



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الشهيد حمه لخضر-الوادي
كلية التكنولوجيا



مذكرة تخرج مقدمة لنيل شهادة ماستر أكاديمي

الفرع: تكرير وبيتروكيمياء

ميدان: علوم وتكنولوجيا

تخصص: هندسة بيتروكيميائية

من إعداد الطالبين:

طواهي عبد العزيز

منصوري صلاح الدين

بعنوان:

تثبيط التآكل باستعمال الجيلاتين

تمت مناقشة المذكرة في: 2025/05/27

أمام اللجنة الموقرة المتكونة من:

جامعة الشهيد حمه لخضر-الوادي	مؤطرًا	شعبية ناصر
جامعة الشهيد حمه لخضر-الوادي	رئيسًا	براني جمال
جامعة الشهيد حمه لخضر-الوادي	مناقشًا	بوغزال عبد السلام

الموسم الجامعي: 2025/2024



الاهداء

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ، الْحَمْدُ لِلَّهِ الْوَهَّابِ ذِي الْعِظَاءِ، مِنْ عِلْمِ الْإِنْسَانِ مَا لَمْ يَعْلَمْ، وَفَتْحَ لَهُ أَبْوَابَ
الرجاء،

سُبْحَانَهُ سُبْحَانَهُ، لَا يُحْصَى لَهُ وَصْفٌ وَلَا يُدْرَكُ لَهُ سَنَاءٌ، لَهُ الْحَمْدُ فِي الْمَبْتَدَأِ، وَلَهُ الْحَمْدُ فِي الْخَفَاءِ
وَالجلاء.

إلى من غرسا في قلبي معنى الحياة، وزينا أيامي بالدعاء والنقاء، إلى من حملا همي قبل أن أولد،
ووهباني الحبّ دون رياء،

إلى من كانت سعادتني أملاً لهما، وسُقمي لهما كرباً وشقاء، إلى والديّ، يا زهرة العمر، ويا روح
البهاء والصفاء،

أهديكما هذا الجهد المتواضع، وتلك الثمار التي أينعت بعناء. حفظكما الله تعالى وزين أيامكما بكل خير
وعافية وهناء

إلى أساتذتي، منارات الفكر، وحملة مشاعل الضياء، من أعطوا بلا كلل، وعلموا بنبل، وسقونا من
معين العلم صفاء،

إليكم يا من كنتم نعم الدليل، لكم كل التحايا، وكل الشكر والثناء، جزاكم الله عنا خير الجزاء.

وإلى كل من ساندني يوماً، وكان لعزيمتي سنداً في الخفاء، إلى من أهداني كلمة أمل، أو بسمّة
صادقة تشقّ عنان الدجى والظلماء، إلى أصدقائي، وكلّ من عرفني في درب الوفاء والصفاء،

لكم في القلب محبة، وفي هذا العمل ذكرى ودعاء. اللهم اجعل هذا العمل خالصاً لوجهك الكريم، لا
رياء فيه ولا ادعاء، واجعل ما فيه نوراً ينفعنا، يوم لا ينفع مال ولا بنون وثبتني به على الحق،
وارزقتني به العلم والعمل والارتقاء، وصل اللهم وسلم وبارك على من كان لنا رحمة وشفاء سيدنا
محمد وعلى وصحبه جزاهم الله عنا خير الجزاء.

شكر وتقدير

قال تعالى: "لَئِن شَكَرْتُمْ لَأَزِيدَنَّكُمْ"

نحمد الله عز وجل ونشكره على ما أنعم به علينا من توفيق وتسديد، إذ أضاء لنا طريق العلم والمعرفة، ووفقنا إلى إتمام هذا العمل، فله الحمد أولاً وآخراً، ظاهراً وباطناً.

نعبر عن بالغ شكرنا وعظيم امتناننا لكل من أسهم، من قريب أو بعيد، في إنجاز هذه المذكرة، سواء من خلال الدعم المعنوي أو العلمي أو بتذليل الصعوبات التي واجهتنا. ونتوجه بخالص التقدير إلى أستاذنا الفاضل ناصر شعيبية، الذي لم يبخل علينا بتوجيهاته السديدة وملاحظاته القيمة، وكان نعم الداعم والموجه في كل مراحل هذا العمل.

كما لا يفوتنا أن نخص بالشكر الأساتذة والموظفين والإخوة في المخبر، وكل من كان لنا سنداً في مسيرتنا الدراسية، بفضلهم وعونهم كان له بالغ الأثر في تيسير سبل هذا البحث.

وختاماً، نتقدم بخالص الشكر والتقدير لكل من ساهم، بشكل مباشر أو غير مباشر، في تحقيق وإنجاح هذا العمل.

I.....	الإهداء
II	شكر وتقدير
III.....	فهرس المحتويات
VI.....	قائمة الاشكال
VII.....	قائمة الاختصارات والرموز
VIII	قائمة الجداول
11	مقدمة عامة:

الجزء النظري

الفصل الأول : عموميات حول التآكل

13	1.1. عموميات حول التآكل:
13	2.1. تعريف التآكل:
13	3.1. آلية حدوث التآكل:
14	4.1. العوامل المسببة للتآكل :
14	5.1. أنواع التآكل:
15	1.5.1. التآكل الكيميائي:
15	2.5.1. التآكل الكهروكيميائي :
15	3.5.1. التآكل البيولوجي (البكتيري):
16	6.1. أشكال التآكل:
17	7.1. مخاطر التآكل وأضراره:
18	1.7.1. الأضرار الاقتصادية:
18	2.7.1. أضرار التآكل على المنتجات والصحة:
18	3.7.1. أضرار فقدان السلامة:
19	8.1. طرق السيطرة على التآكل:
19	1.8.1. الحماية بالاختيار المناسب للمواد:
20	2.8.1. الحماية بالتغطية:
20	1.2.8.1. التغطية المعدنية:
21	2.2.8.1. التغطية بمواد لعضوية:
21	3.2.8.1. التغطية بمواد عضوية :
22	3.8.1. الحماية من التآكل عبر التصميم الهندسي المناسب :
22	4.8.1. الحماية الكهروكيميائية :
22	1.4.8.1. الحماية الكاثودية:

23	.....الحماية الأنودية: 2.4.8.I
24	.....الحماية باستخدام مثبطات التآكل: 5.8.I
24	.....تعريف مثبط التآكل: 1.5.8.I
25	.....كيف تصنف مثبطات التآكل : 2.5.8.I
25	.....تصنيف مثبطات التآكل حسب وسط الاستعمال: 9.I
25	.....1.9.I مثبطات تُستخدم في الأوساط السائلة:
25	.....1.1.9.I الأوساط المائية:
25	.....2.1.9.I الأوساط العضوية:
25	.....2.9.I مثبطات تُستخدم في الأوساط الغازية:
25	.....10.I تصنيف مثبطات التآكل حسب تأثيرها على التفاعلات الكهروكيميائية الجزئية:
26	.....1.10.I المثبطات المصعدية (الأنودية):
26	.....2.10.I المثبطات المهبطية (الكاثودية):
26	.....3.10.I المثبطات المختلطة:
226	.....11.I تصنيف مثبطات التآكل حسب آلية التفاعل:
26	.....1.11.I التثبيط عن طريق الامتزاز (الادمصاص):
26	.....1.1.11.I الامتزاز الفيزيائي:
27	.....2.1.11.I الامتزاز الكيميائي:
27	.....12.I التثبيط عن طريق الخمولية:
27	.....13.I التثبيط عن طريق الترسيب :
28	.....14.I التثبيط عن طريق إزالة العنصر الأكل:
28	.....15.I تصنيف مثبطات التآكل حسب طبيعتها:
28	.....1.15.I المثبطات غير العضوية:
28	.....2.15.I المثبطات العضوية:
29	.....16.I إيزوثيرم الامتزاز:
29	.....17.I الخصائص الأساسية لمثبطات التآكل:
30	.....II مدخل الى مادة الجيلاتين :
30	.....1.II تاريخ الجيلاتين:
30	.....1.II مفهوم الجيلاتين :
31	.....2.II البنية الكيميائية و الجزئية للجيلاتين:
31	.....3.II الجيلاتين كمثبط للتآكل والجدوى الاقتصادية منه:
32	.....III الفولاذ الكربوني:
32	.....1.III مفهوم الفولاذ الكربوني:
32	.....2.III معالجة الفولاذ الكربوني X52 واستخداماته :
34	.....المراجع والصادر المستعملة في الفصل الاول:

الجزء العملي

الفصل الثاني : الطرق الكهروكيميائية والمواد المستعملة

- I. تمهيد: 38
- 1.I. تعريف التقنيات الكهروكيميائية: 38
- 1.1.I. الفولطا متري الخطي : 38
- 2.1.I. الفولطا متري الحلقي: 38
- 3.1.I. الكرونوأمبيروميتري : 39
- 1.2.I. الاجهزة الكهروكيميائية المستخدمة: 39
- 2.2.I. الخلية الكهروكيميائية: 39
- 3.2.I. الأقطاب : 40
- قطب المساعد (AE): 40
- القطب المرجع (RE): 41
- قطب العمل (WE): 41
- 3.I. التركيب التجريبي المستعمل : 42
- 4.I. المواد المستعملة: 43
- 1.4.I. التجربة الأولى: 43
- 2.4.I. التجربة الثانية: 43
- 5.I. الأدوات المستعملة في التجارب : 43
- قائمة مراجع الفصل الثاني: 44

الفصل الثالث :تحليل ومناقشة النتائج

- I. التجربة الأولى: 46
- 1.I. طريقة الغمس: 46
- 1.1.I. قياس جهد التوازن لمدة ساعة: 46
- 2.1.I. منحني الاستقطاب: 47
- 3.1.I. منحني تفال: 48
- II. التجربة الثانية: 50
- 1.II. طريقة الغمس: 51
- 1.1.II. قياس جهد التوازن لمدة ساعة : 51
- 2.1.II. منحني الاستقطاب: 51
- 3.1.II. منحني تفال (Tafel) : 52
- III. طريقة التثبيت: 54
- 1.1.III. التجربة الأولى: 54
- 2.1.III. منحني كرونوأمبيروميتري: 54
- 3.1.III. قياس جهد التوازن: 55

56	..... 4.1.III منحنى الاستقطاب :
57	..... 5.1.III منحنى تفال (Tafel):
58	..... 2.III التجربة الثانية :
58	..... 1.2.III منحنيات كرونوأمبيرومترية:
59	..... 2.2.III منحنى الإستقطاب لمدة ساعة :
60	..... 3.2.III منحنى تفال (Tafel):
63	..... خاتمة عامة:
64	..... الملخص:

قائمة الأشكال

23	..... الشكل (1.I): منحنى السلوك الكهروكيميائي للمعدن بوجود المثبط الكاثودي ودون وجوده a و b على التوالي.
24	..... الشكل (2.I): منحنى السلوك الكهروكيميائي للمعدن في وجود الحماية الأنودية ودون وجودها a و b على التوالي.
30	..... الشكل (3.I): صورة توضيحية للجيلاتين
31	..... الشكل (4.I): التمثيل الكيميائي للبنية النموذجية للجيلاتين
40	..... الشكل (1.II): صورة للخلية الكهروكيميائية.
40	..... الشكل (2.II): صورة لقطب البلاتين المساعد.
41	..... الشكل (3.II): قطب المرجع RE.
41	..... الشكل (4.II): قطب العمل WE.
42	..... الشكل (5.II): صورة للتركيب التجريبي المستعمل في التجارب.
42	..... الشكل (1.III): قياس جهد التوازن 1: (فولاذ في 20 ملل من ماء البحر) 2: (فولاذ 20 ملل من ماء البحر / 13.8 ملغ من الجيلاتين) لمدة ساعة.
47	..... الشكل (2.III): (منحنى إستقطاب الفولاذ في ماء البحر) 2: (منحنى إستقطاب الفولاذ في ماء البحر بوجود الجيلاتين).
48	..... الشكل (3.III): منحنى تفال 1: (فولاذ / ماء البحر) 2: (منحنى تفال فولاذ / ماء البحر بوجود الجيلاتين).
49	..... الشكل (4.III): قياس جهد التوازن، المنحنى (أ): فولاذ في 15 ملل من محلول NaCl المنحنى (ب): فولاذ في 15 ملل من محلول NaCl / 0.009 غ من الجيلاتين لمدة ساعة.
51	..... الشكل (5.III): (ج): منحنى إستقطاب الفولاذ في محلول NaCl المنحنى (د): منحنى إستقطاب الفولاذ في محلول NaCl بوجود الجيلاتين.
52	..... الشكل (6.III): منحنى تفال (Tafel) المنحنى (و): الفولاذ / محلول NaCl والمنحنى (ي): الفولاذ / محلول NaCl بوجود الجيلاتين.
53	..... الشكل (7.III): جهد توازن الجيلاتين على الفولاذ بالنسبة للقطب المرجعي ((ECS بدلالة الزمن.
54	..... الشكل (8.III): منحنى الكرونوأمبيرومترية (i = f(t) الجهد E = -1000 mV لمدة ساعة.
55	..... الشكل (9.III): منحنى لقياس جهد التوازن بدلالة الزمن لقطب الفولاذ.
56	..... الشكل (10.III): جهد توازن القطب المعدل (فولاذ / جيلاتين) و قطب العمل في وسط مؤكسد (ماء البحر).
56	..... الشكل (11.III): مقارنة منحنى الإستقطاب بين A: القطب المعدل و B: قطب العمل في ماء البحر.
57	..... الشكل (12.III): منحنى تفال Tafel للقطبين فولاذ / جيلاتين، الفولاذ في ماء البحر.
59	..... الشكل (13.III): منحنيات الكرونوأمبيرومترية i = f(t) الجهد (E = -1000 mV).

