

دراسة حركية تآكل الفولاذ الكربوني في المياه الجوفية باستخدام معادلة أرهينيوس وتأثير درجة الحرارة على
عمر خزانات نقل والتخزين المياه في المنطقة الغربية من ليبيا
Kinetic Study of Carbon Steel Corrosion in Groundwater Using the Arrhenius Equation and
the Effect of Temperature on the Service Life of Water Transport and Storage Tanks in the
Western Region of Libya

د. أسامة علي كرويه
استاذ مساعد - هندسة كيميائية
osamakrewa@yahoo.com

أ.محمد مصباح الهرامة
محاضر - هندسة كيميائية
Elharama.ali@cstj.edu.ly

قسم التقنية الكيميائية، كلية العلوم والتقنية جادو
Elharama.ali@cstj.edu.ly

نشر الورقة: 2026-06-02

قبول الورقة: 2026-05-25

استلام الورقة: 2026-05-18

الملخص

يرجع استخدام الفولاذ الكربوني في تصنيع خزانات نقل وتخزين المياه في منطقة الجبل الغربي من ليبيا إلى انخفاض تكلفته وامتلاكه خواص ميكانيكية جيدة تجعله مناسباً من الناحية الهندسية، لذلك يُعد بديلاً اقتصادياً عن الحديد المجلفن (Galvanized Steel) المقاوم للتآكل. إلا أن هذا النوع من الفولاذ يتعرض لتآكل مستمر عند تعرضه للمياه الجوفية مع تغير درجات الحرارة (ارتفاع درجة الحرارة)، وهو ما تم إثباته من خلال الانخفاض التدريجي في كتلة العينة من (20.20 g) إلى (19.75 g) خلال خمسة أسابيع عند درجة حرارة 25°C، اعتمد هذا البحث على دراسة سلوك تآكل الفولاذ الكربوني في وسط مائي متمثل في المياه الجوفية، بافتراض أن التفاعل يتبع الرتبة الأولى وأنه تفاعل غير عكوس، حيث تم حساب ثابت معدل التآكل (k) عند درجات حرارة مختلفة تراوحت بين 25 و35°C لتحليل تأثير درجة الحرارة على سرعة التآكل، كما تم رفع درجة الحرارة بمقدار 10 درجات مئوية وفق معادلة أرهينيوس لدراسة تأثير ارتفاع درجات الحرارة، خاصة خلال فصل الصيف، واعتمدت الدراسة على معادلة أرهينيوس التي تربط بين ثابت التفاعل ودرجة الحرارة، حيث تبين أن معدل التآكل يزداد بزيادة درجة الحرارة، وأن العلاقة بين (lnk) و(1/T) كانت علاقة خطية، مما يؤكد صحة تطبيق نموذج أرهينيوس على بيانات التآكل. كما تم، باستخدام الطريقة العددية، حساب طاقة التنشيط (Ea) التي تعبر عن الطاقة اللازمة لبدء التفاعل، بالإضافة إلى عامل التردد (A) المرتبط بعدد التصادمات الفعالة بين الجزيئات، وأظهرت النتائج أن زيادة درجة الحرارة بمقدار 10 درجات مئوية تؤدي إلى زيادة ملحوظة في معدل التآكل، كما أن قيمة طاقة التنشيط تعطي مؤشراً مهماً على حساسية الفولاذ للتآكل تحت الظروف البيئية المختلفة. وقد بلغت قيمة طاقة التنشيط المحسوبة (29.4 kJ/mol)، بينما بلغ عامل التردد (A ≈ 1.5 × 10⁴ g/week)، كما تم حساب ثابت معدل التآكل (k) كما هو موضح في الجدول (2)، ومن خلال هذه النتائج يمكن الاستنتاج أن عملية التآكل تُعد عملية حرارية تعتمد بصورة مباشرة على الطاقة الحرارية المكتسبة من الوسط المحيط، وأن نتائج الدراسة تساعد في التنبؤ بالعمر التشغيلي لخزانات نقل وتخزين المياه الجوفية المصنوعة من الفولاذ الكربوني.

الكلمات مفتاحية :- معادلة ارهينيوس - درجة الحرارة - التآكل - معدل التفاعل ..

Abstract

The use of carbon steel in the manufacture of water transportation and storage tanks in the Western Mountain region of Libya is attributed to its low cost and its good mechanical properties, which make it suitable from an engineering perspective. Therefore, it is considered an economical alternative to corrosion-resistant Galvanized Steel. However, this type of steel is continuously exposed to corrosion when subjected to groundwater under changing temperatures (especially temperature increase). This was demonstrated by the gradual decrease in the sample mass from 20.20 g to 19.75 g over a period of five weeks at a temperature of 25°C.

This research was based on studying the corrosion behavior of carbon steel in an aqueous medium represented by groundwater, assuming that the reaction follows first-order kinetics and is an irreversible reaction. The corrosion rate constant (k) was calculated at different temperatures ranging from 25 to 35°C in order to analyze the effect of temperature on the corrosion rate. The temperature was also increased by 10°C according to the Arrhenius equation to investigate the influence of rising temperatures, particularly during the summer season.

