via Matlab ", *Proc. of the 2017 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, Malaysia, , 2017, 6p. https://www.researchgate.net/publication/322214117

[9] R.E.Melchers, "Predicting long-term corrosion of metal alloys in physical Infrastructure",* Nature Patner Journals Material Degradation (npjmatdeg)* , vol. 3, no.4, 7p ,2019. **https://doi.org/10.1038/s41529-018-0066-x**