الشكل (14.III): منحني إستقطاب الفولاذ في محلول (4): منحني إستقطاب الفولاذ في محلول NaCl (5): منحني إستقطاب الفولاذ في 3 % NaCl بوجود الجيلاتين..... 60

الشكل (15.III): منحني تفال (6) (Tafel): الفولاذ / NaCl والمنحني والمنحني (7): الفولاذ / NaCl بوجود الجيلاتين..... 60

قائمة الاختصارات والرموز

السرعة في وجود المثبط.	V
سرعة التآكل في غياب المثبط	V_0
مردود التثبيط	R
تركيز المثبط في الوسط.	C
نسبة تغطية سطح المعدن بجزيئات المثبط	θ
ثابت توازن الامتزاز، ويعكس قوة ارتباط جزيئات المثبط بسطح المعدن	K_{ad}
الفولاذ الكربوني.	X52 Acier
قطب العمل Work Electrode	WE
القطب المساعد Auxiliary Electrode	AE
قطب المرجع.	RE
قطب الكالوميل المشبع (Saturated Calomel Electrode)	ECS
كثافة تيار التآكل في غياب المثبط.	$Lcun$
كثافة التيار بوجود المثبط.	$Lcin$
النسبة المئوية للكفاءة المثبط.	IE%
معامل Tafel الكاثودي.	Bc
معامل Tafel الانودي.	Ba
مقاومة التآكل.	Rp
معامل Coefficient	Coef
تيار التآكل.	$icorr$
سرعة التآكل.	Corrosion
فولاذ في 15 ملل من محلول NaCl	أ
فولاذ في 15 ملل NaCl / 0.009 غ من الجيلاتين.	ب

قائمة الجداول

14	الجدول (1.I): العوامل المؤثرة على التآكل
20	الجدول (2.I): أشكال التآكل
20	الجدول (3.I): الوسط والمادة المناسبة له
53	الجدول (2. II): نتائج منحنى تفال

مقدمة عامة

مقدمة عامة:

يُعتبر التآكل من المشاكل الهندسية والبيئية الكبيرة التي تواجه الصناعات المختلفة ، حيث يشمل العديد من المجالات مثل : النفط و الغاز والصناعات البحرية و الطاقة و الإنشاءات ويعتبر من التأثيرات السلبية على المعدات والأنظمة المعدنية. يحدث التآكل عندما يتفاعل المعدن مع العوامل البيئية مثل الرطوبة و الأوكسجين و الأملاح أو المواد الكيميائية الأخرى ، مما يؤدي إلى فقدان المادة المعدنية لجزء من كتلتها وصلابتها وهذه العملية قد تؤدي إلى تدهور الأداء الوظيفي للمعدات وزيادة التكاليف المتعلقة بالصيانة والإصلاح، وفي بعض الأحيان إلى فشل المعدات تمامًا .

التآكل لا يقتصر على التأثير المادي المباشر على المعدن فحسب بل يمتد ليشمل العديد من الجوانب الأخرى مثل التأثيرات الاقتصادية ، البيئية ، فعلى سبيل المثال ، يمكن أن يؤدي التآكل إلى فشل في الأنابيب أو الهياكل المعدنية المستخدمة في نقل المواد الحيوية مثل النفط أو الغاز وهذا ما يشكل خطرًا بيئيًا شديدًا بسبب التسربات، كما يمكن أن يتسبب في تدهور أداء المعدات المستخدمة في الصناعات المختلفة ، ما يؤدي إلى توقف العمل بشكل غير مرغوب فيه وتكاليف صيانة جد عالية. الأضرار الناجمة عن التآكل لا تقتصر على الخسائر الاقتصادية ، بل تعد أيضًا تهديدًا مباشرًا للسلامة العامة. فالتآكل قد يؤدي إلى انهيار الهياكل المعدنية في المباني ، الجسور، السفن، أو حتى الطائرات، مما يشكل خطرًا حقيقيًا على حياة البشر. لمواجهة مشكلة التآكل، تم تطوير العديد من الحلول الكيميائية المعروفة بالمثبطات ، وهي مواد تضاف إلى العناصر التي تكون عرضة للتآكل لتقليل تأثيرات التفاعل بين المعدن والبيئة. المثبطات تعمل على إعاقة أو تقليل سرعة التفاعل الكيميائي بين المعدن والمادة المسببة للتآكل. تنقسم المثبطات إلى عدة أنواع، مثل المثبطات العضوية والمثبطات غير العضوية. المثبطات العضوية تشمل المركبات التي تحتوي على حلقات عطرية أو مجموعات كيميائية يمكنها التفاعل مع سطح المعدن لتشكيل طبقة حماية، أما المثبطات غير العضوية فتشمل المواد التي تحتوي على معادن أو مركبات غير عضوية والتي تعمل عن طريق تشكيل طبقة عازلة على سطح المعدن.

رغم فعالية العديد من مثبطات التآكل الكيميائية، إلا أن بعضها يسبب آثارًا سلبية على البيئة وصحة الإنسان. لذلك يتجه البحث العلمي نحو تطوير مثبطات طبيعية وآمنة. يُعد الجيلاتين من البدائل الواعدة، كونه بروتينًا مشتقًا من الكولاجين يتميز بقدرته على تكوين أغشية واقية فوق سطح المعدن. هذه الأغشية تقلل من تفاعل المعدن مع العوامل المسببة للتآكل. كما أن الجيلاتين يتميز بكونه مادة صديقة للبيئة، غير سامة، ومنخفضة التكلفة. وقد أثبتت الدراسات فعاليته في البيئات الحامضية والمائية، مما يجعله مناسبًا لتطبيقات صناعية متعددة. حيث قُمنّا بتقسيم هذا البحث إلى ثلاثة فصول :

● **الفصل الأول:** يتضمن هذا الجزء دراسة عامة لظاهرة التآكل وطرق الحماية منها، مع التركيز على دور المثبطات. كما يشمل تعريفًا بمادة الجيلاتين وخصائص الفولاذ الكربوني X52.

● **الفصل الثاني:** تعرفنا فيه على الطرق الكهروكيميائية والمواد المستعملة.

● **الفصل الثالث:** دراسة مقارنة وتحليل بياني لنتائج تجربتين:

التجربة الأولى: تناولنا فيها دراسة تثبيط التآكل باستعمال الجيلاتين في ماء البحر.

التجربة الثانية: تناولنا فيها دراسة تثبيط التآكل باستعمال الجيلاتين في محلول NaCl بتركيز 3%.

الدراسة النظرية

I. تمهيد: تعتبر مشكلة التآكل من التحديات الكبيرة التي تواجه العديد من الصناعات، بدءًا من صناعة النفط والغاز، مرورًا بالصناعات البحرية، وصولًا إلى البناء والمعدات الثقيلة، بالإضافة إلى التأثيرات المادية على المعدات، يسبب التآكل أيضًا خسائر اقتصادية ضخمة نتيجة للصيانة المستمرة، وتجديد الأجزاء التالفة، إضافة إلى تزايد المخاطر البيئية التي قد تنشأ نتيجة لتسربات المواد أو فشل المعدات، وبسبب هذه التأثيرات السلبية، أصبح البحث عن حلول فعالة للتقليل من التآكل أمرًا ضروريًا. من أبرز هذه الحلول استخدام المواد المثبطة للتآكل، وهي مواد تعمل على إعاقة أو تقليل سرعة عملية التآكل. في هذا السياق بدأ الباحثون في دراسة مواد طبيعية وآمنة بيئيًا مثل الجيلاتين التي قد تكون بديلًا مثيّرًا للاهتمام للمثبطات التقليدية.^[1]

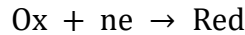
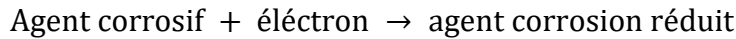
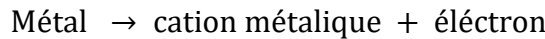
1.1. عموميات حول التآكل :

2.1. تعريف التآكل:

يعرف التآكل بأنه تلف المادة (المعدن) نتيجة لتفاعل كيميائي أو كهروكيميائي مع الوسط المحيط به، أو هو عملية تلقائية طبيعية يتم فيها إعادة المعدن إلى حالته الطبيعية الثابتة (الحالة الخام) التي كان عليها في الطبيعة قبل استخلاصه وهو تفاعل غير عكوس. هذا وتجدر الإشارة إلى أن مفهوم الصدأ يعتبر خاطئًا لأن الصدأ هو المادة الناتجة عن التآكل (أكسيد الحديد) فقط.^[1]

3.1. آلية حدوث التآكل:

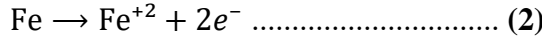
السبب الذي يؤدي إلى عملية التآكل هو عدم إستقرار للمعدن، وبسبب تأثير الطاقة الحرة (Free Energy) فإن المعادن تميل للعودة إلى حالاتها الأصلية الخام التي كانت عليها قبل استخلاصها وينشأ التآكل نتيجة التفاعل الذي يحدث بين المعدن و الأجواء المحيطة به سواء كانت سائلة أو غازية ، فتحدث أكسدة للمعدن كما يلي:^[2]



و يفسر هذا بانتقال الأيونات من جزء إلى آخر في المعدن ، وبالإمكان تقسيم التفاعل الكهروكيميائي إلى قسمين من التفاعلات الجزئية أحدهما يمثل الأكسدة (وهي عملية فقدان ذرات المعدن لعدد من الإلكترونات) والآخر يمثل الاختزال (الارجاع) وهي عملية اكتساب الإلكترونات. طبقًا للنظرية الكهروكيميائية ينقسم تفاعل التآكل بالكامل إلى قطب الأنود وقطب الكاثود، ويحدث التآكل بشكل آني على السطوح المعدنية. إن تدفق التيار الكهربائي من مساحة الأنود إلى مساحة الكاثود قد يولد خلايا تآكل موقعيه تبدأ إما على سطح معدني واحد بسبب اختلاف فرق الجهد، وتسمى خلية التآكل المجهرية (Corrosion micro cellulaire) أو بين سطحين معدنيين فتسمى خلية التآكل العينية أو غير المجهرية (corrosion par effet de macrocellule) بشرط وجود الألكتروليت في كلتا الحالتين الذي يمكن أن يكون ماء

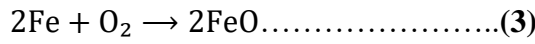
الفصل الأول: عموميات حول التآكل

الشرب أو ماء مالح أو الحوامض والقواعد أو الرطوبة السطحية. يعد المعدن متصدي عند تحول ذرة المعدن النشط (الأنود) إلى أيون المعدن بفقدانها واحد أو أكثر من إلكتروناتها. يحدث تآكل الحديد (Fe) عند توفر الظروف المناسبة لذلك وهي الأوكسجين والرطوبة، أو المحاليل الكيميائية، وتتضمن تعرض مساحة الأنود لتأثير الألكتروليت الذي يزيل حالة التبادل الكيميائي عنها بفقدان واحد أو أكثر من إلكتروناتها. تفقد ذرة الحديد غير القابلة للذوبان في الألكتروليت اثنين من إلكتروناتها وبذلك تتحول ذرات الحديد إلى أيونات الحديد (Fe) كما في المعادلة التالية التي تحدث عند قطب الأنود:^[3]

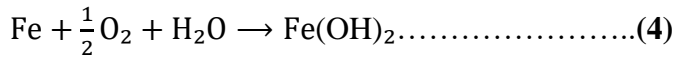


وكذلك هنالك جملة من التفاعلات الكيميائية التي توضح العديد من أنواع التآكل منها:

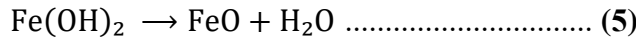
1 : اتحاد معدن فلزي بمادة لا فلزية دون أن يشترك الماء في هذا التفاعل :



2. اتحاد الفلز مع الأوكسجين مع وجود الماء مثل صدأ الحديد :



وغالبا ما يتحول $\text{Fe}(\text{OH})_2$ إلى (FeO) أو (Fe_2O_3) :^[3]



4.I العوامل المسببة للتآكل :

إن تأثير العوامل التي تسبب التآكل كثيرة، تكون مرتبطة بطبيعة المعدن والوسط المحيط و بظروف الاستعمال ومن أهم العوامل التي تتسبب في التآكل تم تلخيصها في الجدول التالي:^[2]

ظروف الاستعمال	الوسط	طبيعة المعدن ونوعه
1-شكل العينة.	1-طبيعة الوسط.	1-التركيب الكيميائي
2-حالة السطح.	2-تركيبية الوسط الغازي أو السائل.	2-طريقة التحضير
3-درجة الحرارة.	3-الشروط التيرموديناميكية.	3-المعالجة الحرارية.
4-الإجهاد الميكانيكي.	4- إضافة المثبط.	4-المعالجة الميكانيكية.

الجدول (1-I) : العوامل المؤثرة على التآكل.

5.I أنواع التآكل:

ينقسم التآكل إلى عدة أنواع تبعًا لطبيعة الوسط المسبب له، من بين هذه الأنواع:

1.5.I. التآكل الكيميائي:

يُطلق هذا المصطلح على كل حالات التآكل التي تحدث نتيجة تفاعل كيميائي مباشر بين المعدن والعوامل المُهاجمة ، دون أن يكون هناك انسياب ملحوظ للتيار الكهربائي خلال المعدن.^[5] وعلى الرغم من أن هذا النوع من التآكل لا يتطلب وجود تيار كهربائي قوي، إلا أن بعض القوى الكهربائية قد تشارك بدرجة بسيطة في التفاعل، كما هو الحال في معظم التفاعلات الكيميائية. يحدث التآكل الكيميائي غالبًا نتيجة تفاعل المعدن مع بعض الغازات النشطة مثل ثاني أكسيد الكربون (CO_2) ، كبريتيد الهيدروجين (H_2S) ، والأوكسجين (O_2).^[5]

2.5.I. التآكل الكهروكيميائي :

يُعد هذا النوع من التآكل الأكثر شيوعًا في الطبيعة، ويحدث عادة في الإلكتروليتات وهي المحاليل التي تنقل التيار الكهربائي.