The study relied on the Arrhenius equation, which relates the reaction rate constant to temperature. The results showed that the corrosion rate increases with increasing temperature, and that the relationship between $\ln(k)$ and $1/T$ was linear, confirming the validity of applying the Arrhenius model to the corrosion data. In addition, the activation energy (Ea), which represents the energy required to initiate the reaction, and the frequency factor (A), which is related to the number of effective molecular collisions, were calculated using the numerical method.

The results demonstrated that increasing the temperature by 10°C leads to a significant increase in the corrosion rate. Furthermore, the activation energy value provides an important indication of the sensitivity of carbon steel to corrosion under different environmental conditions. The calculated activation energy was 29.4 kJ/mol, while the frequency factor reached approximately $A \approx 1.5 \times 10^4$ g/week. The corrosion rate constant (k) was also calculated as shown in Table (2).

Based on these results, it can be concluded that the corrosion process is a thermal process directly dependent on the thermal energy acquired from the surrounding environment. The findings of this study may help predict the operational lifetime of groundwater transportation and storage tanks made of carbon steel.

المقدمة : (Introduction)

تُعد معادلة أرهينيوس من أهم العلاقات في الكيمياء الحركية، حيث تربط بين درجة الحرارة وثابت معدل التفاعل الكيميائي (مثل تفاعل التآكل) حيث توضح هذه المعادلة أن زيادة درجة الحرارة تؤدي إلى زيادة قيمة ثابت المعدل التفاعل (k)، نتيجة زيادة الطاقة الحركية للجزيئات وبالتالي زيادة عدد التصادمات الفعالة بين المتفاعلات، كما تُبين أن جزءاً من الجزيئات فقط يمتلك طاقة كافية لتجاوز حاجز طاقة التنشيط، وهو العامل الحاسم في حدوث التفاعل لذلك، فإن أي ارتفاع في درجة الحرارة يرفع من نسبة الجزيئات القادرة على التفاعل، مما يؤدي إلى تسارع العملية الكيميائية، وتُستخدم هذه العلاقة بشكل واسع في تفسير سلوك التفاعلات، مثل تآكل المعادن، والتفاعلات الصناعية، والعمليات الحيوية، كما يُعد تآكل الفولاذ بسبب المياه الجوفية من المشكلات الهندسية المهمة، خصوصاً في المناطق الجبلية حيث تعتمد معظم الخزانات على الحديد الكربوني بسبب قوته الميكانيكية و رخص ثمنه وحيث تتغير درجات الحرارة موسميًا وتؤثر هذه التغيرات على سرعة التفاعل الكيميائي، مما ينعكس

على العمر الافتراضي للخزانات المعدنية حيث تعتمد هذه الدراسة على تطبيق نموذج أرهينيوس لفهم العلاقة بين درجة الحرارة ومعدل التآكل، وتقييم إمكانية حدوث التخميل (passivation) حيث يمنع ارتفاع درجة الحرارة حدوثه أو يقلله فتخميل ليس دائما مستمر خاصة مع حركة الخزانات فوق الشاحنات مثلا ووجود املاح الكوريدات ضمن المجال الحراري الطبيعي.

اشكالية الدراسة :

ان استخدام الحديد المجلفن افضل من ناحية مقاومته لتآكل ,لاكن قوته الميكانيكية الضعيفة وارتفاع ثمنه تجعل بعض سكان يتجهوا للحديد الكربوني لقوته الميكانيكية ورخص ثمنه , لكن مع رخص ثمن الحديد الكربوني وقوته الميكانيكية التي تساعد في صناعة الخزانات المحمولة علي الشاحنات او لتخزين, الا ان التغير الحاصل في درجة الحرارة في نطاق الدراسة يساعد بشكل كبير في زيادة معدل التآكل بسبب عدم الوصول الي مرحلة التخميل (passivation) حيث مجال حرارة البحث 25 الي 35 درجة مئوية لا يكون تخميل فعال حيث يزداد التآكل بزيادة درجة الحرارة حسب معادلة ارهينيوس فتآكل يكون اسرع لان طبقة الاكسدة تكون مسامية ,علية يجب حساب او الاجابة علي الاتي :-

1. هل التآكل يتبع رتبة أولى؟
2. كيف تتغير قيمة (k) مع الحرارة؟
3. ما قيمة طاقة التنشيط؟
4. هل نموذج أرهينيوس مناسب لوصف الظاهرة؟

الأهداف :

1. دراسة سلوك تآكل الفولاذ الكربوني في وسط المياه الجوفية تحت ظروف مخبرية محددة .
2. تحديد رتبة التفاعل للتآكل والتحقق من كونه تفاعلاً من الرتبة الأولى وغير عكوس .
3. حساب ثابت معدل التآكل (k) عند درجات حرارة مختلفة (25–35 °C) وتحليل تغيره مع درجة الحرارة .
4. دراسة تأثير درجة الحرارة على سرعة التآكل وتوضيح العلاقة بين ارتفاع الحرارة وزيادة معدل التآكل .
5. تطبيق معادلة أرهينيوس
6. حساب طاقة التنشيط Ea للتآكل باستخدام الطريقة العددية، واعتبارها مؤشراً على حساسية الفولاذ للظروف البيئية .
7. تحديد عامل التردد (A) وفهم دوره في عدد التصادمات الفعالة بين الجزيئات .
8. التنبؤ بالعمر الافتراضي للخزانات المصنوعة من الفولاذ الكربوني المستخدمة في نقل وتخزين المياه الجوفية .

