مجلة العلوم الشاملة
عدد خاص بالمؤتمر الدولي الثالث للعلوم والتقنية
المجلد (10)، العدد (37)، (نوفمبر2025)
ردمد: 3014-6266

Comprehensive Journal of Science
Volume (10), Issue (37), (NOV. 2025)
SICST2025, www.sicst.ly
ISSN: 3014-6266

دراسة معدل التآكل لعينات الحديد في ماء البحر وفعالية الطلاء المقاوم للتآكل

سعد ابراهيم بالناصر البرني[*1]، اسامة عبدالسلام خليفه القهواجي[2]،عبدالرحمن احمد عطية قويرب [3],وليد احمد اشناق [4]

[3,1] قسم تقنيات الهندسة الميكانيكية ،المعهد العالي للتقنيات الهندسية، زليتن، ليبيا

[2] قسم تقنيات الهندسة الكيميائيه، المعهد العالي للتقنيات الهندسية، زليتن، ليبيا

[4], مهندس قسم تقنيات الهندسة الكيميائيه، المعهد العالي للتقنيات الهندسية، زليتن، ليبيا

[*] **البريد الإلكتروني (للباحث المرجعي):** saad2015elburni@gmail.com

Study of the corrosion rate of iron samples in seawater and the effectiveness of corrosion-resistant coatings

Received: 30-09-2025; Revised: 10-10-2025; Accepted: 31-10-2025; Published: 25-11-2025

الملخص:

يهدف هذا البحث إلى دراسة سلوك التآكل لعينات من الحديد في بيئة بحرية طبيعية (ماء البحر) وتقييم فعالية الطلاء المقاوم كوسيلة للحد من التآكل. تم إعداد عينات حديدية مستطيلة الشكل بأبعاد متساوية (5 × 2 × 0.5 سم)، وقُسمت إلى مجموعتين: مجموعة غير مطلية، وأخرى مغطاة بطبقة واحدة من الطلاء الإيبوكسي المقاوم للتآكل. تم تنظيف العينات بالصنفرة لإزالة الشوائب والزيوت السطحية، وغُسلت وتجففت قبل بدء التجربة لضمان قياسات دقيقة.

غمرت العينات في ماء البحر الطبيعي لفترات زمنية مختلفة بلغت 720، 1440، و2160 ساعة، وسُجلت أوزان العينات قبل وبعد كل فترة لتحديد كمية المادة المفقودة نتيجة التآكل. استُخدمت هذه البيانات لحساب معدل التآكل السنوي لكل عينة باستخدام المعادلة القياسية التي تعتمد على الوزن المفقود، الكثافة، المساحة السطحية، وزمن التعرض. كما أُعدت الرسوم البيانية لتوضيح العلاقة بين الزمن وفقدان الوزن، وكذلك بين الزمن ومعدل التآكل السنوي، بهدف تحليل تطور التآكل مع مرور الوقت وفهم تأثير العوامل البيئية البحرية على المعدن.

أظهرت النتائج أن العينات غير المطلية فقدت كمية أكبر من الوزن مقارنة بالعينات المطلية، مما يعكس تأثير الرطوبة والأيونات المذابة في ماء البحر على المعدن غير المحمي. في المقابل، أبدت العينات المطلية مقاومة عالية للتآكل، حيث عمل الطلاء كحاجز فعّال منع وصول الوسط المؤكسد إلى سطح المعدن، وأدى إلى تقليل معدل فقد المادة بشكل ملحوظ خلال جميع فترات التعرض. كما أظهرت النتائج أن معدل التآكل يزداد تدريجيًا مع مرور الوقت، وهو ما يعكس الطبيعة الطردية للعلاقة بين الزمن الطلاء، سمكه، وطريقة تطبيقه للحصول على أفضل حماية ممكنة. كما توفر النتائج بيانات قيمة يمكن وعملية فقد المادة في المعدن.

تشير الدراسة إلى أهمية استخدام الطلاء المقاوم للتآكل كوسيلة حماية فعالة للقطع الحديدية في البيئات البحرية والصناعية، مع ضرورة مراعاة نوع الاستفادة منها في تصميم استراتيجيات صيانة المعدات المعدنية وتقدير العمر الافتراضي للمكونات تحت ظروف تشغيل مماثلة. بشكل عام، تؤكد الدراسة أن الطلاء المقاوم يمثل أحد الحلول العملية لتقليل التآكل وإطالة عمر المكونات الحديدية في البيئات القاسية.

الكلمات المفتاحية: التآكل، الحديد، الطلاء المقاوم، ماء البحر، معدل التآكل، الطلاء الإيبوكسي، الحماية من التآكل.

Abstract: This research aims to study the corrosion behavior of iron samples in a natural marine environment (sea water) and evaluate the effectiveness of resistant coating as a means of reducing corrosion. Rectangular iron samples of equal dimensions (5 × 2 × 0.5 cm) were prepared and divided into two groups: an uncoated group, and another covered with a single layer of corrosion-resistant epoxy coating. Samples were sanded to remove impurities and surface oils, and washed and dried before the experiment began to ensure accurate measurements.

Samples were immersed in natural seawater for different time periods of 720, 1440, and 2160 hours, and sample weights were recorded before and after each period to determine the amount of material lost as a result of corrosion. These data were used to calculate the annual corrosion rate for each sample using the standard equation based on lost weight, density, surface area, and exposure time. Graphs were also prepared to illustrate the relationship between time and weight loss, as well as between time and annual corrosion rate, with the aim of analyzing the evolution of corrosion over time and understanding the impact of marine environmental factors on the metal.