في هذا النوع، تتم عملية التآكل من خلال تفاعلين كهروكيميائيين رئيسيين:

- تفاعل الأكسدة: حيث يفقد المعدن إلكتروناته ويتحوّل إلى كاتيونات معدنية.
- تفاعل الإرجاع: حيث يكتسب العامل المؤكسد هذه الإلكترونات.^[6]

يمكن تبسيط التفاعل العام كما يلي:

معدن ← كاتيونات معدنية + إلكترونات

عامل مؤكسد + إلكترونات ← نواتج التآكل

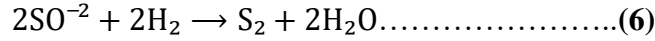
3.5.I. التآكل البيولوجي (البكتيري):

يحدث هذا النوع من التآكل نتيجة نشاط الكائنات الحية الدقيقة (كالبكتيريا)، خصوصًا في أوساط تحتوي على رطوبة وحرارة، وغالبًا ما تكون فقيرة من الأوكسجين O_2 .^[7]

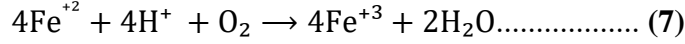
تفرز هذه الكائنات نواتج تؤثر بشكل مباشر على المعادن، مما يسرّع من تلفها. ويُعتبر هذا النوع من التآكل أكثر خطورة من الأنواع السابقة، خصوصًا التآكل الناتج عن البكتيريا المختزلة للكبريتات مثل سلالة *Desulfovibrio*.^[7]

تنشط هذه الكائنات في التربة الغنية بالكبريتات والمواد العضوية ، وقد أظهرت الأبحاث أن هناك نوعين رئيسيين من البكتيريا المسببة للتآكل:

- بكتيريا التفاعلات المهبطة: تستخدم الهيدروجين في نشاطها الحيوي، مما يؤثر على تفاعلات التآكل. مثل التفاعل:^[4]



● بكتيريا التفاعلات التأكسدية: مثل بكتيريا الحديد التي تعمل على أكسدة أيونات الحديد من Fe^{2+} إلى Fe^{3+} ، مؤدية إلى تآكل تدريجي للمعدن مثل التفاعل التالي: [4]



6.I أشكال التآكل:

تتعدد أشكال التآكل حسب طبيعة التفاعل وظروف الوسط، ومن بين أهم هذه الأشكال: التآكل المنتظم، التآكل الموضعي، التآكل النقري، التآكل الشقي، تآكل الحبيبات، التآكل الجلفاني ، والتآكل بالحت والتعرية. سيتم توضيح خصائص كل نوع من هذه الأشكال بالتفصيل في الجدول المرفق.

صورة توضيحية	التعريف	شكل التآكل
	هو التآكل الذي يحدث لمساحات كبيرة لجميع نقاط سطح معدن بنفس المعدل بسرعة ثابتة أي بسمك واحد نتيجة لتفاعل كيميائي بين المعدن ووسط المحيط، وهو النوع الأكثر شيوعاً من الأنواع الأخرى. [1]	التآكل المنتظم (العام)
	هو عملية تكوين نقر أو ثقوب على شكل موضعي نتيجة لتغير قابلية المعدن للحماية في أماكن صغيرة وعدم التجانس في بنية المعدن مما أدى إلى نقص ضئيل في وزن المعدن. [1]	التآكل الموضعي (بالنقر)
	هو تآكل موضعي شديد يتراوح من نخر إلى منطقة متآكلة وواسعة، ينشأ هذا النوع من التآكل بسبب التصميم غير الجيد مع وجود اختلاف في طبيعة الوسط في المنطقة المتآكلة عن بقية أجزاء سطح المعدن مسبباً نشوء خلايا تركيزية مباينة ينشأ عنها خلايا للتآكل من المعدن. [1]	التآكل الصدعي (التكهف)

	<p>يحدث التآكل الغلفاني عندما يوضع معدنين (أو أكثر) غير متشابهين في اتصال (احتكاك كهربائي) في وسط. عندما يتشكل زوج غلفاني فإن أحد معادن هذا الزوج يصبح أنودا ويتآكل بشكل أسرع مما لو كان يتعرض منفرداً لهذا الوسط. أما المعدن الآخر من هذا الزوج يصبح كاثودا ويتآكل بمعدل أبطأ مما لو كان بمفرده في هذا الوسط الأكال. [1]</p>	<p>التآكل الغلفاني</p>
	<p>هو نوع من أنواع التآكل الموضعي الذي يحصل على طول منطقة حدود الحبيبات. يحصل هذا النوع من التآكل نظراً لوجود اختلاف في الخواص البلورية لهذه المنطقة عن المناطق الأخرى، فتكون حدود الحبيبات أكثر نشاطاً للتفاعل مع الوسط من مناطق الحبيبات نفسها. [6]</p>	<p>التآكل بين الحبيبات</p>
	<p>وهو تآكل موضعي شديد يصيب الأجزاء المعدنية في مناطق مغطاة على هيئة مواد معدنية أو كان على هيئة مواد غير معدنية مثل الأقمشة، مواد بلاستيكية، الطلاء ويكون بفعل محلول راكد (الكتروليت) بين الغطاء والمادة المعدنية. [1]</p>	<p>التآكل الشقي</p>
	<p>يعرف هذا النوع من التآكل بالتآكل الذي يصيب سطح العنصر المعدني نتيجة قوة احتكاك بغض النظر عن وجود وسط مساعد على التآكل أو عدم وجود أي أن سبب هذا النوع من التآكل هو سبب ميكانيكي بحت وليس كيميائي، ولكن يمكن القوة الميكانيكية أحيانا عامل مساعد في بعض الأوساط على حصول التآكل. [1]</p>	<p>التآكل بالاحت والتعرية</p>

الجدول (2-I) : أشكال التآكل .

7.I. مخاطر التآكل وأضراره:

التآكل من الظواهر الطبيعية التي تُشكّل خطراً كبيراً على مختلف المنشآت والهيكل المعدنية، تأثيره لا يقتصر فقط على الخسائر المادية، بل يتعداها ليشمل الجوانب البيئية والسلامة العامة. إذ يؤدي إلى تلف المعدات، تقليل كفاءتها، وزيادة

تكاليف الصيانة والاستبدال. كما يساهم في الحوادث الصناعية التي قد تكون خطيرة. ونظرًا لتعدد أضراره، سيتم التطرق في ما يلي إلى أبرز آثار التآكل على مختلف المستويات.^[8]

1.7.I. الأضرار الاقتصادية:

تُعتبر الأضرار الاقتصادية الناتجة عن التآكل من أبرز التحديات التي تواجه مختلف القطاعات الصناعية، فعندما يتسبب التآكل في تلف أحد الأجزاء المعدنية، قد يؤدي ذلك إلى توقف مفاجئ في سير الإنتاج وهو ما يُعرف بالتوقف غير المبرمج، والذي يُكبّد المؤسسات خسائر مالية غير متوقعة نتيجة تعطل الآلات وزيادة وقت التوقف. إضافة إلى ذلك، فإن الصيانة الناتجة عن التآكل تُعد أكثر كلفة مقارنة بالصيانة الروتينية، حيث تتطلب في العديد من الحالات استبدال قطع معدنية بأخرى جديدة، مما يرفع من التكاليف التشغيلية. وفي بعض الأحيان، يكون من الأنسب اقتصاديًا استخدام مواد معدنية ذات مقاومة عالية للتآكل رغم أنها أعلى ثمنًا من المواد الأخرى لأن عمرها الافتراضي أطول ونقل الحاجة لتبديلها باستمرار. وقد أثبتت العديد من الدراسات والتجارب الصناعية أن الاستثمار في مواد مقاومة للتآكل على المدى الطويل يُعد أكثر فعالية من الناحية الاقتصادية من الاعتماد على مواد رخيصة وسريعة التلف، وفي كلتا الحالتين سواء تعلق الأمر بتكاليف الإصلاح أو تكاليف التوقف، فإن التآكل يؤدي إلى أعباء مالية كبيرة.^[8]

2.7.I. أضرار التآكل على المنتجات والصحة:

يُعد التآكل مصدرًا مباشرًا لتلوث المنتجات، خاصة عندما يتسبب في تغيير التركيب الكيميائي للوسط المحيط، مما يؤدي إلى تدهور جودة المنتج في العديد من الصناعات، خاصة الغذائية والدوائية، يُعتبر هذا الأمر غير مقبول تمامًا حيث تتطلب المواصفات التجارية منتجات نقية وخالية من الملوثات.^[8]

من أبرز الأمثلة على ذلك تلوث الأغذية المعلبة بسبب التآكل الجزئي في العلب المعدنية التي تحفظ فيها هذه المواد، حتى وإن كانت درجة التآكل بسيطة، فإنها قادرة على نقل شوائب أو نواتج كيميائية غير مرغوب فيها إلى المحتوى الغذائي.

3.7.I. أضرار فقدان السلامة:

يؤدي التآكل في كثير من الأحيان إلى حصول كوارث إذا لم تُتخذ الإجراءات الوقائية الكفيلة بإيقافه أو الحد منه، فمثلًا: التعامل مع المواد الخطرة مثل الغازات السامة وحمض الهيدروفلوريك، أو الأحماض المركزة كحمض الكبريتيك والنيتريك، إضافة إلى المواد القابلة للاشتعال والمواد المشعة، وكذلك المواد الكيميائية في درجات حرارة وضغط عالين، يتطلب استخدام مواد معدنية خاصة ذات مقاومة عالية للتآكل. في مثل هذه الظروف قد يؤدي حدوث تآكل كبير في الجدار المعدني الفاصل بين الوقود والمؤكسدات كما في حالة الإجهاد الستاتيكي (Stress Retessons) في الصواريخ إلى خلط هذين الوسيطين بشكل مبكر، مما يؤدي إلى خسائر اقتصادية وبشرية جسيمة. وفي كثير من الحالات يمكن أن يتسبب تآكل بسيط في قطعة معدنية صغيرة في انهيار منشأة كاملة، كما أن نواتج التآكل قد تؤدي أحيانًا إلى تحوّل مواد غير ضارة إلى مواد متفجرة، وتبرز هنا أهمية التآكل من جانب السلامة الصحية مثل تلوث مياه الشرب نتيجة تآكل الأنابيب أو خزانات المياه، إضافة إلى ذلك يلعب التآكل دورًا مهمًا وأساسيًا في اختيار المواد المعدنية التي

تُستخدم في صناعة الأجزاء المزروعة داخل جسم الإنسان مثل مفاصل الورك، الصمامات القلبية، والصفائح الطبية، حيث أن حدوث أي تآكل فيها قد يسبب مضاعفات صحية خطيرة ومميتة أحياناً. [8]

8.I طرق السيطرة على التآكل:

التآكل من أخطر التحديات التي تواجه المواد المعدنية لما لها من آثار سلبية جسيمة على مستوى الاقتصاد الوطني، فإذا لم تُتخذ التدابير اللازمة للحد منها فإنها قد تؤدي إلى خسائر كبيرة نتيجة تلف المعدات، زيادة استهلاك الطاقة، وإهدار الكثير من الوقت في عمليات الصيانة والإصلاح، ورغم الجهود الكبيرة والإجراءات المتبعة عالمياً لمكافحة هذه الظاهرة إلا أن التآكل ما زال يتسبب في خسائر ضخمة. وتشير التقديرات إلى أن نحو ثلث الإنتاج العالمي من الحديد والفولاذ يتعرض للتلف بفعل التآكل. وفقاً لدراسة نُشرت في عام 1986 بعنوان "التأثيرات الاقتصادية للتآكل المعدني في الولايات المتحدة" من قبل المعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا (NIST)، قُدِّرَت الخسائر الاقتصادية المباشرة الناتجة عن التآكل في الولايات المتحدة بحوالي 126 مليار دولار في عام 1982، وهو ما يعادل نحو 4.2% من الناتج القومي الإجمالي آنذاك. [9]

تُعد هذه الدراسة من أوائل الدراسات الشاملة التي سلطت الضوء على العبء الاقتصادي الكبير للتآكل، وقد أسهمت في رفع الوعي بأهمية استراتيجيات الوقاية والصيانة في مختلف القطاعات الصناعية.

وفي ذات السياق تقدر الجمعية الوطنية لمهندسي التآكل (NACE International)، في تقرير نُشر عام 2016، أن الخسائر العالمية الناجمة عن التآكل تقارب 2.5 تريليون دولار أمريكي سنوياً، وهو ما يشكل 3.4% من الناتج المحلي الإجمالي العالمي (GDP) في عام 2013. [30]

لذلك، فإن عملية الحماية من التآكل تتمثل أساساً في تقليل العوامل المؤدية إليه أو إزالتها قدر المستطاع، أو على الأقل الحد من تأثيرها إلى مستويات ضئيلة جداً. ويمكن تصنيف إجراءات الحماية الأساسية ضد التآكل كما يلي: [9]

- ❖ الحماية بالاختيار المناسب للمواد.
- ❖ الحماية بالتغطية.
- ❖ الحماية بالتصميم الهندسي المناسب.
- ❖ الحماية الكهروكيميائية.
- ❖ الحماية باستخدام المثبط.

1.8.I الحماية بالاختيار المناسب للمواد:

لا توجد مادة معدنية مقاومة تماماً للتآكل، لكن هناك العديد من المواد التي تُظهر مقاومة عالية في ظروف معينة، غير أن هذه المواد غالباً ما تكون باهظة الثمن، ولهذا السبب لا تُستخدم لصناعة جميع الأجزاء، بل تُخصص فقط للمكونات الأكثر عرضة للتآكل أو ذات الأهمية الخاصة، وعند اختيار المادة يجب الموازنة بين مقاومتها للتآكل من جهة وتكلفتها

الفصل الأول: عموميات حول التآكل

الاقتصادية من جهة أخرى، فالمثالية تكمن في اختيار مادة توفر مستوى مقبولاً من الحماية مع الحفاظ على الجدوى الاقتصادية للمشروع. [9]

المادة المناسبة	الوسط
سبائك النحاس والنيكل	الأوساط المرجعية مثل الأحماض الخالية من الهواء والمحاليل المائية
سبائك الكروم	الظروف المؤكسدة
التييتانيوم وسبائكه	الظروف المؤكسدة القوية جداً
الستانلس ستيل	حمض النيتريك
النيكل وسبائكه	المحاليل شديدة القلوية
الرصاص	حمض الكبريت المخفف
الألمنيوم	الأحوال الجوية غير المسببة للتصنعات
الزركونيوم	الوسائط الغنية بالكلوريدات أو الفلوريدات
البلاتين	البيئات شديدة التآكل والحرارة العالية

الجدول (3-I) : الوسط والمادة المناسبة له [9]

2.8.I. الحماية بالتغطية:

تُعدّ الحماية بالتغطية إحدى الوسائل الفعالة للحد من تآكل المعادن، حيث تعتمد على فصل المعدن عن الوسط المؤثر من خلال تطبيق طبقة رقيقة ذات مقاومة عالية، تعمل على منع التلامس المباشر بين السطح المعدني والوسط المحيط. وتُصنّف التغطية وفقاً لطبيعة المادة المستخدمة إلى الأنواع الآتية [10].

1.2.8.I. التغطية المعدنية :

تعتمد على ترسيب طبقة من معدن آخر مقاوم للتآكل على سطح المعدن المراد حمايته وتنقسم إلى : التغطية المصعدية و المهبطية.