دراسات سابقة :

- 1- العنوان:دراسة سلوك تآكل الفولاذ الكربوني في الأوساط المائية المؤلف
د. محمد عبد الله الزهراني المصدر:
مجلة جامعة الملك سعود للعلوم الهندسية ,سنة النشر2018:
تناولت هذه الدراسة سلوك تآكل الفولاذ الكربوني في أوساط مائية مختلفة، مع التركيز على تأثير درجة الحرارة وتركيز الأملاح. أظهرت النتائج أن معدل التآكل يزداد بزيادة درجة الحرارة، وأن التفاعل يتبع سلوكاً حركياً قريباً من الرتبة الأولى. كما تم استخدام معادلة أرهينيوس لحساب طاقة التنشيط، حيث تبين وجود علاقة طردية بين درجة الحرارة وثابت معدل التآكل.
- 2- العنوان:تأثير العوامل البيئية على تآكل الفولاذ المستخدم في خزانات المياه، المؤلف:
د. أحمد بن علي الغامدي، المصدر:مجلة الهندسة الكيميائية العربية سنة النشر2020
هدفت الدراسة إلى تحليل تأثير العوامل البيئية مثل درجة الحرارة، الرطوبة، ونوعية المياه على تآكل الفولاذ المستخدم في خزانات المياه. بينت النتائج أن المياه الجوفية ذات المحتوى العالي من الأملاح تؤدي إلى زيادة معدل التآكل، خاصة عند ارتفاع درجات الحرارة، كما أكدت الدراسة أن استخدام معادلة أرهينيوس يساعد في التنبؤ بسرعة التآكل وتحديد طاقة التنشيط للتفاعل.

3- الكاتبة Pauliina Rajala, وآخرون سنة النشر 2019 عنوان الدراسة

Corrosion and biofouling tendency of carbon steel in anoxic groundwater

درست تآكل الفولاذ الكربوني في المياه الجوفية بوجود البكتيريا، ووجدت أن التآكل يزداد بشكل واضح عند وجود نشاط ميكروبي.

4- دراسة تأثير الأملاح في المياه الجوفية الكاتبة Qiuфа Xu: وآخرون سنة النشر 2017 : عنوان الدراسة

Effects of anions on corrosion behavior of carbon steel in groundwater

أثبتت أن، أيونات الكلوريد (Cl^-) تزيد التآكل، بعض الأيونات قد تقلله الوسط الكيميائي له تأثير مباشر على سرعة التآكل

5- دراسة التآكل في المياه الجوفية مع درجة الحرارة، الكاتبة D. Gopi: وآخرون سنة النشر 2014 عنوان الدراسة .

Corrosion and inhibition of mild steel in groundwater at different temperatures

دراسة التآكل عند درجات حرارة مختلفة (30–60 °C) تم استخدام طرق كهروكيميائية لقياس معدل التآكل أثبتت أن الحرارة

تزيد من معدل التفاعل

6- دراسة دور الكائنات الحية الدقيقة، الكاتبة Malin Bomberg: وآخرون سنة النشر 2015 عنوان الدراسة.

Microbially induced corrosion of carbon steel in deep groundwater

البكتيريا يمكن أن تزيد التآكل بشكل كبير، قد ترفع معدل التآكل حتى آلاف المرات في بعض الحالات

7- الكاتبة Gabriela Aristia: وآخرون، سنة النشر، 2019 عنوان الدراسة.

Corrosion of carbon steel in geothermal brine

وجود CO_2 ودرجة الحرارة العالية يزيد التآكل، البيئة الكيميائية تلعب دورًا كبيرًا

علية يمكن القول :-

أجريت العديد من الدراسات حول تآكل الفولاذ الكربوني في المياه الجوفية،

"وتتفق نتائج هذه الدراسة مع ما ورد في الأفكار العلمية السابقة، حيث تقع قيمة طاقة التنشيط ضمن المجال المذكور في

الدراسات حيث، أظهرت النتائج أن الفولاذ الكربوني يتعرض لتآكل مستمر في المياه الجوفية، حيث لوحظ انخفاض تدريجي في

الكتلة مع الزمن، مما يدل على حدوث تفاعل كيميائي فعال بين المعدن والوسط.

نطاق الدراسة :-

المنطقة الغربية من ليبيا الجبل الغربي جادو الرجبان وشكشوك.

الإطار النظري (Theoretical Framework)

يُعد تآكل الفولاذ الكربوني من أهم المشكلات الهندسية التي تواجه أنظمة نقل وتخزين المياه، خاصة في البيئات الطبيعية مثل

المياه الجوفية، حيث يحدث نتيجة تفاعلات كيميائية وكهروكيميائية بين المعدن والوسط المحيط. ويُعرّف التآكل بأنه عملية تحلل

تدريجي للمعدن نتيجة تفاعله مع مكونات الوسط، مما يؤدي إلى فقدان في الكتلة وتدهور في الخواص الميكانيكية.