The results showed that uncoated samples lost a greater amount of weight than coated samples, reflecting the effect of moisture and ions dissolved in seawater on the unprotected metal. In contrast, the coated samples showed high corrosion resistance, as the coating acted as an effective barrier that prevented the oxidizing medium from reaching the metal surface, and significantly reduced the rate of material loss during all exposure periods. The results also showed that the rate of corrosion gradually increases over time, which reflects the direct nature of the relationship between time and the process of material loss in the metal.

The study points out the importance of using corrosion-resistant paint as an effective means of protection for iron parts in marine and industrial environments, with the need to take into account the type of paint, its thickness, and the method of its application to obtain the best possible protection. The results also provide valuable data that can be used in designing metal equipment maintenance strategies and estimating the lifespan of components under similar operating conditions. Overall, the study confirms that resistant coating represents a practical solution to reduce corrosion and extend the life of iron components in harsh environments.

Keywords: Corrosion, iron, resistant coating, seawater, corrosion rate, epoxy coating, corrosion protection.

المقدمة والدراسات السابقة:

التآكل هو عملية كيميائية أو كهروكيميائية تؤدي إلى تدهور المواد المعدنية نتيجة تفاعلها مع البيئة المحيطة، ويعد من أهم التحديات التي تواجه الصناعات الهندسية والبنية التحتية المعدنية3)،(4.

يعتبر الحديد من أكثر المعادن استخدامًا نظرًا لقوته وتوافره، لكنه عُرضة للتآكل بشكل خاص في البيئات البحرية التي تحتوي على أملاح مذابة تسرع من عملية الأكسدة(9). يؤدي التآكل إلى فقدان الوزن، ضعف الخصائص الميكانيكية، وزيادة تكاليف الصيانة والاستبدال، مما يجعل دراسة طرق الوقاية أمراً ضرورياً للحفاظ على العمر الافتراضي للمكونات المعدنية(5).

توجد العديد من طرق الحماية من التآكل، منها الحماية الكاثودية باستخدام التيارات الكهربائية، المعالجات الكيميائية لتقليل نشاط الوسط المؤكسد، والطلاءات الواقية التي تعمل كحاجز مادي يمنع التلامس المباشر بين سطح المعدن والوسط المسبب للتآكل(6،7). تُعد الطلاءات الواقية، مثل الطلاءات الإيبوكسية والبوليمرية، من أكثر الوسائل

شيوعًا وفعالية، حيث تمنع وصول الرطوبة والأيونات المؤكسدة إلى المعدن، وتقلل بذلك من معدل فقد المادة بشكل كبير(8،10). يعتمد نجاح هذه الطلاءات على نوعها، سماكتها، وطريقة تطبيقها، بالإضافة إلى طبيعة البيئة التي يتعرض لها المعدن.

أشارت الدراسات السابقة إلى أن التآكل في البيئات البحرية يتأثر بعدة عوامل، أبرزها الرطوبة، تركيز الأيونات، ودرجة الحرارة(1،2). أظهرت دراسة لـ [Smith et al., 2018]أن التعرض الطويل للأملاح البحرية يزيد من معدل فقد الحديد بشكل كبير مقارنة بالبيئات البرية المعتدلة. كما بينت أبحاث أخرى أن الطلاءات الإيبوكسية والطلاءات البوليمرية تعمل كحواجز فيزيائية فعالة تمنع وصول الرطوبة والأيونات المؤكسدة إلى المعدن، وتقليل معدل التآكل بنسبة تصل إلى 90–% 95.[Liang et al., 2020]

أظهرت دراسات متعددة أهمية اختيار نوع الطلاء وسمكه المناسب، حيث أن الطلاءات متعددة الطبقات توفر حماية أفضل مقارنة بالطبقة الواحدة(7)، إذ تعمل الطبقات الداخلية كحاجز إضافي للمواد المؤكسدة [Kumar & Singh, 2019]. كما أظهرت الأبحاث أن المعالجات السطحية المعدلة كيميائياً، مثل التنشيط بالأيونات أو استخدام الطلاءات النانوية، تعزز مقاومة المعدن للتآكل لفترات أطول .[Zhang et al., 2021] بالإضافة إلى ذلك، ربطت بعض الدراسات بين معدل التآكل وخشونة سطح المعدن، حيث أن العيوب السطحية تزيد من فرص بدء التآكل وتسرع فقد المادة[Ahmed et al., 2017] (6). وأكدت الأبحاث الحديثة أن الجمع بين الطلاءات الواقية والمعالجات الكيميائية يمكن أن يحقق حماية متقدمة، خصوصاً في البيئات البحرية القاسية التي تحتوي على أملاح وأيونات متعددة.[Patel & Mehta, 2022]