➤ التغطية المصعدية:

تقوم هذه الطريقة على استخدام معدن تغطية يمتلك جهداً كهربائياً أقل من جهد المعدن الأساسي، مما يؤدي إلى حماية المعدن من التفاعل مع الوسط المحيط، فيتآكل تدريجياً لحماية المعدن الأساسي. من أبرز سلبيات هذا النوع من التغطية هو سرعة تآكل المعدن المستخدم في الحماية، مما يستدعي استخدام طبقة تغطية أكثر سماكة مقارنة بالتغطية المهبطية، إلا أن زيادة السماكة قد تكون غير مجدية من الناحية الاقتصادية، بالإضافة إلى مساهمتها في زيادة وزن المعدن المحمي. [10]

➤ التغطية المهبطية:

في هذا النوع من الحماية ، يُستخدم معدن تغطية يمتلك جهداً كهربائياً أعلى من جهد المعدن الأساسي المراد حمايته. وتُعد هذه الطريقة فعالة في ظروف التشغيل العادية، غير أن حدوث خدوش أو تشققات في طبقة التغطية قد يؤدي إلى نتائج عكسية ، إذ يتحول المعدن الأساسي عندها إلى مصعد ويتعرض للتآكل ، وهو تآكل يكون أكثر حدة وعمقاً ، مما يؤدي إلى تكوّن نقرات أو حفر موضعية قد تُلحق أضراراً بالغة بالمعدن المحمي. لذا عند تطبيق التغطية المهبطية ، من الضروري الحرص على إنتاج طبقة خالية تماماً من المسام أو العيوب ، نظراً لما تُشكله هذه العيوب من خطر كبير على فعالية الحماية. تُستخدم هذه الطريقة في حماية معادن مثل الحديد والفولاذ ، باستخدام معادن مثل القصدير (Sn) ، النحاس (Cu) ، أو الرصاص (Pb) ، حيث تُعد عملية قصرة الحديد (طلاؤه بطبقة من القصدير) من أكثر تطبيقات التغطية المهبطية شيوعاً خصوصاً في صناعة العلب الغذائية المحفوظة. في هذا السياق، يكون الحديد هو المصعد، بينما القصدير يعمل كـ مهبط. وبالتالي، في حال تعرض الطلاء القصديري إلى خدش، يبدأ الحديد بالتآكل بسرعة كبيرة، ما قد يؤدي إلى فقدان الحماية وانهايار الطبقة المغلفة. [10]

2.2.8.I. التغطية بمواد لاعضوية:

تُعدّ هذه التغطية من الوسائل الفعّالة في مقاومة الحرارة ، كما أنها غالباً ما تتمتع بمقاومة جيدة للمواد الكيميائية ، وبشكل عام يُطلى المعدن بطبقة من الخزف، الزجاج، أو الأكاسيد المعدنية. إلا أن هذا النوع من الطلاء يُعد هشاً ، إذ لا يقاوم الصدمات بشكل كافٍ، مما يجعله سريع الكسر ولتقادي حدوث تشققات في الطلاء، يجب أن يكون معامل التمدد الحراري للمادة الطلانية قريباً من معامل التمدد الحراري للمعدن المُغطى. أما بالنسبة للمعالجة ، فمُعالج قطعة الفولاذ المراد حمايتها في محلول يحتوي على حمض الفوسفور وبعض أملاح الفوسفات المعدنية، مثل فوسفات الحديد والمغنيزيوم عند درجة حرارة تقارب 100° مئوية، تتكون على سطح الفولاذ طبقة رمادية اللون من مركب فوسفات الحديد الثلاثي $FePO_4$ ، وهي طبقة توفر حماية محدودة بحد ذاتها، لكنها تُشكّل قاعدة ممتازة لتطبيق طبقات إضافية من الدهانات أو الورنيش، لاسيما تلك ذات السماكة الصغيرة . تستخدم هذه الطريقة في حماية أنابيب النفط حيث يُعتمد على مادة لاصقة تحتوي على حمض الفوسفور (H_3PO_4) لتأمين التصاق جيد للطبقات وتحقيق فعالية أفضل في الحماية. [10]

3.2.8.I. التغطية بمواد عضوية :

تُعدّ الطلاءات العضوية غير مناسبة للظروف التي تتطلب مقاومة درجات حرارة مرتفعة، إذ لا تتحمل هذه الطلاءات مثل تلك الظروف. وتشمل هذه الفئة من المواد: الدهانات، الراتنجات، الورنيشات، وفي بعض الحالات يُستخدم الإسفلت وبعض أنواع الشحوم. تُعدّ المعالجة الأولية لأسطح المعادن خطوة حاسمة في ضمان جودة الطلاء العضوي، إذ يجب تنظيف السطح المعدني من الصدأ والطبقات الناتجة عن التآكل أو الأكسدة، بالإضافة إلى إزالة الأوساخ والدهون العالقة. بعد ذلك يُطبق على المعدن طلاء أساسي مانع مضاف للتأكسد، وغالباً ما يُستخدم لهذه الغاية أكسيد الرصاص الأحمر (Pb_3O_4). [10]

تُشكّل الطبقة الأساسية حاجزًا سلبيًا يحسّن خصائص المعدن من حيث مقاومته للعوامل البيئية، ويمكن أن تُضاف طبقة أو أكثر من الطلاء فوقها. كذلك يمكن حماية المعدن بطبقة رقيقة من بعض المواد البوليميرية التي تمنع نفاذ الغازات أو الماء إلى سطح المعدن. وإلى جانب دورها الوقائي الأساسي، تساهم هذه الطبقات في تحسين الأداء العام لعملية الحماية. [10]

3.8.I. الحماية من التآكل عبر التصميم الهندسي المناسب :

يمكن الحد من ظاهرة التآكل والتقليل من آثارها من خلال اختيار تصميم هندسي مناسب يؤخذ بعين الاعتبار مجموعة من النقاط المهمة أبرزها:

- تجنب استخدام معدنين غير متماثلين عند ربط القطع، إلا إذا كان هناك تقارب في الجهد الغلفاني بينهما، بحيث لا يتجاوز فرق الكمون الكهربائي ΔE مقدار 0.55 فولت. فكلما قل هذا الفرق، كلما قلت فرصة تشكل خلية غلفانية تؤدي إلى التآكل. [8]

- الاعتماد على وسائل ربط مناسبة، مثل اللحام أو اللصق، بدلاً من استخدام البراغي أو البرشام، وذلك لتقليل الفجوات التي قد تتجمع فيها الرطوبة أو الشوائب المسببة للتآكل.

- في حال الضرورة لاستخدام معدنين مختلفين، يُوصى بعزلهما عن بعضهما باستخدام مواد عازلة تمنع التلامس المباشر، وبالتالي تعوق تشكل الخلية الغلفانية.

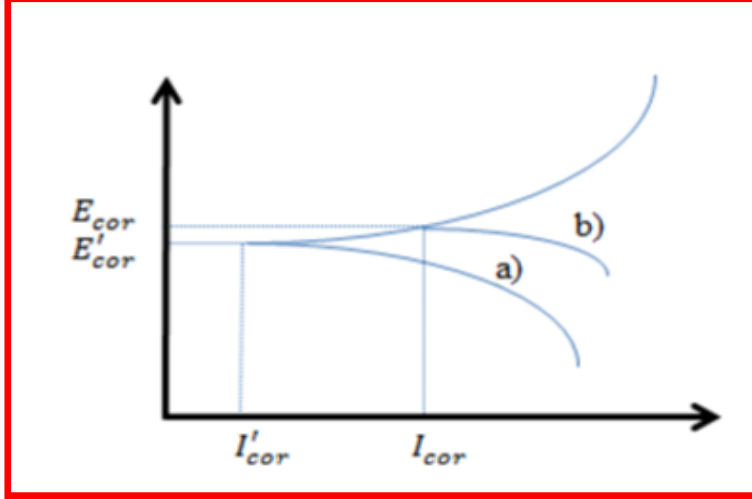
- التحكم في مساحة المعدنين، إذ يُفضل أن تكون مساحة المهبط (المعدن النبيل) أصغر من مساحة المصعد (المعدن القابل للتآكل). في حال العكس، أي إذا كانت مساحة المهبط أكبر، فإن المعدن المصعد سيتآكل بسرعة أكبر نتيجة للخلل في التوازن الكهربائي داخل الخلية الغلفانية.

4.8.I. الحماية الكهروكيميائية :

1.4.8.I. الحماية الكاثودية:

تُعد الحماية الكاثودية من الأساليب الفعالة للحد من التآكل، وتعتمد فكرتها الأساسية على تزويد المعدن المعرض للتآكل بشحنة كهربائية سالبة مستمرة، مما يحوله إلى مهبط (كاثود) في خلية كهروكيميائية، وبالتالي يُمنع فقدان الإلكترونات منه، أي يُمنع حدوث التآكل. يتم تأمين هذه الشحنة السالبة عبر مصدر طاقة كهربائي خارجي مباشر، وغالبًا ما يُستخدم في هذا النظام ما يُعرف بمصدر التيار المباشر (DC) الذي يُوصل بين المعدن المراد حمايته (الكاثود).

تُستخدم الحماية الكاثودية بشكل واسع في حماية خزانات الوقود، وخطوط أنابيب النفط والغاز المدفونة تحت سطح الأرض، حيث تُعد هذه المواقع من أكثر الأماكن عرضة للتآكل بسبب الرطوبة ووجود الأملاح والترربة الموصلة للكهرباء. [8]

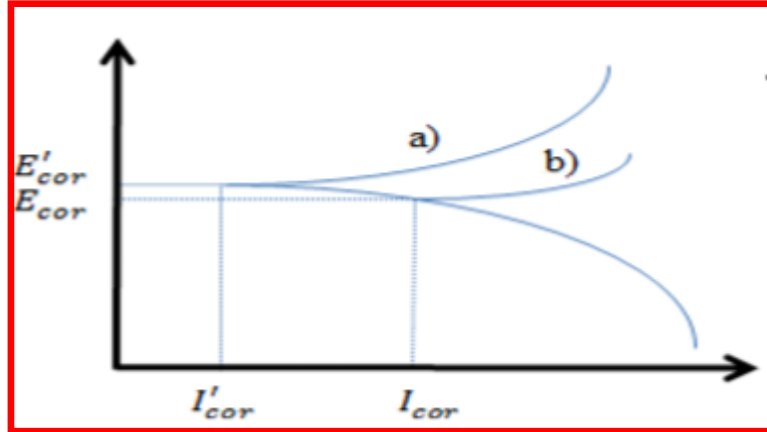


الشكل (I-1): منحنى السلوك الكهروكيميائي للمعدن بوجود المثبط الكاثودي ودون وجوده a و b على التوالي.

2.4.8.I الحماية الأنودية:

تُعتبر الحماية الأنودية (أو الحماية بالتضحية) من الوسائل الكهروكيميائية المستخدمة لمنع تآكل المعادن، وخصوصاً في الهياكل المعدنية المغمورة في الماء أو المدفونة تحت الأرض، تقوم هذه الطريقة على استخدام أنود مصنوع من معدن أكثر نشاطاً كيميائياً من المعدن المراد حمايته، مثل الزنك أو المغنيسيوم أو الألمنيوم. عندما يتم ربط المعدنين كهربائياً يتصرف المعدن النشط كأنود، بينما يتحول المعدن الأقل نشاطاً إلى كاثود، وبالتالي يُمنع تآكله. يبدأ الأنود بالتآكل تدريجياً لأنه يتخلى عن إلكتروناته، وهو ما يُعرف "بأنود التضحية". ولضمان استمرارية الحماية، يجب استبدال الأنود بشكل دوري عند استهلاكه بالكامل أو فقدان فعاليته.^[8]

تُستخدم هذه الطريقة بشكل شائع في حماية الأنابيب، خزانات المياه، السفن، وأعمدة الموانئ، لما توفره من حماية مستمرة وبسيطة التطبيق في البيئات الرطبة أو عالية الملوحة. تُعد الحماية الأنودية حلاً اقتصادياً وفعالاً، خاصة في المنشآت التي يصعب فيها توفير مصدر طاقة خارجي مستمر كما هو الحال في الحماية الكاثودية التقليدية.^[8]



الشكل (I-2): منحني السلوك الكهروكيميائي للمعدن في وجود الحماية الأنودية ودون وجودها a و b على التوالي.

5.8.I. الحماية باستخدام مثبتات التآكل:

للتغلب على هذه المشكلة يتم استخدام طريقة أخرى من الحماية وذلك باستخدام مثبتات التآكل تضاف للوسط الأكال لحماية المعدن وتختلف باختلاف تصنيفاتها وآلية عملها.^[11]

1.5.8.I. تعريف مثبت التآكل:

المثبت هو مادة كيميائية أو مزيج من المواد، تُضاف إلى الوسط المتآكل بتركيزات منخفضة جدًا (تُقاس غالبًا بجزء واحد في المليون ppm) بهدف تقليل معدل تآكل المعدن بشكل فعال. ويُعرّف أيضًا بأنه كل مادة تُضاف إلى لتر واحد من الوسط الأكال بغرض تقليل أو إزالة تأثير التآكل دون أن تُحدث تغييرًا في خصائص المعدن أو الوسط أو تؤثر على نواتج التفاعل الكيميائي.^[11]

يُقاس مدى فعالية المثبط من خلال مردود التثبيط، والذي يُعبّر عنه بالعلاقة التالية^[12]:

$$R = \frac{(V_0 - V)}{V_0} * 100(\%)$$

حيث:

V_0 : سرعة التآكل في غياب المثبط.

V : السرعة في وجود المثبط.

2.5.8.I. كيف تصنف مثبطات التآكل :

- وسط استعمالها.
- تأثيرها على التفاعلات الكهرو كيميائية الجزئية.
- آلية التفاعل.
- طبيعتها

9.I. تصنيف مثبطات التآكل حسب وسط الاستعمال:

يمكن تصنيف مثبطات التآكل وفقا لوسط استخدامها إلى نوعين رئيسيين [13] :

1.9.I. مثبطات تُستخدم في الأوساط السائلة:

1.1.9.I. الأوساط المائية:

تُستخدم أنواع مختلفة من مثبطات التآكل في الأوساط المائية، حيث تختلف طبيعة المثبط حسب طبيعة الوسط. فهناك مثبطات مخصصة للأوساط الحمضية، وأخرى موجهة للاستخدام في الأوساط المعتدلة، وذلك بهدف تقليل التفاعل بين الوسط والمعدن، وبالتالي إبطاء عملية التآكل. [13]

2.1.9.I الأوساط العضوية:

تُستخدم كميات معتبرة من مثبطات التآكل في الأوساط العضوية لا سيما في الزيوت ومشتقاتها مثل زيوت التشحيم والوقود، وتُساهم هذه المثبطات في حماية الأجزاء المعدنية الداخلية للمحركات من التآكل الناتج عن الاحتكاك ودرجات الحرارة المرتفعة.