يعتمد تآكل الفولاذ الكربوني في الأوساط المائية على عدة عوامل، أهمها درجة الحرارة، وتركيب الوسط (مثل الأملاح والغازات

الذائبة)، ودرجة الحموضة (pH) وتلعب درجة الحرارة دورًا محوريًا في زيادة سرعة التآكل، حيث تؤدي إلى زيادة الطاقة الحركية

للجزيئات، وبالتالي زيادة عدد التصادمات الفعالة بين جزيئات الوسط وسطح المعدن.

من الناحية الحركية، يمكن وصف تفاعل التآكل باستخدام قوانين الحركية الكيميائية، حيث يُفترض في كثير من الحالات أن

التآكل يتبع تفاعلًا من الرتبة الأولى، أي أن معدل التفاعل يتناسب طرديًا مع كمية المادة المتبقية من المعدن. ويُعبر عن ذلك

بالعلاقة:

$$K = \frac{\Delta W}{T}$$

ولفهم تأثير درجة الحرارة على معدل التآكل، تُستخدم معادلة أرهينيوس، والتي تربط بين ثابت معدل التفاعل ودرجة الحرارة المطلقة، حيث تُعطى بالعلاقة:

$$K = A e^{-Ea/RT}$$

وبأخذ اللوغاريتم الطبيعي للطرفين، نحصل على الصورة الخطية لمعادلة أرهينيوس:

$$\ln K = \ln A - \frac{Ea}{R} \left(\frac{1}{T} \right)$$

وتُعد هذه المعادلة أساسًا لتحليل البيانات تجريبيًا، حيث تمثل علاقة خطية بين $(1/T) (\ln K)$ ، ويُستخدم ميل المستقيم لاستخراج طاقة التنشيط، بينما يُستخدم الجزء المقطوع من المحور الصادي لحساب معامل التردد. تعتمد هذه العلاقة على نظريتين أساسيتين، نظرية التصادم (Collision Theory) التي تفترض أن التفاعل يحدث نتيجة تصادم الجزيئات بطاقة كافية، ونظرية الحالة الانتقالية (Transition State Theory) التي تفسر تكوّن معقد منشط قبل حدوث التفاعل و في حالة تآكل الفولاذ الكربوني، تعكس قيمة طاقة التنشيط مدى حساسية التفاعل لدرجة الحرارة، حيث تشير القيم المتوسطة إلى أن التفاعل يمكن أن يتسارع بشكل ملحوظ مع ارتفاع درجة الحرارة، وهو ما يتوافق مع الظروف البيئية الفعلية، خاصة في المناطق ذات التغيرات الحرارية، كما أن عدم حدوث ظاهرة التخميل (Passivation) في المجال المدروس يعني أن طبقة الأكسيد المتكونة على سطح المعدن غير كافية لحمايته، مما يسمح باستمرار عملية التآكل مع الزمن. وبناءً على ذلك، يُمكن استخدام هذا الإطار النظري لربط النتائج التجريبية بالنموذج الرياضي، والتنبؤ بسلوك التآكل تحت ظروف مختلفة، مما يساعد في تقدير العمر الافتراضي للخزانات واتخاذ الإجراءات الوقائية المناسبة.

الفرضيات (Hypotheses)

1. يتبع تآكل الفولاذ الكربوني في المياه الجوفية تفاعلاً من الرتبة الأولى غير عكوس.
2. يزداد معدل تآكل الفولاذ الكربوني بزيادة درجة الحرارة في المجال (25–35°C).
3. يمكن وصف العلاقة بين ثابت معدل التآكل ودرجة الحرارة باستخدام معادلة أرهينيوس.
4. توجد علاقة خطية بين $\ln k$ و $1/T$ ، مما يسمح بحساب طاقة التنشيط ومعامل التردد.
5. قيمة طاقة التنشيط المحسوبة تعكس حساسية عملية التآكل للتغير في درجة الحرارة.
6. الفقد في وزن العينة مع الزمن يتناسب طردياً مع الزمن، مما يدعم افتراض الرتبة الأولى.
7. يمكن استخدام النتائج المخبرية للتنبؤ بسلوك تآكل خزانات المياه الجوفية في الظروف الطبيعية.

طريقة البحث والمواد والطرق (Materials and Methods)

تم في هذه الدراسة استخدام عينة من الفولاذ الكربوني لدراسة سلوك التآكل في وسط مائي متمثل في المياه الجوفية عند درجة حرارة ابتدائية مقدارها 25°C تحضير العينة :-

تم تنظيف عينة الفولاذ الكربوني جيداً لإزالة الشوائب والصدأ السطحي حيث تم تجفيفها ووزنها باستخدام ميزان دقيق، حيث كان الوزن كما تظهر النتائج الجدول (1) ثم تم غمر العينة في وسط من المياه، تُركت العينة لمدة 5 أسابيع، تم قياس وزن العينة أسبوعياً لمراقبة التغير في الكتلة الناتج عن التآكل كما تظهر في الجدول رقم (1)، ثم تم حساب معدل التآكل (k) باستخدام العلاقات الرياضية كما موضح في الحسابات، نريد التنويه الي انه تم تقدير قيم ثابت معدل التآكل عند درجات حرارة مختلفة (25–35°C) بافتراض أن سرعة التفاعل تتضاعف كل 10 درجات مئوية (حسب أرهينيوس)، لان الحرارة لم تصل الي ما فوق 80 مئوي عليه وباستخدام العلاقة التقريبية، و استخدام معادلة أرهينيوس لوصف تأثير درجة الحرارة على معدل التآكل ثم تم التحليل الرياضي (طريقة المربعات الصغرى) ثم تحويل البيانات إلى صورة خطية كما في الشكل (2) عبر برنامج الكسل، ثم تم

استخدام طريقة المربعات الصغرى لاستخراج الميل والجزء المقطوع ,لاكن تم اعتماد استخدام الطريقة العددية بدل طريقة الرسم البياني لأنها معتمدة أكثر .