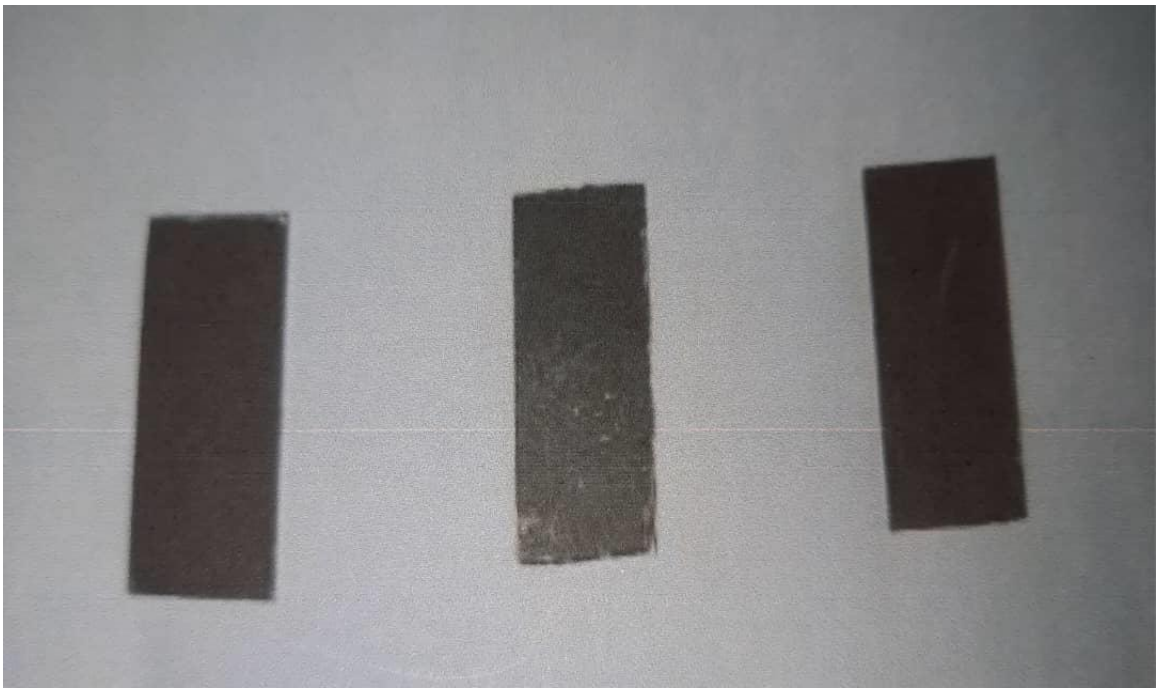
استنادًا إلى هذه الدراسات، تركز الدراسة الحالية على تقييم الطلاء المقاوم للتآكل للحد من فقد المادة في الحديد، ومقارنة فعاليته مع العينات غير المطلية عبر فترات زمنية محددة، بما يتيح استخلاص نتائج عملية قابلة للتطبيق في الصناعات البحرية والصناعية وتحسين استدامة المكونات المعدنية.

الهدف من الدراسة:

تهدف هذه الدراسة إلى قياس معدل التآكل السنوي للحديد عند تعرضه لبيئة بحرية، مع التركيز على تحديد تأثير العوامل البيئية على فقد المادة. كما تسعى الدراسة إلى مقارنة أداء العينات المطلية وغير المطلية، لتوضيح الفروق في مقاومة التآكل بينهما. بالإضافة إلى ذلك، تهدف الدراسة إلى تقييم فعالية الطلاء المقاوم كوسيلة حماية للحد من التآكل، وذلك عبر تحليل الفقد في الوزن ومعدل التآكل السنوي للعينات خلال فترات زمنية محددة. استنادًا إلى النتائج، تقدم الدراسة توصيات عملية تهدف إلى تقليل تأثير التآكل على المكونات الحديدية في البيئات البحرية والصناعية، بما يسهم في إطالة العمر الافتراضي للمعدات وتحسين استدامتها.

المنهجية :

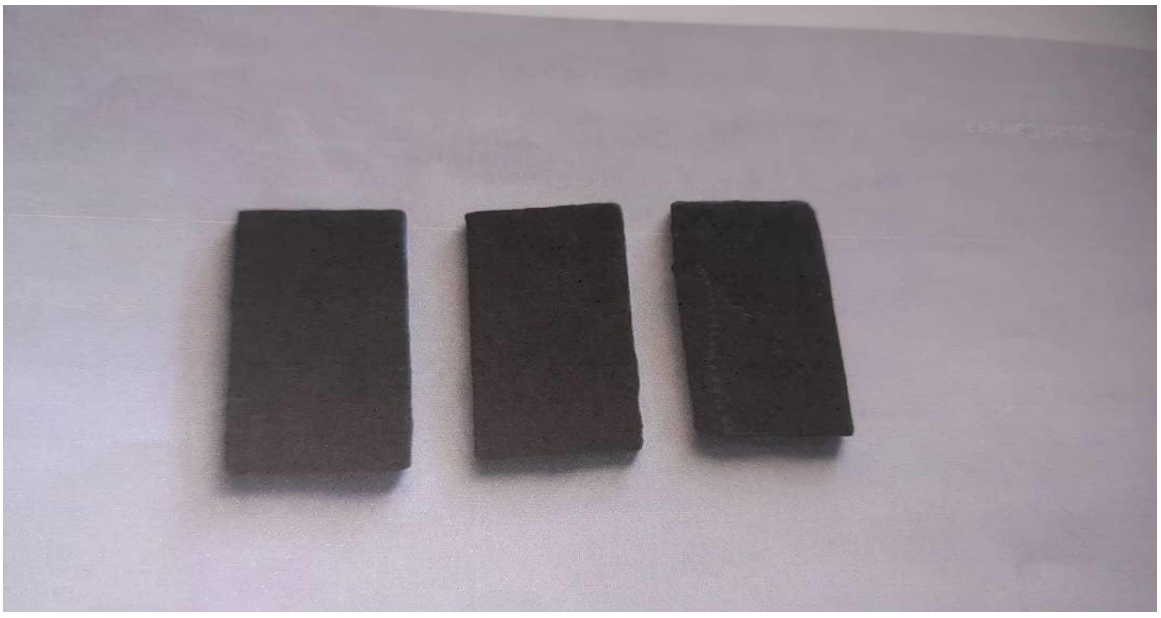
تم في هذه الدراسة استخدام عينات حديدية مستطيلة الأبعاد (5 × 2 × 0.5 سم)، مطلية بطبقة من الإيبوكسي المقاوم للتآكل، إضافة إلى ماء بحر طبيعي جُمِع من شاطئ محلي. ولضمان دقة قياسات الوزن قبل وبعد التعرض و القطع الحديدية غير المطلية قبل الغمر مبينه في الشكل رقم (1).