2.9.I. مثبطات تُستخدم في الأوساط الغازية:

تُستعمل هذه المثبطات لحماية الأجهزة الدقيقة والحساسة، بالإضافة إلى المكونات الإلكترونية، أثناء عمليات التخزين أو النقل، وتكمن أهميتها في الحد من تأثير العوامل الجوية، خاصة الرطوبة التي تُعد من المسببات الرئيسية للتآكل في هذه الحالات. [13]

10.I. تصنيف مثبطات التآكل حسب تأثيرها على التفاعلات الكهروكيميائية الجزئية:

تُقسم مثبطات التآكل، بناءً على آلية تأثيرها على التفاعلات الكهروكيميائية، إلى ثلاث فئات رئيسية:

1.10.I. المثبطات المصعدية (الأنودية):

هي مركبات تتفاعل في البداية مع نواتج التفاعل الأنودي الناتجة عن تآكل المعدن، ثم تعمل على تكوين طبقة واقية على سطح المعدن، تمتاز هذه الطبقة بكونها متماسكة وغير قابلة للذوبان في وسط التآكل، مما يؤدي إلى تقليل معدل التآكل عند المصعد ومنع استمراره. [14]-[15]

2.10.I. المثبطات المهبطية (الكاثودية):

تعمل هذه المثبطات على إيقاف أو تقليل التفاعل الكاثودي، وذلك بفضل طبيعتها القلوية التي تساعد على تكوين مركبات غير قابلة للذوبان في المواقع الكاثودية، تؤدي هذه المركبات إلى رفع مقاومة سطح المعدن للتآكل، وتُشكل عائقًا يحول دون استمرارية التفاعل. [12]-[14]

3.10.I. المثبطات المختلطة:

وهي مثبطات عضوية تؤثر على كل من التفاعل المصعدي والمهبطي معًا، تعمل من خلال امتزازها على سطحي المصعد والمهبط، ما يؤدي إلى عزل المعدن عن الوسط المتآكل، وبالتالي تقل كثافة التيار الكهربائي الناتج عن كلا التفاعلين، كما تساهم في منع انبعاث أيون الهيدروجين من المهبط وأيون المعدن من المصعد، مع إحداث تغيير طفيف في كمون التآكل. [16]

11.I. تصنيف مثبطات التآكل حسب آلية التفاعل:

يمكن تصنيف آليات تثبيط التآكل وفقًا لنوع التفاعل الحاصل بين المثبط والمعدن إلى عدة أنواع رئيسية كما يلي:

1.11.I. التثبيط عن طريق الامتزاز (الادمصاص):

الامتزاز هو العملية التي تلتصق فيها جزيئات المثبط على سطح المعدن (الماز)، مكونة طبقة واحدة أو عدة طبقات مترابطة، وتتعلق كمية المادة الممتزة بعدة عوامل، من بينها البنية الكيميائية للجزيء ودرجة حرارة المحلول، يُصنف الامتزاز إلى نوعين رئيسيين [1]-[15]-[17]:

1.1.11.I. الامتزاز الفيزيائي :

يُعد ظاهرة تلقائية باعثة للحرارة، حيث تتشكل الروابط بين جزيئات المثبط وسطح المعدن عبر قوى إلكتروستاتيكية ضعيفة، دون تغيير في هوية الجزيئات الممتزة. ويمكن تمييز ثلاث أنواع من القوى المسؤولة عن هذا النوع من الامتزاز:

- قوى فان دير فال (Van der Waal) قوى انتشار موجودة دائمًا.
- القوى القطبية: ناتجة عن وجود حقل كهربائي بين المثبط وسطح المعدن.

- الروابط الهيدروجينية: تنتج من وجود مجموعات مثل الهيدروكسيل أو الأمين في تركيبة المثبط. [18-15]

1.1.1.11.I خصائص الامتزاز الفيزيائي:

- حرارة الامتزاز منخفضة حيث تصل إلى حوالي 50kj/mol.
- عملية عكوسة وتصل إلى حالة الاتزان بسرعة عند تغير درجة الحرارة أو الضغط.
- يمكن أن تتكون عدة طبقات حيث تكون الطبقة الأولى أكثر تماسكًا من الطبقات التالية. [16]

2.1.11.I. الامتزاز الكيميائي:

يختلف عن الامتزاز الفيزيائي من حيث الآلية، إذ يتم تكوين مركب كيميائي بين الجزيء الممتز وسطح المعدن من خلال تبادل الإلكترونات، مكوّنًا ما يُعرف بـ"مركب السطح". غالبًا ما تأتي الإلكترونات من أزواج غير مرتبطة في ذرات الجزيء المثبط، خاصة الذرات ذات الكهروسالبية العالية مثل: P، S، N، O. [16]

1.2.1.11.I خصائص الامتزاز الكيميائي:

- حرارة الامتزاز مرتفعة نسبيًا (تتراوح بين 100-500 kj/mol)
- الامتزاز الكيميائي غير عكوس، ويصعب إزالة الطبقة المتكونة إلا بالطرق الكيميائية.
- يتكوّن عادة من طبقة واحدة، وقد يليه امتزاز فيزيائي فوق هذه الطبقة. [16]

12.I. التثبيط عن طريق الخمولية:

في هذا النوع، تتفاعل المثبطات مع سطح المعدن لتكوين طبقات خاملة كيميائيًا تجاه الوسط الأكال. تؤدي هذه الطبقات إلى تقليل سرعة التآكل بشكل ملحوظ نتيجة خمولية السطح. يتأثر هذا النوع من التثبيط بدرجة pH الوسط، ومن بين الأمثلة الشائعة على مثبطات الخمولية: الكربونات، النترات، الكرومات، الفوسفات، والهيدروكسيدات. [15] [19]

13.I. التثبيط عن طريق الترسيب :

يعتمد هذا النوع على تشكيل رواسب غير قابلة للذوبان على سطح المعدن، وتعمل كحاجز وقائي ضد العوامل المؤدية للتآكل، يمكن أن تكون هذه الرواسب أملاحًا معدنية أو معقدات عضوية ذات ذوبان منخفض في الوسط الأكال. [15] [19]

14.I. التثبيط عن طريق إزالة العنصر الأكال:

تقوم بعض أنواع المثبطات بالتفاعل كيميائيًا مع العناصر المساعدة على التآكل، مما يؤدي إلى إزالتها من الوسط وبالتالي تقليل معدل التآكل من بين هذه المثبطات كبريتيد الصوديوم، الذي يعمل على إزالة بعض الأيونات الفعالة في الوسط. [19]

15.I. تصنيف مثبطات التآكل حسب طبيعتها:

يمكن تصنيف مثبطات التآكل حسب طبيعتها الكيميائية إلى نوعين رئيسيين:

1.15.I. المثبطات غير العضوية:

تُستخدم المثبطات غير العضوية كمثبطات فعالة للتآكل، ويعتمد تأثيرها على المواقع الأنودية أو الكاثودية أو كليهما وفقًا لعدة عوامل أهمها: طبيعة الروابط بين الذرات و الصفة الأروماتية و حجم الجزيء و طول السلسلة الكربونية.

تتشرط فعالية هذه المثبطات أن تكون قادرة على الانتشار أو الذوبان الكامل في وسط التآكل المحيط بالمعدن. ويُعزى تأثيرها التثبيطي إلى عملية الامتزاز على سطح المعدن، حيث تُشكّل طبقة رقيقة ذات طبيعة كارهة للماء، تعمل كحاجز يمنع تفاعل المعدن مع الوسط.

وبما أن تكون هذه الطبقة يعتمد على الامتزاز، فإن كفاءتها تتأثر بعوامل مثل الضغط ودرجة حرارة النظام. [17]

تلعب المركبات غير العضوية المحتوية على إلكترونات π غير متمركزة كما في بعض الحلقات غير متجانسة مثل N، O، P، S، الأروماتية، أو ذرات وكذلك المجموعات الفعالة القطبية مثل:

($-\text{NO}_2$, $-\text{SO}_3\text{H}$, $-\text{CN}$, $-\text{NH}_2$) دورًا مهمًا في تعزيز فعالية التثبيط، خصوصًا في الأوساط الحامضية، وهي تُعد الطريقة الأكثر شيوعًا لحماية المعادن والسبائك من التآكل. [18]

2.15.I. المثبطات العضوية:

تُعد المثبطات العضوية من أكثر الأنواع استخدامًا نظرًا لكفاءتها العالية وتأثيرها المنخفض على البيئة. تعمل هذه المثبطات، في كثير من الحالات، كمثبطات كاثودية أو أنودية أو كمثبطات مختلطة، كما أُشير سابقًا. وتعتمد آلية عملها بشكل رئيسي على الامتزاز على سطح المعدن، حيث تتشكل طبقة واقية تقلل من التفاعل بين المعدن والوسط الأكال، وبالتالي تُبطئ عملية التآكل. تتميز المثبطات العضوية بما يلي [19]:

- كفاءة عالية في تثبيط التآكل.
- صديقة للبيئة وأقل ضررًا مقارنة ببعض المركبات غير العضوية.
- تعتمد كليًا في فعاليتها على نوع البنية الجزيئية وقدرتها على الامتزاز الفعال على سطح المعدن. [19]

16.I. إيزوثيرم الامتزاز:

يُفترض أن لكل سطح معدني عددًا معينًا من المراكز الفعالة القادرة على التفاعل مع جزيئات المثبط من خلال الامتزاز الكيميائي. وتُعبّر نسبة التغطية السطحية (θ) عن الجزء من هذه المراكز المغطاة بجزيئات المثبط، حيث تتراوح قيمتها بين [14]-[25]:

$$0 \leq \theta \leq 1$$

وقد اقترح الباحثون عددًا من النماذج النظرية التي تربط بين كمية المثبط الممتزة على سطح المعدن وتركيز المثبط في الوسط المحيط. من بين هذه النماذج، يُعد نموذج إيزوثيرم لانغمير (Langmuir Adsorption Isotherm) من أكثرها استخدامًا، ويُعبّر عنه بالعلاقة التالية:

$$C = \frac{\theta}{1-\theta} K_{ad} \quad \text{حيث:}$$

- C: تركيز المثبط في الوسط.
- θ : نسبة تغطية سطح المعدن بجزيئات المثبط وتُحسب وفق العلاقة: $\theta = \frac{R}{100}$
- R: مردود التثبيط (%) ، ويُعبّر عن مدى فعالية المثبط في تقليل التآكل.
- K_{ad} : ثابت توازن الامتزاز، ويعكس قوة ارتباط جزيئات المثبط بسطح المعدن.

يُستخدم هذا النموذج لتفسير سلوك التثبيط عبر الامتزاز، حيث يفترض تكون طبقة واحدة من الجزيئات المثبطة على سطح المعدن دون تداخل بين مواقع الامتزاز.

17.I. الخصائص الأساسية لمثبطات التآكل:

حتى تكون مثبطات التآكل فعّالة وملائمة للاستخدام الصناعي، من الضروري أن تتوفر فيها مجموعة من الخصائص التي تضمن أداءها الجيد واستقرارها في ظروف العمل المختلفة. ومن بين هذه الخصائص نذكر [19]:

- تخفيض سرعة التآكل دون التأثير على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمعدن أو إضعاف مقاومته.
- تحسين سلوك الاستقطاب المصعدي والمهبطي، مما يساهم في إبطاء التفاعلات الكهروكيميائية المرتبطة بالتآكل.
- تقليل حركة الأيونات وانتشارها نحو سطح المعدن، ما يساعد على الحد من معدل التآكل.
- رفع المقاومة الكهربائية لسطح المعدن بفعل تكوين طبقة واقية عازلة.
- الاستقرار في الوسط الأكال، خاصة في وجود المؤكسدات التي قد تؤثر على فعالية المثبط.
- الثبات في درجات الحرارة المختلفة دون أن يتعرض للتحلل أو التفاعل غير المرغوب فيه.
- الفعالية عند تراكيز منخفضة، مما يساهم في تقليل كمية المادة المطلوبة.

- إمكانية الإضافة أو التغيير أثناء التشغيل دون التأثير على سير العملية الصناعية.
- السلامة البيئية من خلال خلوه من المواد السامة أو الضارة للإنسان والبيئة.
- التكلفة المنخفضة أو المعقولة حتى يكون استخدامه اقتصادياً ومتاحاً على نطاق واسع. [20-21]

II مدخل الى مادة الجيلاتين :

1.II تاريخ الجيلاتين:

تُشير العديد من المصادر التاريخية إلى أن استخدام مادة الجيلاتين يعود إلى العصور القديمة، حيث وُجدت آثار له في إحدى المقابر المصرية على شكل مادة لاصقة، ما يدل على إدراك الإنسان لخواصه منذ قرون. وقد اعتُبر الجيلاتين لفترة طويلة مادة ثمينة، لا تُستهلك إلا من طرف الطبقات الثرية، نظرًا لصعوبة استخراجها. وفي نهاية القرن السابع عشر، قام الفيزيائي دِينيس بابان (Denis Papin) بإجراء أولى التجارب العلمية لاستخلاص مادة هلامية من العظام باستخدام جهازه المعروف بـ"الهيدروستات"، غير أن اهتمامه توقف عند الجوانب التقنية دون التوسع في استغلال المادة المستخرجة. مع مرور الوقت، تطورت الأبحاث حول هذه المادة، خاصة مع مساهمات علماء مثل رومفورد، بروست، كاديه دو فو، بارمنتيه وآخرين، حيث ركزوا على تحليل البنية الكيميائية للجيلاتين وتحسين تقنيات استخلاصه، مما أدى إلى إدماجه في العديد من الاستخدامات الغذائية والطبية والصناعية. وفي بداية القرن التاسع عشر، حظيت المادة برعاية علمية ومؤسسية واسعة، خصوصًا من قِبل الأكاديميات العلمية، التي ساهمت في توجيه الجهود نحو استثمارها كعنصر غذائي ومكون فعّال في التطبيقات الحيوية. [26]

1.II مفهوم الجيلاتين :

يُعد الجيلاتين مادة بروتينية مشتقة من الكولاجين، وهو أحد المكونات الأساسية للأنسجة الضامة التي تشمل الجلد، العظام، الأوتار، العضاريف، إضافة إلى الأنسجة الليفية في الأبقار، الخنازير، الدواجن، والأسماك. يتميز الجيلاتين بمظهره الشفاف أو بلونه الأصفر الفاتح، كما أنه عديم الطعم والرائحة. لا يذوب في الماء البارد، ولكنه يمتلك قدرة كبيرة على امتصاصه، حيث ينتفخ مكونًا مادة هلامية، إذ يمكنه امتصاص كمية من الماء تعادل 10 إلى 15 مرة من وزنه الأصلي. [24]