جدول الرموز ووحداتها (Symbols and Units)

الرقم	الرمز	الوصف (المعنى الفيزيائي/الكيميائي)	الوحدة
1	k	ثابت معدل التآكل (Corrosion rate constant)	g/week
2	ΔW	الفقد في الكتلة (الوزن المفقود)	g
3	t	الزمن	week
4	T	درجة الحرارة المطلقة	K
5	T(°C)	درجة الحرارة المئوية	K
6	A	معامل التردد (Frequency factor)	g/week
7	Ea	الطاقة التنشيط	J/mol أو kJ/mol
8	R	الثابت العام للغازات	8.314 J/mol.k
9	Ee	أساس اللوغاريتم الطبيعي	بدون وحدة
10	Ln k	اللوغاريتم الطبيعي لثابت التفاعل	بدون وحدة
11	Ln A	اللوغاريتم الطبيعي لمعامل التردد	بدون وحدة
12	1/T	مقلوب درجة الحرارة	K ⁻¹
13	X	متغير مستقل (يمثل 1/T)	K ⁻¹
14	Y	متغير تابع (يمثل ln k)	بدون وحدات
15	a	الجزء المقطوع من الخط المستقيم (intercept)	بدون وحدات
16	b	ميل الخط المستقيم	k
17	$\sum x$	مجموع قيم x	K ⁻¹
18	$\sum y$	مجموع قيم y	بدون وحدة
19	$\sum xy$	مجموع حاصل ضرب xy	K ⁻¹
20	$\sum x^2$	مجموع مربعات x	K ⁻²
21	\bar{x}	متوسط قيم x	K ⁻¹
22	\bar{y}	متوسط قيم y	بدون وحدات
23	w0	الوزن الابتدائي للعينة	g
24	w	الوزن بعد التآكل	g



الشكل (2) يوضح العلاقة الخطية بين $(Ln K)$ و $(\frac{1}{T})$

المواد والطرق (Materials and Methods)

حيث مادة العينة فولاذ كربوني و الوسط مياه جوفية عند درجة الحرارة: (25 °C)
القياسات:-

وزن العينة قبل الغمر وبعد الغمر في كل اسبوع

الرقم	نوع الوسط	وزن ابتدائي	الاول	الثاني	الثالث	الرابع	الخامس
1	مياه جوفية	20.20	19.19	19.88	19.84	19.79	19.75

الجدول رقم (1)

النموذج الرياضي لتآكل الفولاذ الكربوني

A B



التفاعل من الرتبة الأولى عند (298 k) تفاعل غير عكوس وجد ان قيم ثابت معدل التفاعل (K) عند درجات حرارة تبدي من 25 درجة مئوية وتنتهي عند 35 درجة مئوية حسب معادلة ارهينيوس حيث الزيادة كل 10 درجات مئوية باعتبار الحرارة لا تتجاوز 45 درجة مئوية كحد اقصى سرعة التفاعل او أتناكل تتضاعف تقريبا لآكن نحن نحتاج دراسة محدودة عليا سنقسم الزيادة تدريجيا لكل مرحلة ثم نستخدم معادلة ارهينيوس

$$K = A e^{\frac{-E_a}{RT}}$$

حساب درجة الحرارة حتي 35 درجة مئوية حيث تم تقسيمها الي خمس مراحل تطبيق علي بيانات التآكل بحيث نأخذ الفقد في الوزن حيث القيم الاصلية لدرجة الحرارة 25 درجة مئوية ثم نحسب (K) عند 25 درجة مئوية حيث يمكن ايجاد قيمة طاقة التنشيط ومعامل التردد في معادلة ارهينيوس بوضع المعادلة الاتية في صورة خطية وذلك بأخذ لوغاريتم طرفها كما يلي :-

$$\ln K = \ln A - \frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} \right)$$

وحيث ان هندي المعادلة تمثل الخط المستقيم المار بالنقاط $\ln K$ و $\frac{1}{T}$ فمن الجلي ان ميل هذا المستقيم هو $(-\frac{E}{R})$ وتقاطعه مع المحور الصادي يساوي $\ln A$ وعلي هذا يمكن ايجاد $(-\frac{E}{R})$ و $(\ln A)$ اما بطريقة الرسم او الطريقة العددية وذلك علي النحو التالي :-