شكل 1 القطع الحديدية غير المطلية قبل الغمر

يبين الشكل (1) الحالة الأولية للقطع الحديدية قبل عملية الطلاء والغمر.

تم تنظيف العينات أولاً باستخدام السنفرة لإزالة الشوائب والزيوت السطحية، ثم غسلها وتجفيفها تمامًا. بعد ذلك، قُسمت العينات إلى مجموعتين: المجموعة A تضم العينات غير المطلية، والمجموعة B تشمل العينات المطلية بطبقة واحدة من الطلاء الإيبوكسي المقاوم للتآكل وهو ما يوضحه الشكل رقم (2).



شكل 2 القطع الحديدية المطلية قبل الغمر

يوضح الشكل (2) الفرق بعد تطبيق الطلاء على القطع قبل غمرها في السائل

قبل بدء التجربة، تم تسجيل الوزن الابتدائي لكل عينة لضمان الحصول على قاعدة دقيقة لمقارنة الفقد الحاصل أثناء التعرض. بعد ذلك، غمرت العينات في ماء البحر لفترات زمنية محددة بلغت 720، 1440، و2160 ساعة، وذلك لمراقبة تطور التآكل مع مرور الوقت. بعد انتهاء كل فترة، أُخرجت العينات من الماء وتم تجفيفها بعناية قبل قياس الوزن النهائي لكل عينة.

يعرض الجدول التالي زمن التعرض لكل عينة والوزن المفقود للعينات غير المطلية بعد انتهاء الفترة التجريبية. تم قياس الوزن قبل وبعد التعرض لتحديد مقدار الفقد الناتج عن التآكل، مما يتيح تقييم مقاومة العينات غير المطلية للتآكل.

جدول 1: زمن التعرض لكل عينة والوزن المفقود للعينات غير المطلية

رقم العينة	زمن التعرض (hr)	الوزن قبل التعرض(g)	الوزن بعد التعرض (g)	الوزن المفقود(g)
1	720	9.11	9.06	0.05
2	1440	9.15	9.07	0.08
3	2160	916	9.02	0.14

استُخدمت بيانات الوزن لحساب معدل التآكل السنوي لكل عينة باستخدام المعادلة القياسية التي تعتمد على الفرق بين الوزن الابتدائي والنهائي، بالإضافة إلى الكثافة، المساحة السطحية، وزمن التعرض. كما تم إعداد الرسوم البيانية لعرض العلاقة بين الزمن وفقدان الوزن، وكذلك بين الزمن ومعدل التآكل السنوي، بهدف تحليل فعالية الطلاء المقاوم بالمقارنة مع العينات غير المطلية، وفهم تطور التآكل مع مرور الوقت تحت الظروف البيئية البحرية.

تم حساب معدل التآكل السنوي باستخدام المعادلة:

$$CR = \frac{K \times \Delta W}{A \times T \times D}$$

حيث:

- CR معدل التآكل (مم/سنة)
- K ثابت التحويل (8.76×10^4)
- ΔW الوزن المفقود (غرام)
- A المساحة السطحية (سم²)
- T زمن التعرض (ساعة)
- D كثافة الحديد (7.87 غ/سم³)

يوضح الجدول التالي زمن التعرض لكل عينة والوزن المفقود للعينات المطلية بعد انتهاء الفترة التجريبية. تم قياس الوزن قبل وبعد التعرض لتحديد مقدار الفقد الناتج عن التآكل، مما يساعد على تقييم فعالية الطلاء في حماية العينات.

جدول 2: زمن التعرض لكل عينة والوزن المفقود للعينات المطلية

رقم العينة	زمن التعرض (hr)	الوزن قبل التعرض (g)	الوزن بعد التعرض (g)	الوزن المفقود (g)
1	720	9.73	9.73	0.00
2	1440	9.64	9.64	0.00
3	2160	9.73	9.71	0.02

النتائج والمناقشة :

لقد تم تحليل النتائج التجريبية المتعلقة بتأثير التعرض البيئي على القطع الحديدية، سواء كانت مطلية أو غير مطلية، من حيث فقدان الوزن ومعدل التآكل السنوي. تم قياس وزن العينات قبل وبعد فترة التعرض لتحديد مقدار الفقد الناتج عن التآكل، مع التركيز على تقييم دور الطلاء كحاجز يقلل من تأثير العوامل المؤكسدة، مثل الرطوبة والأيونات الكيميائية، على سطح المعدن.