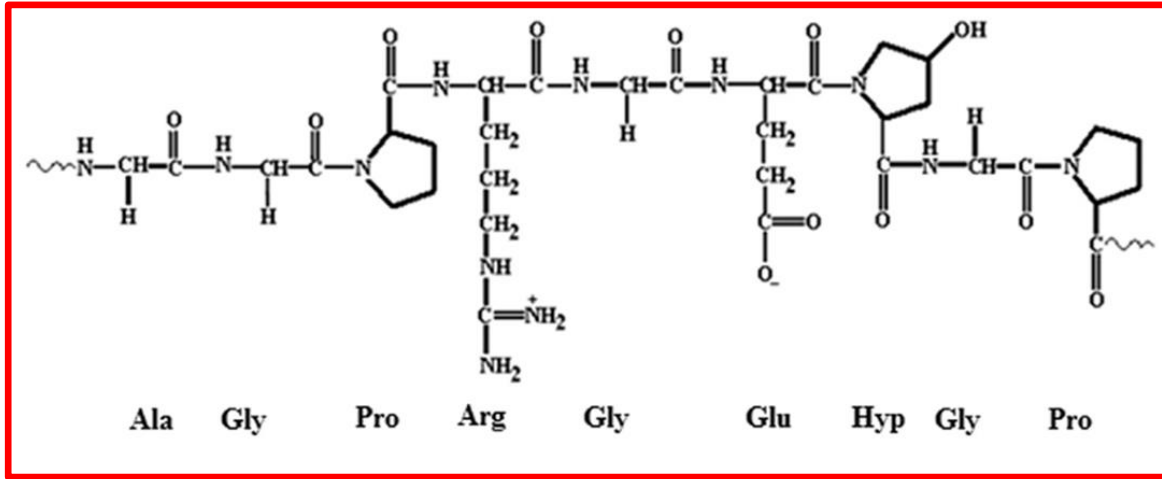
الشكل (3-I): صورة توضيحية للجيلاتين

2.II. البنية الكيميائية و الجزيئية للجيلاتين:

يتكون جزيء الجيلاتين من سلسلة طويلة تحتوي على ما يتراوح بين 300 إلى 4000 وحدة من الأحماض الأمينية، مرتبة في تسلسل دقيق يُشكل البنية الأساسية للبروتين. ويُعد هذا التسلسل مسؤولاً عن الخصائص الفيزيائية والكيميائية الفريدة للجيلاتين، حيث يتكوّن غالباً من ثلاثيات متكررة من الأحماض الأمينية، أكثرها شيوعاً هو:



كما هو موضّح في الرسم البياني التالي :



الشكل (4-I): التمثيل الكيميائي للبنية النموذجية للجيلاتين .

3.II. الجيلاتين كمثبط للتآكل والجدوى الاقتصادية منه:

في سياق الاهتمام المتزايد بالمواد الطبيعية ذات التأثير البيئي المحدود، برز الجيلاتين كبوليمر حيوي واعد، نظراً لخصائصه الفيزيائية والكيميائية المتنوعة، وتُظهر الدراسات الحديثة أن الجيلاتين يتمتع بقدرة جيدة على الامتزاز فوق أسطح المعادن، ما يُمكنه من تشكيل حاجز فعّال يحدّ من وصول العوامل الأكلة إلى السطح المعدني ، وبالتالي تقليل معدلات التآكل. [22]

إضافة إلى ذلك، فإن الطبيعة غير السامة للجيلاتين ، إلى جانب كونه مادة متوفرة منخفضة التكلفة ، تجعل منه خياراً مثالياً في تطوير مثبطات صديقة للبيئة، لذلك أصبح الجيلاتين محلّ اهتمام متزايد في البحوث المتعلقة بتنشيط التآكل، ضمن توجّه علمي يسعى إلى استبدال المركبات الكيميائية التقليدية ببدائل طبيعية أكثر أماناً واستدامة. [23]

III الفولاذ الكربوني:

1.III مفهوم الفولاذ الكربوني:

الفولاذ الكربوني، أو ما يُعرف بالصلب الكربوني، هو سبيكة تتكوّن أساساً من الحديد والكربون، حيث تصل نسبة الكربون فيها عملياً إلى حد أقصى يقارب 1%. تحتوي جميع أنواع هذا الفولاذ على كميات ضئيلة من الشوائب الناتجة عن عمليات التصنيع، إلا أن نسبتها تكون منخفضة جداً بحيث لا تؤثر بشكل ملموس على خواص الفولاذ. وبناءً على ذلك، يُعدّ الفولاذ الكربوني العادي سبيكة مكونة من الحديد والكربون فقط من الناحية العملية.^[28]

2.III معالجة الفولاذ الكربوني X52 واستخداماته :

يُعالج الفولاذ الكربوني من فئة X52 بتسخينه ثم تبريده بسرعة لكي تتشكل بنية دقيقة تقلل حجم الحبيبات وتعرز خصائصه الميكانيكية من صلابة ومقاومة، كما تُضاف إليه عناصر سبائكية مثل الكروم والمولبيدات لتحسين قدرته على التحمل ومنع التآكل الإجهادي، في حين يُستخدم الألمنيوم أو السيليكون داخل الحمام المنصهر لتكوين قشرة أكسيدية واقية على السطح تحد من الصدأ. على الصعيد المجهرى، يظهر في هذا الفولاذ طور أحادي (Monophase) من الفريت (Ferrite) يوفر تجانساً ومقاومة أفضل للتآكل الكهروكيميائي، بينما يؤدي الطور الثنائي (Deux phases) من البرليت (Perlite) والسمنتيت إلى تحسين خواص الشد لكنه يتيح تكوّن خلايا تآكل جلفانية بسبب اختلاف الجهد بين الطورين. تُستخدم هذه السبائكة بشكل واسع في تصنيع أنابيب المياه والغاز الثابتة، وقضبان التسليح في البناء، والهياكل البحرية والجسور، إضافةً إلى المغناط الكهرومائية المؤقتة، ويبقى التآكل الذي تسببه المياه أخطر أشكال التآكل الكهروكيميائي نظراً لوفرة الوسط المائي الناقل وعامل الأكسدة.^[29]

مراجعة الفصل

الأول

المراجع والمصادر المستعملة في الفصل الاول:

المراجع باللغة العربية:

- [1] د.ع.م. بغني أساسيات هندسة التآكل دار الكتب الوطنية - ليبيا 7029/2006 ، 2006 م .
- [2] ع.عبده ، ز رش السعدي جامعة القادسية دراسة منحنيات الاستقطاب للصلب X65 الكربوني في الوسط الحمضي العراق، 2016م.
- [3] أ.ب. إخلاص، غ. إبراهيم حسين السراج، تأثير المعاملات الحرارية على مقاومة تآكل الصلب متوسط الكربون في مياه عين كبريت، مجلة تكريت للعلوم الهندسية، جامعة الموصل، 2012م.
- [4] ر. قطاش، دراسة تآكل أهم المعادن المستخدمة في الصناعات الكهروكيميائية اللاعضوية، رسالة ماجستير في الكيمياء التطبيقية، قسم الكيمياء، كلية العلوم، جامعة حلب، سوريا 2015م.
- [5] الحازمي، ح، م ، المنتجات الطبيعية. الطبعة الثانية . عماد شؤون المكتبات السعودية ، جامعة الملك سعود 1995م.
- [6] قحطان، خ . عبد الجواد،م.التآكل :أسبابه طرق الحماية منه .جامعة بغداد 1988م.
- [13] م. معلول، تقدير الفاعلية التثبيطية للمستخلص المائي للنبات الصحراوي MoltikitaCiliata تجاه تآكل الفولاذ الكربوني XC70 في أوساط حمضية مذكرة ماجستير جامعة ورقلة (قاصدي مرباح) 2014م.
- [14] دن. الحايك << مدخل إلى كيمياء السطوح >> دار البعث قسنطينة 1990 م
- [15] ع.بكوشة ، << دراسة الفاعلية التثبيط لبعض المركبات العضوية الكبريتية ، والأزوتية>>،مذكرة ماجستير ، جامعة ورقلة ،سبتمبر 2008م.
- [16] م.حبي، مذكرة ماستر.جامعة ورقلة دراسة تأثير درجة الحرارة على فاعلية تثبيط أملاح مركبات Dithiolethianes لتآكل الفولاذXC52 في وسط حمضي(HCl 1M) 2011م.
- [17] س.كودية مذكرة ماجستير جامعة ورقلة دراسة الفاعلية التثبيطية لبعض المركبات ،الحلقية الكبريتية في وسط حمضي 2012 م.
- [19] س.شيحي ، << دراسة الفاعلية التثبيطية للمستخلص الفلافونيدي لنبات على تآكل الفولاذ في وسط حمضي >> .- مذكرة ماجستير ، جامعة ورقلة،2009م.
- [20] م.الزغبي، م. محمد الصالح، س.درويش، دراسة مرجعية في الطرق المتبعة في إزالة واستخلاص الأملاح ودور مثبطات الأملاح في حماية الحجر الجيري من التلف الملحي، مجلة كلية الأثار، الرقم المسلسل للعدد 2022م ،ع 11 جامعة القاهرة، مصر.
- [21] ص.عائشة، تقدير الفعل المضاد للتآكل لمستخلص فينولي لنبات البطمة وثنائي ثيول الحلقي، رسالة ماجستير، 2012-2011 تخصص كيمياء عضوية وفيزيوكيمياء الجزيئية، جامعة قاصدي مرباح، ورقلة.
- [24] ب.عبد الرحيم، ع. مرعب، تحضير الجيلاتين من جلود الدجاج ودراسة صفاته النوعية والحسية، المجلة العراقية لبحوث السوق وحماية المستهلك، قسم علوم الأغذية، كلية الزراعة، جامعة بغداد مج 07 ع2. 2015م
- [25] د.س. منصور << هندسة التآكل والطرق الفنية في التصدي له>> دار الرتب الجامعة بيروت. 2000م

- [28] ع.ع. ن. الدهماني، ط. خليل ابراهيم، ف. عمر الأطرش، استخدام الزيوت النباتية كوسيط للتبريد في عملية تصليد الصلب الكربوني العادي مجلة ليبيا للعلوم التطبيقية والتقنية قسم الهندسة الميكانيكية والصناعية جامعة ليبيا 6ع 2019م.
- [29] م. جاسم المرشدي دراسة بعض الاصباغ (Luxol Fast Blue, Methyl Violet, Cresol Red) كمثبطات لتآكل سبيكة الكربون الصلب في محلول حامض الكبريتيك رسالة ماجستير في علوم الكيمياء قسم الكيمياء جامعة كربلاء 2016م.

المراجع باللغة الاجنبية:

- [7] Gill .Min The chemistry Of Natural Product ,2nd (ed.R.H.Thomson).Blackie.Glasgow. 1993.
- [8] Bruneton, J.Pharmacognosie, phytochimie, plantes médicinales, (4éme éd.).Paris :Editions médicales internationales, éditions Tec &Doc Lavoisier2009.
- [9] William D. Callister, Jr Callister- Materials Science and engineering – An Introduction 7e (Wiley, 2007) .
- [10] E.Bardal Corrosion and Protection (Engineering Materials and Processes) 2004.
- [11] SRISVWAN Nakarin, propriétés inhibitrices d'un mélange d'amines grasses et de sèbaçate de sodium vis –à-vis de la corrosion d' un acier au carbon , 27 juin 2008, (5).
- [12] p.B.Raga ,M.G.Sethuraman ,A review materials letter,2007.
- [18] .B,Frémaux , Elément de cinétique et de catalyse. EDTPL,paris(1989).
- [22] A. A. El-Shenawy, Corrosion Science, Vol. 65, 2012.
- [23] M. Lebrini, M. Traisnel, C. Lagrenée, Materials Chemistry and Physics, Vol. 113, 2009.
- [26] R.Schrieber,Gelatine Handbook: Theory and Industrial Practice2007.
- [27] Kurdi, W. I., & Al-Baghdadi, M. F. (2010). Gelatin Processing From bones, legs, heads and skins of spent hens (1-study its Chemical contents and yield). anbar journal of agricultural sciences, 8(1).
- [30] Koch, G.; Varney, J.; Thompson, N.; Moghissi, O.; Gould, M.; Payer, J. International Measures of Prevention Application and Economics of Corrosion Technologies Study; NACE Inter 2016.

الجزء التّطبيقي

الفصل الثاني
الطرق الكهروكيميائية
والمواد المستعملة

I. تمهيد:

بعد أن تم التطرق في الفصل الأول إلى الخصائص الفيزيائية والكيميائية لمادة الجيلاتين ودورها المحتمل كمثبط طبيعي للتآكل، سنخصص هذا الفصل لدراسة المنهجية التجريبية المعتمدة. حيث سيتم عرض مختلف التقنيات الكهروكيميائية المستعملة في تقييم سلوك التآكل لفلاد X52، إلى جانب تقديم وصف دقيق للأجهزة والمواد الكيميائية المستخدمة خلال مراحل التجربة. تهدف هذه المرحلة إلى تحديد مدى فعالية الجيلاتين في الحد من ظاهرة التآكل، وذلك اعتمادًا على قياسات كمية دقيقة تم الحصول عليها باستخدام تقنيات تحليل متقدمة.