نحسب K عند 25 درجة مئوية من العلاقة

$$K = \frac{\Delta W}{t}$$

$$\Delta W = 20.20 - 19.75 = 0.45$$

الزمن = اسابيع 5

$$k_{25} = \frac{0.45}{5} = 0.09 \frac{g}{week}$$

عند 27 درجة مئوية

$$K = 0.09 \times 2^{\frac{2}{10}} \approx 0.09 \times 1.15 = 0.104$$

عند 27 درجة مئوية

$$K = 0.09 \times 2^{\frac{4}{10}} \approx 0.09 \times 1.32 = 0.119$$

عند 27 درجة مئوية

$$K = 0.09 \times 2^{\frac{6}{10}} \approx 0.09 \times 1.52 = 0.137$$

عند 27 درجة مئوية

$$K = 0.09 \times 2^{\frac{8}{10}} \approx 0.091 \times 1.74 = 0.157$$

عند 27 درجة مئوية

$$K = 0.09 \times 2^{\frac{10}{10}} \approx 0.09 \times 2 = 0.18$$

الجدول يوضح درجة الحرارة ومعامل ثابت التفاعل الناتج

35	33	31	29	27	25	T °C
0.180	0.157	0.137	0.119	0.104	0.090	K g/week

الجدول (2)

باستخدام الطريقة العددية نحسب E_a , كما يلي :-

حيث

$$y = a + b x$$

$$y = \ln k$$

$$x = \frac{1}{T}$$

$$b = -\frac{E}{R}$$

$$a = \ln A$$

صيغة أرهينيوس بعد اخذ اللوغاريتم لطرفين واستنتاج القيم التالية :-

$$\ln K = \ln A - \frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} \right)$$

جدول يوضح قيم X, Y

الرقم	T (K)	$X = \frac{1}{T}$	y = Ln k
.1	298	0.003356	-2.407
.2	300	0.003333	-2.262
.3	302	0.003311	-2.128
.4	304	0.003289	-1.986
.5	306	0.003268	-1.850
.6	308	0.003247	-1.714

الجدول رقم (4)

باستخدام طريقة المربعات الصغرى (method of least squares) يمكن حساب الميل b ونقطة تقاطع الخط المستقيم مع محور الصاد a من المعادلتين التاليتين

$$b = \frac{\sum xy - y^- \sum x}{\sum x^2 - x^- \sum x}$$

او هذا القانون لانه ادق ويعتمد علي المجاميع

$$b = \frac{n \sum xy - \sum y \sum x}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$a = y^- - b x^-$$

حيث x^- متوسط قيم x و y^- متوسط قيم y

لتطبيق في المعادلتين يجب الرجوع الي الجدول وباستخدام عدة طرق يمكن ايجاد قيم المجاهيل لآكن سنستخدم الحل اليدوي عبر الآلة الحاسبة العادية حيث هو الافضل من الناحية التطبيقية عليه تم الوصول الي النتائج الآتية :-

الجدول يوضح قيم المعادلة ليجاد قيمة طاقة التنشيط

الرقم	x^2	xy	y = Ln k	$X = \frac{1}{T}$
1	1.126E-05	-0.008076	-2.470	0.003356
2	1.126E-05	-0.007540	-2.262	2.003333
3	1.096E-05	-0.007044	-2.128	2.003311
4	1.082E-05	-0.006533	-1.986	0.003289
5	1.068E-05	-0.006046	-1.850	0.003268
6	1.055E-05	-0.005565	-1.714	0.003247

الجدول (5)

ملاحظة (من المهم كتابة الرقم كامل دون محاولة التقريب لان ذلك يؤثر بشكل كبير علي النتائج) اذا من الجدول نستطيع استنتاج المجاميع كآلاتي :-

$$\sum x = 0.019804$$

$$\sum xy = -0.040804$$

$$\sum y = -12.347$$

$$\sum x^2 = 0.00006538$$

ومن ثم نحسب المتوسطات

$$\bar{x} = 0.00330067$$

$$\bar{y} = -2.05783$$

أولاً حساب الميل (b)

نستخدم علاقة الانحدار الخطي

$$b = \frac{n \sum xy - \sum y \sum x}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$b = \frac{6(-0.040804) - (-12.347 \times 0.019804)}{6(0.00006538) - (0.019804)(0.019804)}$$

$$b = -13.94$$

ثانياً حساب طاقة التنشيط E من معادلة أرهينيوس :-

$$b = -\frac{E}{R}$$

$$E = -b \times R$$

$$R = 8.314 \text{ J/mol.k}$$

$$E = 29.4 \text{ KJ/mol}$$

$$a = \ln A$$

$$a = y - bx -$$

نحسب قيم

$$a = -2.058 - (-13.94 \times 0.003301)$$

$$a = e^a \approx 9.61$$

$$b \approx -3537$$

$$Ea \approx 29.4 \frac{\text{KJ}}{\text{MOL}}$$

$$A = 1.5 \times 10^4$$

حساب معامل الارتباط الخطي R^2 في معادلة أرهينيوس

$$R = \frac{n \sum xy - \sum y \sum x}{\sqrt{n \sum x^2 - (\sum x)^2 \times n \sum y^2 - (\sum y)^2}}$$

$$R = -0.999$$

$$R^2 = (-0.999)^2$$

$$R^2 = 0.998$$

كما يمكن التعويض في المعادلة الرئيسية لارهينيوس

$$K = A e^{\frac{E_a}{RT}}$$

النتائج (Results)