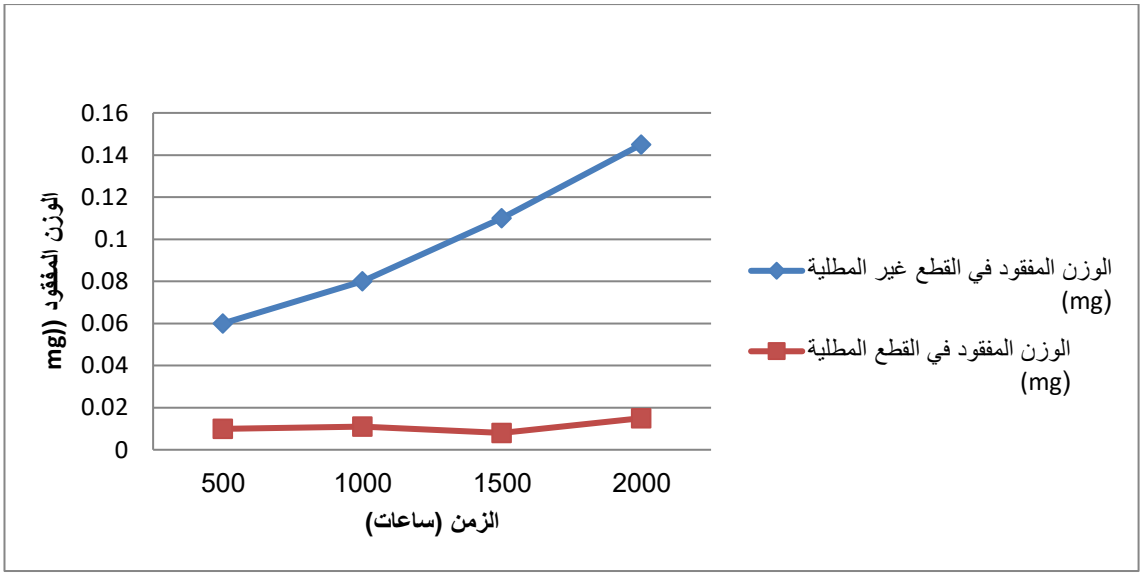
تم تحليل البيانات العددية والرسوم البيانية، التي توضح العلاقة بين الزمن وفقدان الوزن، وكذلك العلاقة بين الزمن ومعدل التآكل السنوي. يتيح هذا التحليل تفسير الظواهر التجريبية من منظور كيميائي وفيزيائي، حيث يرتبط معدل التآكل بتشكّل طبقات الأكسيد أو منتجات التآكل على سطح المعدن، والتي تؤثر على سرعة العملية مع مرور الوقت مع مقارنة أداء العينات المطلية وغير المطلية لتوضيح دور الطلاء في تأخير بداية التآكل وتقليل شدته خلال المراحل المبكرة للتعرض. تعكس هذه النتائج أهمية الطلاءات والمعالجات السطحية كاستراتيجية فعالة لحماية المكونات المعدنية، مما يساهم في إطالة العمر الافتراضي للقطع المعدنية تحت ظروف التشغيل الواقعية. كما توفر البيانات معلومات يمكن الاستفادة منها في التنبؤ بالعمر التشغيلي للمكونات المعدنية وتحديد أساليب الحماية الأمثل ضد التآكل.

يعرض الجدول التالي القيم المحسوبة لمعدل التآكل السنوي لكل عينة، استنادًا إلى الوزن المفقود وزمن التعرض. تساعد هذه البيانات على مقارنة أداء العينات المختلفة من حيث مقاومة التآكل تحت الظروف التجريبية.

جدول 3: قيم معدل التآكل السنوي وزمن التعرض والوزن المفقود لكل عينة

رقم العينة	معدل التاكل السنوي mm/year *10^-8	الزمنHr	الوزن المفقودMg
1	8-^10*5.724	720	0.05
2	8-^10*4.55	1440	0.08
3	8-^10*5.31	2160	0.14
4	0	720	0
5	0	1440	0
6	9-^10*7.15	2160	0.02

يوضح الشكل (3) العلاقة بين الوزن المفقود للعينات والزمن بالساعات خلال فترة التعرض للظروف البيئية. تبين من المخطط أن أعلى فقد في الوزن سجل في الشهر الثالث لكل من القطع المطلية وغير المطلية، مما يعكس زيادة عملية التآكل مع استمرار التعرض للوسط المحيط. هذا الارتفاع في فقد الوزن يتوافق مع النتائج السابقة لمعدل التآكل السنوي، حيث تشير البيانات إلى أن معدل التآكل يزداد بمرور الوقت، مما يؤكد الطبيعة الطردية للعلاقة بين الزمن ومعدل التآكل وفقد المادة.