1.I. تعريف التقنيات الكهروكيميائية:

التقنيات الكهروكيميائية هي طرق تحليلية تُستخدم لدراسة التفاعلات التي تحدث على سطح المعادن عند تلامسها مع محاليل إلكتروليتيّة. تعتمد هذه التقنيات على قياس الجهد والتيار لفهم سلوك المادة تحت ظروف مختلفة. تُعد من الوسائل الأساسية في دراسة التآكل وتقييم فعالية المثبطات. تتميز بحساسيتها العالية وسهولة استخدامها. وتُستخدم بشكل واسع في المجالات الصناعية والبحثية. [1]

1.1.I. الفولطا متري الخطي :

تُعدّ الفولتامتري الخطية من بين التقنيات الكهروكيميائية الأساسية والأكثر استخدامًا في دراسة التفاعلات التي تحدث عند واجهة المعدن/المحلول. تعتمد هذه التقنية على تطبيق جهد كهربائي يتغير بشكل خطي مع الزمن، مع تسجيل التيار الناتج عن تفاعلات الأكسدة والاختزال. تُستخدم على نطاق واسع في مجالات الكيمياء الكهروكيميائية وعلوم المواد والكيمياء التحليلية، نظرًا لبساطتها ودقتها. [2]

2.1.I. الفولطا متري الحلقي:

التحليل الفولتامتري الحلقي هو تقنية كهروكيميائية تُستخدم لدراسة سلوك الأنواع الكيميائية عند الأقطاب، ويُعد من أهم الأساليب النوعية لتحديد آلية التفاعلات الكهروكيميائية. يعتمد على تطبيق جهد كهربائي يتغير بشكل دوري (موجة مثلثية) على المسرى العامل، مع قياس التيار الناتج خلال دورة المسح. توفر هذه التقنية معلومات قيمة حول عمليات الأكسدة والاختزال، الحركيات السطحية، وثبات نواتج التفاعل. تُستخدم بشكل واسع في المراحل الأولى من الدراسات الكهروكيميائية للحصول على تصور شامل عن نظام التفاعل المدروس. تُعد أداة فعالة لتقييم فعالية المثبطات، من خلال ملاحظة التغير في منحنيات التيار-الجهد في وجود أو غياب المادة المثبطة. [3]

3.1.I الكرونوأمبيرومترى :

الكرونوأمبيرومترى هي تقنية كهروكيميائية تعتمد على تسجيل التغير في التيار الكهربائي بدلالة الزمن، وذلك عند تطبيق جهد ثابت على المسرى العامل.

تُستخدم هذه الطريقة في ترسيب الجيلاتين على سطح فولاذ X52، حيث يتم رسم منحني كثافة التيار بدلالة الزمن $I=f(t)$ لتتبع عملية الترسيب.

تعكس هذه التقنية سلوك الأنواع النشطة كهربائياً أثناء تفاعلات انتقال الإلكترونات، والتي غالباً ما تكون محدودة بالانتشار.

كما تسمح بدراسة تكوين الطبقات السطحية وتقييم طبيعة الترسيب ومدى تجانس الطبقة المترسبة. [4]

1.2.I الاجهزة الكهروكيميائية المستخدمة:

تتطلب الدراسة الكهروكيميائية لتثبيط التآكل، كما هو الحال في بحثنا حول تأثير الجيلاتين على الفولاذ X52، استخدام مجموعة من الاجهزة الأساسية في هذا المجال. يُعد جهاز Potentiostat/Galvanostat العنصر الرئيسي، حيث يتحكم في فرق الجهد أو التيار بين الأقطاب ويُستخدم في جميع التقنيات الكهروكيميائية كالفولتامترى، الكرونوأمبيرومترى والممانعة الكهروكيميائية. يتم إجراء القياسات داخل خلية كهروكيميائية ثلاثية الأقطاب، تضم: القطب العامل هو الفولاذ (X52، القطب المرجعي) عادة قطب الكالوميل المشبع أو (Ag/AgCl)، والقطب المساعد (غالباً من البلاتين).

تستخدم أجهزة (EC – Lab أو Volta Lab) لتسجيل تغير التيار بدلالة الزمن، خاصةً أثناء ترسيب الجيلاتين. وتُرفق هذه الاجهزة بـ حمام حراري للحفاظ على درجة حرارة ثابتة أثناء التجربة، مما يضمن دقة واستقرار النتائج. [5]

2.2.I الخلية الكهروكيميائية:

الخلية الكهروكيميائية هي نظام مكوّن من موصلين كهربائيين (عادةً إلكترودات) وغلاف إلكتروليتي، يُستخدم لتحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية أو العكس. وتحدث هذه التحولات نتيجة لتفاعلات الأكسدة والاختزال عند سطوح الأقطاب داخل الخلية.

تُستخدم هذه الخلايا بشكل واسع في الدراسات الكهروكيميائية مثل تحليل التآكل، تقييم فعالية مثبطات التآكل، ودراسة ديناميكيات التفاعلات الكهروكيميائية. وتُصمّم الخلية عادة بتكوين ثلاثي الأقطاب يشمل القطب العامل، القطب المرجعي، والقطب المساعد، لضمان دقة القياسات والتحكم الكامل في الجهد والتيار أثناء التجربة. [6]



الشكل (1.II): صورة للخلية الكهروكيميائية.

3.2.I. الأقطاب :

❖ قطب المساعد (AE):

القطب المساعد، ويُعرف أيضًا بالقطب المقابل، هو أحد مكونات الخلية الكهروكيميائية، ويُستخدم لإغلاق الدارة الكهربائية في أثناء التجربة. تتمثل وظيفته الأساسية في تمرير التيار الكهربائي اللازم لإتمام التفاعل الكهروكيميائي عند القطب العامل، دون أن يتداخل مع قياسات الجهد.

غالبًا ما يُصنع القطب المساعد من مواد خاملة وموصلة ممتازة، مثل البلاتين أو الكربون الزجاجي، وذلك لتفادي مشاركته في التفاعلات الكهروكيميائية الجارية داخل الخلية. لا يتم قياس أي جهد عند هذا القطب، ولا يُستخدم كمرجع، بل يُركز دوره على توزيع التيار بشكل مناسب داخل المحلول.

أبعاد قطب البلاتين المستعمل في التجربة : الطول 1cm والقطر 1mm.^[7]



الشكل (2.II): صورة لقطب البلاتين المساعد.

❖ القطب المرجع (RE):

القطب المرجعي هو أحد الأقطاب الأساسية في الخلية الكهروكيميائية ، ويُستخدم كمرجع ثابت لقياس الجهد الكهروكيميائي للقطب العامل. يتميز هذا القطب بجهد كهربائي ثابت ومعروف مسبقاً، ولا يمر عبره تيار أثناء التجربة، مما يضمن دقة القياسات.

يسمح القطب المرجعي بمراقبة التغيرات في جهد القطب العامل بدقة، وهو عنصر حاسم في تقنيات مثل الجهد الساكن، الاستقطاب الجلفانوستاتيكي، وتحليل المعاوقة الكهروكيميائية (EIS).^[7]



الشكل (3.II) : قطب المرجع RE.

❖ قطب العمل (WE):

قطب العمل هو المكون الأساسي في الخلية الكهروكيميائية، حيث يُجرى عليه التفاعل الكهروكيميائي المراد دراسته. يتم فيه قياس التيار الناتج أو الجهد المتغير نتيجة للتفاعلات الكهروكيميائية التي تحدث عند سطحه، مثل تفاعلات الأكسدة أو الاختزال. يُمثل قطب العمل المعدن المعرض للتآكل، ويُستخدم لتحليل سلوك هذا المعدن في وسط معين، أو لتقييم فعالية مثبطات التآكل. في دراستنا يُمثل فولاد X52 قطب العمل، وتُقاس عليه التأثيرات الناتجة عن وجود الجيلاتين كمثبط. يُصنع قطب العمل عادة من المادة المطلوب دراستها، وتُحضّر سطحه بعناية لضمان دقة النتائج التجريبية،

سواء من حيث التنظيف أو التلميع أو التثبيت داخل الخلية.^[8]



الشكل (4.II) : قطب العمل WE.

3.I. التركيب التجريبي المستعمل :

يهدف هذا البحث إلى دراسة فعالية الجيلاتين كمثبط لتآكل الفولاذ X52 تم تثبيته كهروكيميائيًا ودراسة سلوكه في وسطين مختلفين : ماء البحر ومحلول NaCl .

تم إجراء التجارب الكهروكيميائية الثلاث باستخدام جهاز Volta Lab PGZ 301 ، الموصول بحاسوب لتسجيل وتحليل البيانات، وذلك عبر برنامج VoltaMaster 4 الذي يتيح حساب الخصائص الكهروكيميائية، رسم المنحنيات البيانية، وطباعة النتائج. وقد تم توصيل هذا النظام بخلية كهروكيميائية مكوّنة من ثلاثة أقطاب.



الشكل (5.II) : صورة للتركيب التجريبي المستعمل في التجارب.

4.I. المواد المستعملة:

1.4.I. التجربة الأولى:

- الجيلاتين (Gelatine) محضر مخبريا.
- ماء مقطر H_2O .
- ماء البحر.
- مسحوق كبريتات الصوديوم Na_2SO_4 .

2.4.I. التجربة الثانية:

- الجيلاتين (Gélatine).
- ماء مقطر H_2O .
- كلور الصوديوم $NaCl$.

5.I. الأدوات المستعملة في التجارب :

- الخلية.
- جهاز Volta lab PGZ 301 مدمج بحاسوب .
- أقطاب (المساعد، المرجع، العمل).
- ملعقة مخبرية.
- ميزان حساس.
- مسخن أنبوب مدرج.
- بيشر مدرج.
- أسلاك التوصيل.
- ورق الصنفرة.
- قضيب مغناطيسي.
- زجاجة الساعة.

قائمة مراجع الفصل الثاني:

المراجع بالعربية:

- [1] الحداد، ع. م. الكهروكيمياء والتآكل. دار النشر: دار الكتب العلمية، 2005.
- [2] سيد، ع. أ. م. التحليل الكيميائي الآلي. دار النشر: جامعة الأزهر، 2015.
- [3] دراسة النشاط المضاد للأكسدة لبعض المركبات الطبيعية باستخدام تقنيات كهروكيميائية. رسالة ماجستير، جامعة قاصدي مرباح ورقلة، الجزائر، 2016.
- [5] دراسة الفعل التثبيطي للمستخلصات النباتية باستخدام منحنيات الاستقطاب ومطيافية الممانعة الكهروكيميائية رسالة ماجستير، جامعة قاصدي مرباح ورقلة، الجزائر، 2022.
- [6] سعيد، ج. التفاعل الكهروكيميائي ودراسة التآكل. دار المدى للنشر (2008).
- [8] سمير، ح. ح. الكيمياء الكهروكيميائية وتطبيقاتها. دار الكتب العلمية، بيروت (2010).

المراجع باللاتينية:

- [4] Kissinger. P. *Laboratory Techniques in Electroanalytical Chemistry* (2nd ed.) (1996).
- [7] Harvey. D. *Analytical Chemistry 2.1*. LibreTexts. (2016).

الفصل الثالث

تحليل ومناقشة النتائج

تمهيد:

في هذه الدراسة، تم إجراء تحليل كهروكيميائي لظاهرة التآكل وفعالية عمليات التثبيط باستخدام مادة الجيلاتين كمثبط لتآكل فولاذ X52 ، وذلك في وسط مؤكسد يمثل ماء البحر أو محلول كلوريد الصوديوم بتركيز 3%. تم إذابة الجيلاتين في الوسط ثم تثبيته على سطح القطب المعدني باستخدام تقنية الكرونوأمبيرومتر، بهدف تقييم كفاءة الجيلاتين في الحد من التآكل تحت ظروف مختلفة.

I. التجربة الأولى:

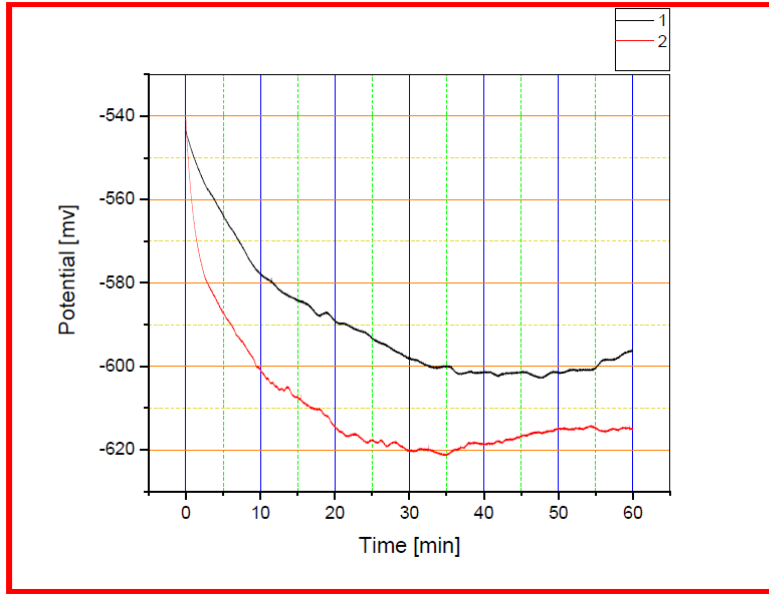
في هذه التجربة، سيتم دراسة ظاهرة التآكل وعمليات التثبيط كهروكيميائيًا في وسط مؤكسد يتمثل في ماء البحر، مع استخدام مادة الجيلاتين كمثبط لتآكل فولاذ X52 Acier. يتم ذلك من خلال إذابة الجيلاتين في ماء البحر، ثم تثبيته على سطح قطب الفولاذ باستخدام تقنية الكرونوأمبيرومتر.

1.I. طريقة الغمس:

1.1.I. قياس جهد التوازن لمدة ساعة:

باستخدام جهاز الفولتلاب، الذي يربط بين الخلية الكهروكيميائية وجهاز الكمبيوتر المزود ببرنامج **Voltmaster4**، يتم الحصول على منحنى يوضح تغير الجهد (E) بدلالة الزمن، وذلك في 20 ملل من ماء البحر لمدة ساعة كاملة، كما هو موضح في الشكل (1-III).

- تم إذابة 13.8 ملغ من الجيلاتين في 20 ملل من ماء البحر، ثم يُقاس جهد التوازن بين قطب العمل والقطب المرجعي (ECS) على مدار ساعة كاملة، كما هو موضح في الشكل (1-III).