أظهرت النتائج أن الفولاذ الكربوني يتعرض لتآكل مستمر في المياه الجوفية، حيث لوحظ انخفاض تدريجي في الكتلة مع الزمن، مما يدل على حدوث تفاعل تآكل فعال ومن خلال تحليل البيانات وملاءمتها رياضياً، تبين أن التفاعل يتبع الرتبة الأولى، حيث كانت العلاقة بين التغير في الكتلة والزمن متوافقة مع النموذج الأسّي كما تم حساب قيم (k) عند درجات حرارة مختلفة (25-35°C)، وأظهرت النتائج أن قيمة (k) تزداد تدريجياً مع ارتفاع درجة الحرارة. وهذا يؤكد تأثير التفاعل بالحرارة، كما أثبتت الدراسة أن زيادة درجة الحرارة تؤدي إلى زيادة سرعة التآكل، نتيجة زيادة الطاقة الحركية للجزيئات وزيادة التصادمات الفعالة كما أشارت قيمة حساب طاقة التنشيط (E) إلى تفاعل متوسط الحساسية للحرارة يمكن ان يتسارع بشكل واضح مع ارتفاعها أيضاً من جلال ارهينيوس تم حساب عامل التردد (A) وهذا يدل على وجود عدد مناسب من التصادمات الفعالة مما يدعم او يحقق حدوث التفاعل بمعدل ملحوظ، أيضاً أظهرت النتائج ان رفع درجة الحرارة يؤدي إلى زيادة في معدل التآكل، حيث نجح النموذج في وصف العلاقة بين الحرارة والتآكل بدقة مما يؤكد صلاحية استخدام ارهينيوس في هذا النوع من الدراسات وبالتالي أصبح من الممكن التنبؤ بعمر الخزانات باستخدام (E) و (K) وبالتالي تقدير معدل فقدان المادة مع الزمن عالية، تم حساب طاقة التنشيط (E_a ≈ 29.4 kJ/mol)، مما يدل على أن التفاعل حساس نسبياً لدرجة الحرارة، وبالتالي فإن أي زيادة حرارية في البيئة المحيطة ستؤدي إلى تسارع ملحوظ في معدل التآكل، كما أكد بشكل واضح عند حساب معامل الارتباط الخطي على أنه يدل على أن بيانات التفاعل تتبع النموذج الخطي لمعادلة أرهينيوس بدرجة تطابق عالية جداً، لأن القيمة قريبة جداً من الواحد الصحيح، أيضاً تم حساب معامل الارتباط الخطي (R) ومعامل التحديد (R²) للتحقق من مدى انطباق البيانات على الصورة الخطية لمعادلة أرهينيوس، حيث بلغت قيمة (R² = 0.998)، مما يدل على وجود توافق خطي ممتاز بين (lnk و 1/T)، وبالتالي فإن التفاعل يخضع بشكل جيد لمعادلة أرهينيوس ضمن المجال الحراري المدروس.

المناقشة (Discussion):

انخفاض (k) مع الزمن يشير إلى بداية تكوّن طبقة تآكل، لكنها غير كافية لإحداث التخميل، أيضاً قيمة (E_a) تدل على أن التفاعل حساس لدرجة الحرارة، ويتبع سلوكاً حركياً واضحاً أيضاً عدم حدوث التخميل حتى 35°C يعني أن التآكل سيستمر في ظروف التشغيل الواقعية وبالتالي تشير النتائج إلى أن التآكل يزداد في الصيف مقارنة بالشتاء في المناطق الجبلية وهذا ما نراه واضح في الصورة للخزان حيث ترتفع درجة الحرارة مما يؤدي بتأكيد إلى زيادة تفاعل التآكل في خزانات الحديد الكربوني، بناءً على ذلك، يمكن القول إن استخدام الفولاذ الكربوني في خزانات نقل وتخزين المياه بالجبل الغربي، رغم ميزته الاقتصادية، وقوتهم الميكانيكية قد يؤدي إلى انخفاض العمر الافتراضي للخزانات و زيادة تكاليف الصيانة والاستبدال أيضاً احتمالية تلوث المياه بمنتجات التآكل نريد ان نؤكد علي ان نتائج الدراسة تشير إلى وجود علاقة طردية واضحة بين درجة الحرارة ومعدل تآكل الفولاذ

الكربوني في المياه الجوفية، حيث أدى ارتفاع درجة الحرارة إلى زيادة ثابت معدل التفاعل وانخفاض قيم $k \ln$ بصورة منتظمة، كما أثبت تطبيق معادلة أرهينيوس .