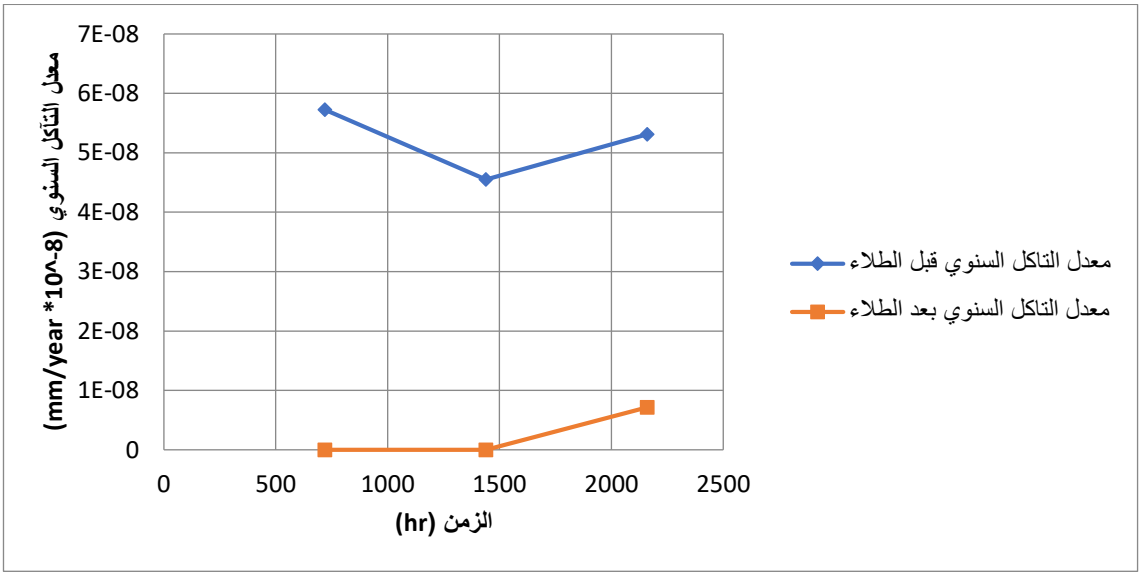


شكل 3: العلاقة بين الوزن المفقود والزمن بالساعات

من الملاحظات المهمة أن القطع غير المطلية بدأت تفقد الوزن منذ الشهر الأول، في حين أن القطع المطلية لم تتأثر تقريباً خلال الشهرين الأول والثاني. يعكس هذا الفرق دور الطلاء كحاجز وقائي يمنع وصول العوامل المؤكسدة، مثل الرطوبة والأيونات الكيميائية، إلى سطح المعدن، وبالتالي يقلل من معدل فقد المادة في المراحل المبكرة. ومع مرور الوقت، ومع تراكم العوامل المسببة للتآكل، يبدأ المعدن غير المحمي في التآكل بوتيرة أسرع، بينما الطلاء يبطئ العملية ويؤخر وصول الوسط المسبب للتآكل إلى المعدن الأساسي.

يمكن تفسير هذه النتائج علمياً من خلال التفاعلات الكهروكيميائية للتآكل: في البداية، يكون سطح المعدن نظيفاً نسبيًا، لذلك تكون عملية فقد المادة محدودة، بينما تراكم الأكسيد أو منتجات التآكل غير المتماسكة يتيح للعوامل المؤكسدة الوصول إلى المعدن مع مرور الزمن، مما يزيد من فقد الوزن ومعدل التآكل. هذه النتائج تؤكد فعالية الطلاءات والمعالجات السطحية كاستراتيجية لحماية المكونات المعدنية، حيث تقلل من فقد المادة وتساهم في إطالة العمر الافتراضي للقطع المعدنية تحت ظروف التشغيل الواقعية.

بين المخطط البياني في الشكل (4) ، العلاقة بين معدل التآكل السنوي والزمن بالساعات، حيث أظهرت البيانات أن معدل التآكل يزداد بشكل تدريجي مع مرور الوقت، ووصل إلى أعلى قيمة له في الشهر الثالث من فترة التعرض. هذا يشير بوضوح إلى أن العلاقة بين الزمن ومعدل التآكل علاقة طردية: كلما طالت فترة التعرض، ارتفع معدل التآكل.



شكل 4: العلاقة بين معدل التآكل السنوي والزمن بالساعات

عند تحليل النتائج إحصائياً، تبين أن هناك ارتباطاً قوياً بين الزمن ومعدل التآكل، حيث أظهر معامل الارتباط (R) قيمة مرتفعة تشير إلى أن التغير في الزمن يفسر معظم التغير في معدل التآكل. ويعني ذلك أن الزمن عامل مؤثر جداً في هذه العملية، وأن تأثيره ليس عشوائياً بل يتبع نمطاً واضحاً.

من الناحية الفيزيائية، يمكن تفسير ذلك بأن المعدن في بداية التعرض يكون سطحه نظيفاً نسبياً، فيبدأ التآكل بوتيرة بطيئة. ومع مرور الوقت، تتشكل طبقات من الأكسدة أو منتجات التآكل على السطح، وغالباً ما تكون هذه الطبقات غير متماسكة أو متشققة، مما يسمح للعوامل المسببة للتآكل بالوصول إلى مناطق جديدة من المعدن، وبالتالي تزداد مساحة التفاعل النشطة ويزداد معدل التآكل.

كما أن استمرار التعرض لعوامل بيئية مثل الرطوبة، وتغيرات الحرارة، ووجود أيونات أو ملوثات كيميائية في الوسط المحيط، يمنح هذه العوامل مزيداً من الوقت للتفاعل مع السطح المعدني، ما يؤدي إلى تسارع واضح في معدل التآكل بمرور الوقت. هذه النتيجة تحمل أهمية عملية، إذ تساعد على التنبؤ بالعمر التشغيلي للمكونات المعدنية

تحت ظروف تشغيل مماثلة، وتشير إلى ضرورة استخدام أساليب حماية فعالة، مثل الطلاءات المقاومة أو المعالجات السطحية، لإبطاء هذه العملية.