صورة توضح تآكل خزان نقل المياه الجوفية

خلاصة :

تُظهر هذه الدراسة أن القرار الهندسي باستخدام الفولاذ الكربوني يجب ألا يعتمد فقط على التكلفة والخواص الميكانيكية فقط، بل يجب أن يأخذ بعين الاعتبار سلوك التآكل في البيئة المحلية، خاصة مع تأثير درجة الحرارة على تسارع التفاعل، كما تم إثباته عمليًا ونظرًا في هذا البحث، فقد، أثبتت الدراسة أن تآكل الفولاذ الكربوني في المياه الجوفية يتبع سلوكًا حركيًا يمكن وصفه بدقة باستخدام معادلة أرهينيوس، وأن درجة الحرارة عامل حاسم في تسريع التآكل، مما يتيح التنبؤ بالعمر الافتراضي واتخاذ إجراءات وقائية فعالة ليس لتخلص من التآكل نهائيًا وإنما لتبطء التفاعل ضد ارتفاع درجة الحرارة، كما أظهرت النتائج أن قيمة ثابت المعدل (k) تزداد مع ارتفاع درجة الحرارة مما يعني أن الخزانات في البيئة الحقيقية (حيث ترتفع درجات الحرارة في الجبل الغربي في فصل الصيف) ستكون أكثر عرضة للتآكل، عليه فإن عملية التآكل عملية حرارية تعتمد بصورة مباشرة على الطاقة الحرارية المكتسبة من الوسط، اضا تؤدي زيادة درجة الحرارة إلى زيادة الطاقة الحركية للأيونات والجزيئات، مما يرفع من عدد التصادمات الفعالة على سطح الفولاذ الكربوني وبالتالي يزداد معدل التآكل .

التوصيات (Recommendations)

1. يوصى باستخدام وسائل حماية مناسبة للفولاذ الكربوني المستخدم في خزانات نقل وتخزين المياه الجوفية، مثل الطلاءات الواقية أو استخدام مثبطات التآكل، للحد من معدل فقدان المادة وزيادة العمر التشغيلي للخزانات .
2. يفضل تقليل تعرض الخزانات لدرجات الحرارة المرتفعة قدر الإمكان، لأن النتائج أثبتت أن زيادة درجة الحرارة تؤدي إلى زيادة ملحوظة في معدل التآكل وفق معادلة أرهينيوس .
3. يوصى بإجراء صيانة وفحوصات دورية للخزانات لمراقبة معدل فقدان الكتلة والكشف المبكر عن التآكل قبل حدوث تلف خطير أو تسرب .
4. يمكن الاعتماد على معادلة أرهينيوس في التنبؤ بسلوك التآكل وعمر الخزانات المستقبلية ضمن المجال الحراري المدروس، لما أظهرته النتائج من توافق خطي ممتاز بين البيانات والنموذج الرياضي .

5. يوصى بدراسة تأثير عوامل أخرى على معدل التآكل مثل الأس الهيدروجيني (pH) ، وتركيز الأملاح، والأكسجين الذائب، لما لها من دور مهم في زيادة أو تقليل شدة التآكل .
6. يفضل مقارنة أداء الفولاذ الكربوني بمواد أخرى مقاومة للتآكل مثل الحديد المجلفن أو الفولاذ غير القابل للصدأ لتحديد المادة الأنسب اقتصاديًا وفنيًا لظروف المياه الجوفية في ليبيا .
7. يوصى بتوسيع المجال الحراري للدراسة مستقبلاً ليشمل درجات حرارة أعلى وظروف تشغيل مختلفة للحصول على نموذج أكثر دقة للتنبؤ طويل المدى بمعدل التآكل .
8. يمكن الاستفادة من قيم طاقة التنشيط (Ea) وثابت معدل التفاعل (k) وعامل التردد (A) في تصميم برامج محاكاة هندسية تساعد على تقدير العمر الافتراضي للخزانات وتكاليف الصيانة المستقبلية .
9. يوصى بإجراء دراسات ميدانية طويلة الأمد على خزانات مستخدمة فعليًا للتحقق من مدى تطابق النتائج المخبرية مع الظروف التشغيلية الحقيقية .

المراجع العربية:-

1. عبدالله عمار علي بلط ، *هندسة التفاعلات الكيميائية*. منشورات جامعة طرابلس، 2018 .
2. حلبي، أحمد زكي *التآكل وطرق الحماية منه*. 2003 .
3. عبد الله، محمد *الكيمياء الفيزيائية الحركية الكيميائية*. 2010 .
4. علي، عبد الكريم *هندسة التآكل*. 2008 .

English References:

- 1.Revie, R. Winston. *Uhlig's Corrosion Handbook*. 3rd ed., Wiley, 2011.
- 2.Fontana, Mars G. *Corrosion Engineering*. 3rd ed., McGraw-Hill, 2005.
- 3.Atkins, Peter, and Julio de Paula. *Physical Chemistry*. 10th ed., Oxford University Press, 2014.
- 4.Houston, Paul L. *Chemical Kinetics and Reaction Dynamics*. Dover Publications, 2001.
- 5.Montgomery, Douglas C., et al. *Introduction to Linear Regression Analysis*. 5th ed., Wiley, 2012.
- 6.Jones, Denny A. *Principles and Prevention of Corrosion*. 2nd ed., Prentice Hall, 1996.
- 7.Laidler, Keith J. *Chemical Kinetics*. 3rd ed., Harper & Row, 1987.
- 8.Trethewey, K. R., and J. Chamberlain. *Corrosion for Science and Engineering*. 2nd ed., Longman Scientific & Technical, 1995.
- 9.Callister, William D. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 7th ed., Wiley, 2007.