التفسير الفيزيائي والميكانيكي للاتجاهات:

انطلاقًا من النتائج العملية التي تم الحصول عليها، يمكن تحليل السلوك الفيزيائي والميكانيكي لعملية التآكل من خلال مقارنة العلاقة بين الوزن المفقود والزمن من جهة، وبين معدل التآكل السنوي والزمن من جهة أخرى. هذا التحليل يتيح فهماً أعمق لآلية التآكل ومدى فعالية الطلاء في تقليل معدلاته، وبالتالي يمكن صياغة الاستنتاجات الرئيسة على النحو التالي:

1. **الوزن المفقود يزداد بوضوح مع الزمن للعينات غير المطلية :**

التزايد المتسارع (من 0.05 إلى 0.14 (mg يشير إلى تآكل تراكمي مستمر—أي أن التعرض الأطول ينتج فقد كتلة أكبر بشكل تقريباً متناسب/متراكم. هذا نمط متوقع للتآكل العام (uniform corrosion) أو تزايد المناطق المتأكلة مع الزمن.

2. **معدل التآكل السنوي (mm/year) لغير المطلي:**

- ❖ يظهر تناقصًا مؤقتًا ثم ارتفاعًا (شكل U طفيف)
- ❖ الانخفاض من 720→1440 (~−20.5%) hr يبيّن وجود مرحلة انتقالية قد تكون نتيجة تشكّل طبقة تآكل أولية (أو طبقة أكاسيد / رواسب (تعمل كحاجز جزئي مؤقتًا passivation) مؤقت.(
- ❖ الارتفاع اللاحق عند 2160 hr (+16.7%) مقابل 1440 hr قد يدل على انهيار هذه الطبقة الواقية)تشققات، تسلل أملاح/رواسب، أو تكوّن بنية مسامية غير واقية) أو تحول لنمط تآكل أكثر شدة (مثل بَدء حفر محلي.(pitting/
- ❖ النتيجة: ليس كل زيادات الوزن المفقود تترافق دائمًا مع زيادة فورية في القيمة المعبّر عنها كمعدل سنوي لأن المعدل السنوي مُطبَّع (normalized) وقد يعكس تغيرات مؤقتة في آلية التآكل.

3. **الطلاء فعّال لكن ليس مثالياً:**

- ❖ عينتا الطلاء عند 720 و1440 hr أظهرت صفر فقد وزن (إما أن الفقد أصغر من حد الكشف أو أن الطلاء كان متماسكًا تمامًا). عند 2160 hr ظهر فقد بسيط (0.02 (mg ومعدل تآكل صغير جدًا (7.15×10^{-9})، ما يعني أن الطلاء يقلل التآكل بنحو 7–7.5 مرات لكنه قد يتعرض للعيوب/التشققات مع زمن أطول أو عند مناطق معينة تسمح بدخول الوسط المسبب للتآكل.
- ❖ تفسير عملي: الطلاء يعمل كحاجز فعّال ويحسّن العمر الافتراضي بشكل كبير، لكن بعد زمن كافٍ قد تظهر نقاط ضعف (مناطق حدودية، فقاعات، خدوش، ترقُّق) تؤدي إلى بداية التآكل.

4. التوافق بين مقاييس الوزن ومعدل التآكل:

- الحسابات (mg/hr) تُظهر نفس النمط العام (انخفاض ثم ارتفاع طفيف للعينات غير المطلي) لذا لا توجد تناقضات جوهرية بين القياسين؛ الاختلافات الصغيرة ناجمة عن طريقة تحويل الوزن المفقود إلى معدل سنوي (حيث تدخل مساحة العينة وكثافتها وصيغة التحويل)، وبسبب طبيعة التآكل غير المتجانسة ومجال الخطأ التجريبي.

الاستنتاجات:

اظهرت نتائج هذه الدراسة أن التآكل في البيئات البحرية يمثل تحدياً حقيقياً يهدد العمر الافتراضي للمعدات والهياكل الحديدية، حيث أظهرت العينات غير المطلية معدلات فقدان وزن مرتفعة بشكل ملحوظ، خاصة مع زيادة زمن التعرض لمياه البحر، مما انعكس في ارتفاع معدل التآكل السنوي بشكل كبير. في المقابل، أثبتت العينات المطلية بالطلاء الإيبوكسي قدرة عالية على مقاومة التآكل، إذ عمل الطلاء كحاجز فعال يمنع الوسط المسبب للتآكل من الوصول إلى سطح المعدن، الأمر الذي ساهم في تقليل التفاعلات الكهروكيميائية المسؤولة عن تدهور البنية المعدنية. تؤكد هذه النتائج أن استخدام الطلاءات المقاومة، مثل الطلاء الإيبوكسي، يُعد استراتيجية فعالة وضرورية للحفاظ على سلامة المكونات الحديدية في البيئات البحرية والصناعية، حيث يسهم في إطالة عمر الخدمة وتقليل تكاليف الصيانة والإصلاح. كما تبرز أهمية اختيار مواد طلاء مناسبة واتباع إجراءات تطبيق دقيقة لضمان تحقيق الحماية القصوى، مع ضرورة إجراء فحوصات دورية لمراقبة حالة الطلاء ومعدل التآكل، بما يضمن استدامة الأداء ويعزز الموثوقية الاقتصادية والإنشائية للمنشآت المعدنية.

تُظهر النتائج بوضوح أن الطلاء يقلل من معدل التآكل بشكل كبير يصل إلى حوالي سبعة أضعاف بعد 2160 ساعة مقارنة بالعينات غير المطلية. وهذا يبرز الأهمية العملية للطلاء كوسيلة فعّالة للحماية، خاصةً للمكونات الحساسة التي تتطلب متانة طويلة الأمد. كما لوحظ في العينات غير المطلية حدوث انخفاض مؤقت في معدل التآكل، يُرجَّح أنه ناتج عن تكوّن جزئي لمنتجات التآكل، إلا أن هذا التأثير لم يكن مستدامًا حيث تدهورت طبقة الحماية تدريجيًا. ويشير ذلك إلى ضرورة المراقبة طويلة المدى للأنظمة غير المحمية.

ورغم أن القيم المطلقة لمعدلات التآكل كانت صغيرة جدًا (في حدود (8–10{8-}^810–10، إلا أنه من الضروري التحقق من وحدات القياس ومنهجية التحويل من الكتلة المفقودة إلى معدل التآكل (مم/سنة) قبل استخلاص استنتاجات تتعلق بعمر المكوّنات. وعليه، فإن التفسير الأمثل ينبغي أن يركز على الفروق النسبية والاتجاهات العامة بين العينات المطلية وغير المطلية، أكثر من تركيزه على القيم العددية المطلقة ما لم تكن منهجية التحويل موثقة بشكل كامل.

التوصيات:

بناءً على ما سبق من نتائج وتحليل، يتضح أن فهم آليات التآكل واتجاهاته يتطلب ليس فقط دراسة الوزن المفقود ومعدلات التآكل السنوية، بل أيضًا التعمق في تفسير سلوك العينات المطلية وغير المطلية على المدى الزمني الطويل. ومن أجل تعزيز دقة النتائج وضمان موثوقية التفسيرات العلمية، يمكن اقتراح مجموعة من التوصيات والإجراءات العملية للتحقق والتوسع في الدراسة، على النحو التالي:

1. **تكرار التجربة** لكل حالة زمنية لخفض أثر التباين العشوائي.
2. **أخذ قياسات زمنية إضافية** مثلاً 360، 1080، 1800 (hr) لرصد متى بالضبط تظهر ذروة/انهيار طبقة التآكل.
3. **فحص سطحي بعد كل زمن** :تصوير بصري + ميكروسكوب لتحديد ما إذا التآكل موحّد أم نقطي وما تركيب طبقة التآكل.
4. **فحص الطلاء** :قياس سمك الطلاء، اختبار التصاق، اختبار وجود مسام أو شقوق.(cross-section)
5. **اختبارات كهروكيميائية** :مثل الاستقطاب و تحليل المعاوقة الكهروكيميائية .لإعطاء معلومات آنية عن معدلات التآكل وآلياته.
6. **تأكيد خطوات حساب معدل التآكل** :مراجعة مساحة العينة، كثافة المادة، ومعامل التحويل المستخدم لتحويل mm/year → mg للتأكد من الأرقام المطلقة.

المراجع:

1. أحمد نجيب علي يحيى، مطيعة محمد أحميدة، أيمن جمهة الأوسطى، وعبدالسميع حسير، "تأثير الأوساط المائية المختلفة على سلوك تآكل الفولاذ المتوسط الكربون"، قسم الهندسة الميكانيكية والصناعية، جامعة الزاوية، 2019.
2. عبده الزهراء رشى السعدي، *دراسة منحنيات الاستقطاب للصلب الكربوني (X65-Steel) في الوسط الحمضي – العراق*، مذكرة ماجستير، جامعة القادسية، 2016.
3. عبدالقادر بن منين، *Étude de l'effet inhibiteur des extraits de plante sur la corrosion de l'acier Cx52*، أطروحة دكتوراه، جامعة ورقلة، 2018.
4. عيسى مسعود بغني، *أساسيات هندسة التآكل*، بنغازي: دار الكتب الوطنية، 2006.
5. قحطان الخزرجي وعبدالجواد الشريف، *التآكل*، عمان: دار دجلة ناشرون وموزعون، 2010.
6. مريم غيالني، *دراسة فعالية نبات الشريك Fagonia cretica ضد التآكل بطريقة انخفاض الكتلة والطريقة الكهروكيميائية*، مذكرة ماستر، جامعة الشهيد حمه لخضر، الوادي، 2018.

7. مسعودة دغموش، *تحضير وتحديد الخصائص الفيزيوكيميائية لبعض مركبات ثنائي ثيول ثيون وأمالحها المرافقة وتطبيق فعاليتها التثبيطية في دراسة تآكل المعادن*، أطروحة دكتوراه، جامعة قاصدي مرباح، ورقلة، 2014.

8. حيدر حسن جابر جمال الدين، "أضرار وفوائد التآكل"، كلية هندسة المواد، قسم هندسة المعادن، جامعة بابل، 2015.

9. O. Biola and M. Oforka, "Inhibition of the corrosion of mild steel in hydrochloric acid by (4-amino-2-methyl-5-pyrimidinyl methylthio) acetic acid and its precursor," *American Journal of Materials Science*, vol. 4, no. 2, pp. 111–117, 2014.

10. P. Rayeev, A. O. Surendranathan, and S. N. Murthych, "Corrosion mitigation of the oil well steel using organic inhibitors," *Journal of Materials and Environmental Science*, vol. 3, no. 5, pp. 856–869, 2012.