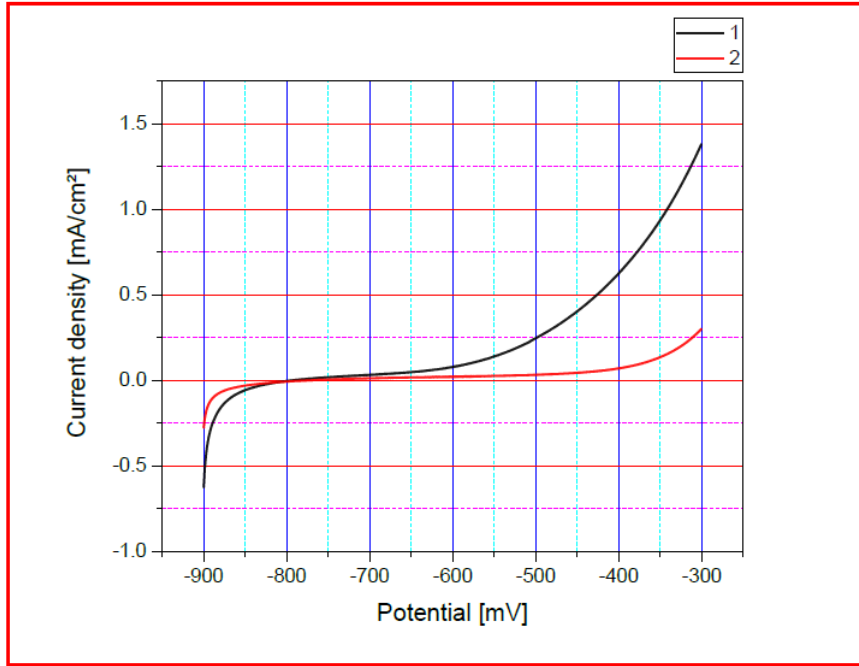


الشكل (1-III) : قياس جهد التوازن 1: (فولاذ في 20 ملل من ماء البحر) 2: (فولاذ 20 ملغ من الجيلاتين) لمدة ساعة. / ملل من ماء البحر

يوضح الشكل (1-III) انخفاضاً في قيمة جهد التوازن تدريجياً، مع استقراره بعد مرور نصف ساعة، حيث يظهر فرق في الجهد بين المنحنيين بمقدار يتراوح بين 600 mV و 620 mV - على التوالي.

2.1.I . منحنى الاستقطاب:

بعد غلق الدارة، يتم اختيار مجال المسح من 900 mV - إلى 300 mV - للحصول على منحنى الاستقطاب (التأين) الموضحين في الشكل (2-III)، مع ضبط سرعة المسح عند 10 mV/s .

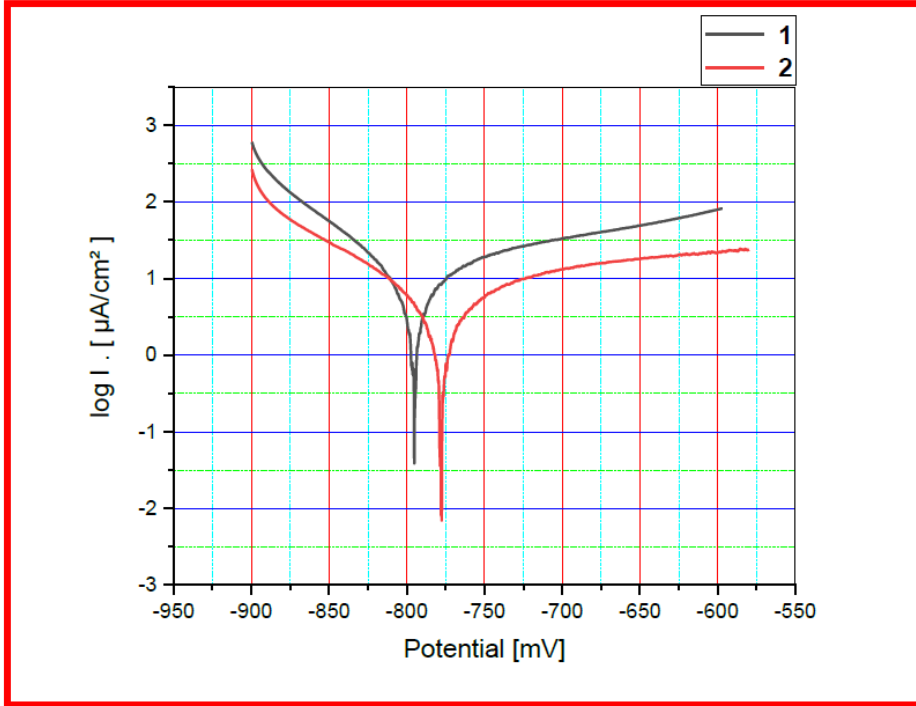


الشكل (2-III) : 1: (منحنى إستقطاب الفولاذ في ماء البحر) 2: (منحنى إستقطاب الفولاذ في ماء البحر بوجود الجيلاتين).

يظهر نهايات الأكسدة للمنحنيين (1) و(2) في الشكل (2-III) قمم شدة التيار بمقدار 1.38 mA/cm^2 و 0.3 mA/cm^2 على التوالي، ويُعزى هذا الانخفاض الملحوظ في شدة التيار إلى تأثير مادة الجيلاتين كمثبط لعملية التآين.

3.1.I. منحنى تفال:

انطلاقًا من منحنى الاستقطاب، يمكن الحصول على منحنى تفال (Tafel) $\text{Log } i = f(E)$ الخاص بالفولاذ في وجود وغياب الجيلاتين كما هو موضح في الشكل (3-III).



الشكل (3-III) : منحني تفاعل 1: (فولاذ / ماء البحر) 2: (منحني تفاعل فولاذ / ماء البحر بوجود الجيلاتين).

يظهر المنحنى إزاحة في قيم جهد التآكل نحو القيم الموجبة عند وجود المثبط، مما يشير بوضوح إلى أن آلية الحماية هي من النوع الحماية الأنودية.

كما يمكننا الاستنتاج من الشكل (3-III)، الذي يوضح سرعة التآكل وشدة تيار التآكل، ومن خلال هذه البيانات يتم حساب نسبة كفاءة المثبط.

الجدول (1-II) : نتائج منحني تفال Tafel

Milieu eau de mer	E (i=0)	Rp	i corr:	Ba	Bc	Coef	Corrosion
1	-794.61 <i>mV</i>	-4899.04 <i>ohm.cm²</i>	8.8337 <i>mA/cm²</i>	206.31 <i>mV</i>	-69.01 <i>mV</i>	1.0000	103.3 <i>μm/γ</i>
2	-778.21 <i>mV</i>	2139.28- <i>ohm.cm²</i>	4.5529 <i>mA/cm²</i>	172.51 <i>mV</i>	88.10- <i>mV</i>	1.0000	53.25 <i>m/γμ</i>

باستعمال العلاقة نتحصل على نسبة كفاءة المثبط:

$$IE = \frac{LCun - LCin}{LCun} \times 100\%$$

$$IE = (8.8337 - 4.5529) \div 8.8337 = 0.484648 = 48.46\% \quad \text{تطبيق عددي :}$$

أي أن النسبة المئوية للمثبط تقدر ب: **48.46%**

II. التجربة الثانية:

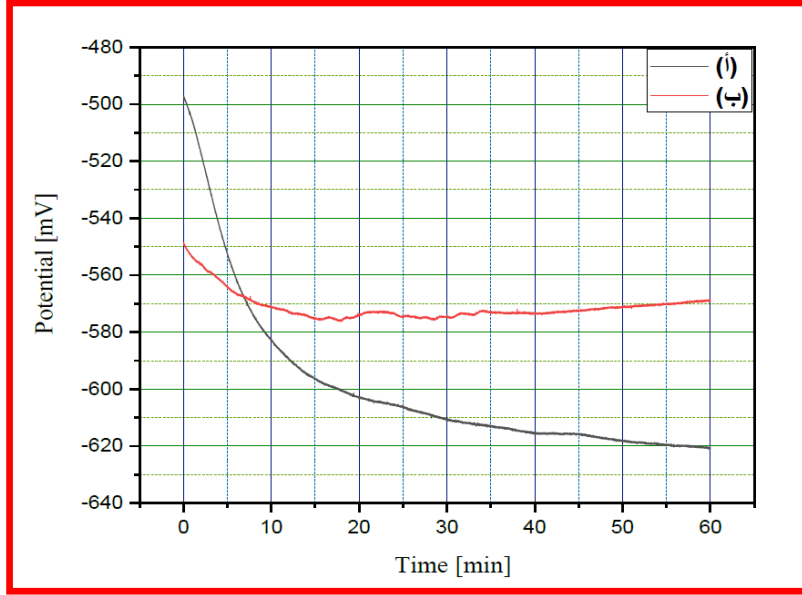
تختلف طرق حماية المعادن من التآكل وفقاً للعوامل التي تتعرض لها، مما أدى إلى تطوير العديد من الأساليب لقياس سرعة التآكل وتقييم كفاءة المثبطات منذ ظهور مشكلة التآكل. في هذا الفصل، قمنا بدراسة كهروكيميائية لظاهرة التآكل وعمليات التنشيط، وذلك من خلال تحضير محلول كلوريد الصوديوم (NaCl) بتركيز 3%،

مع استخدام مادة الجيلاتين كمثبط للتآكل.

1.II. طريقة الغمس:

1.1.II. قياس جهد التوازن لمدة ساعة :

في نفس الشروط السابقة نقوم بقياس جهد التوازن خلال ساعة كما هو موضح في الشكل (III-4. أ. ب)

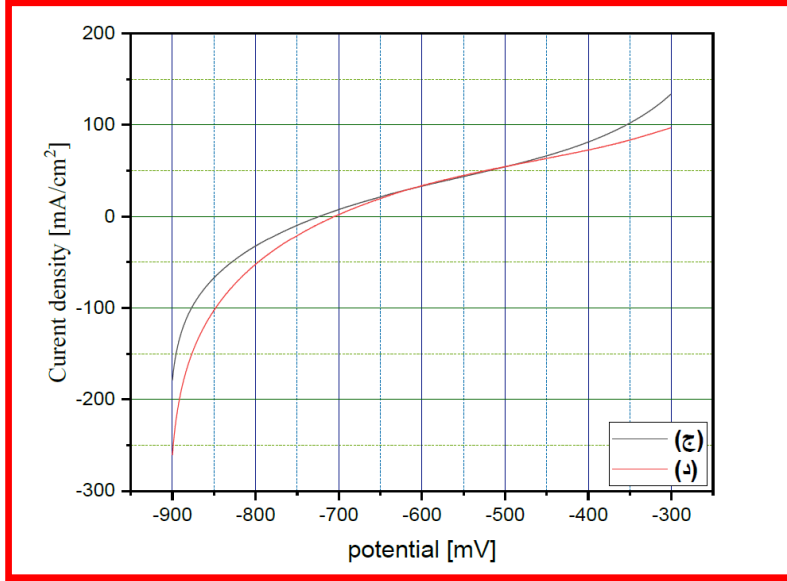


الشكل (III-4) : قياس جهد التوازن، المنحنى (أ): فولاذ في 15 ملل من محلول NaCl المنحنى (ب): فولاذ في 15 ملل من محلول NaCl / 0.009 غ من الجيلاتين لمدة ساعة.

يوضح الشكل (III-4) استقرار جهد التوازن عند قيمة 620 mV - بعد مرور 55 دقيقة في غياب مادة الجيلاتين، بينما في وجود الجيلاتين، يستقر جهد التوازن عند 573.31 mV - بعد 20 دقيقة.

2.1.II. منحنى الاستقطاب:

في نفس الشروط السابقة تحصلنا على منحنى الإستقطاب الممثل في الشكل (III-5):

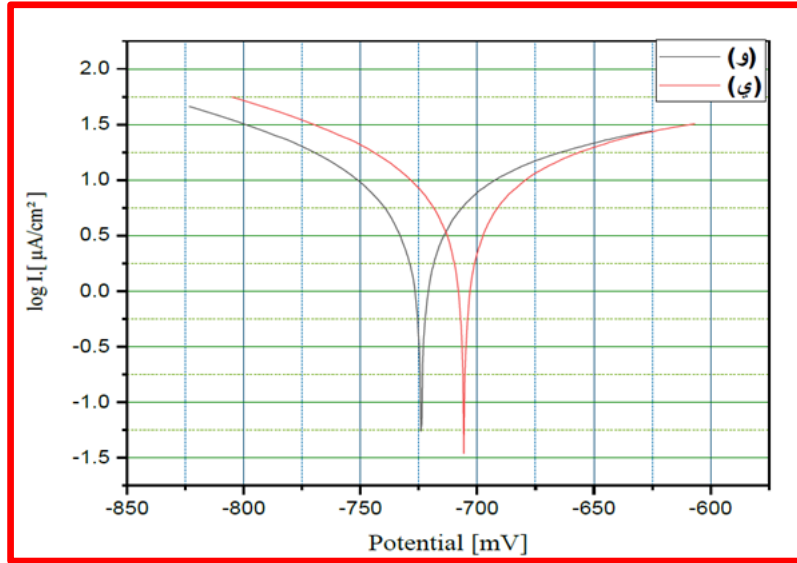


الشكل (5-III) : (ج): منحنى إستقطاب الفولاذ في محلول NaCl المنحني (د): منحنى إستقطاب الفولاذ في محلول NaCl بوجود الجيلاتين.

يُبيّن الشكل (5-III) أن نهايات الأكسدة لكلٍ من المنحنيين (ج) و(د) تتجلى في قمم شدة التيار، حيث تبلغ قيمتها $164.068 \text{ mA/cm}^{-2}$ للمنحني (ج) و $256.377 \text{ mA/cm}^{-2}$ للمنحني (د). أما نهايات الإرجاع لكليهما فتقع عند 0.731 V و 0.163 V على التوالي. يُعزى الانخفاض الملحوظ في شدة التيار إلى تأثير الجيلاتين، ويُلاحظ السلوك نفسه في باقي القياسات.

3.1.II. منحنى تفال (Tafel) :

انطلاقاً من منحنى الإستقطاب نتحصل على منحنى تفال (Tafel) $\text{Log } i = f(E)$ الخاص بالفولاذ عند وجود وغياب الجيلاتين كما هو موضح في الشكل (6-III):



الشكل (6-III) : منحنى تفال (Tafel) المنحنى (و): الفولاذ / محلول NaCl والمنحنى (ي): الفولاذ / محلول NaCl بوجود الجيلاتين.

كما نستخلص من الشكل (6-III) الذي يبين سرعة التآكل وشدة تيار التآكل، ومن هذه المعطيات نحسب نسبة التثبيط.

الجدول (2-II) : نتائج منحنى تفال Tafel

Milieu eau de mer	E (i=0)	Rp	i corr:	Ba	Bc	Coef	Corrosion
ي	-705.70 mV	2.48 ohm .cm ²	8.8638 mA/cm ²	158.90 mV	-117.2 mV	1.0000	103.61 μm/γ
و	-720.91 mV	2.94 ohm .cm ²	8.3130 mA/cm ²	179.51 mV	-130.11 mV	1.0000	97.23 μm/γ

باستعمال العلاقة نتحصل على نسبة كفاءة المثبط:

$$IE = \frac{LC_{un} - LC_{in}}{LC_{un}} \times 100\%$$

$$IE = (8.3130 - 8.8638) \div 8.3130 = -0.06625 = 6.62\% \quad \text{تطبيق عددي :}$$

أي أن النسبة المئوية للمثبط تقدر ب: 6.62%

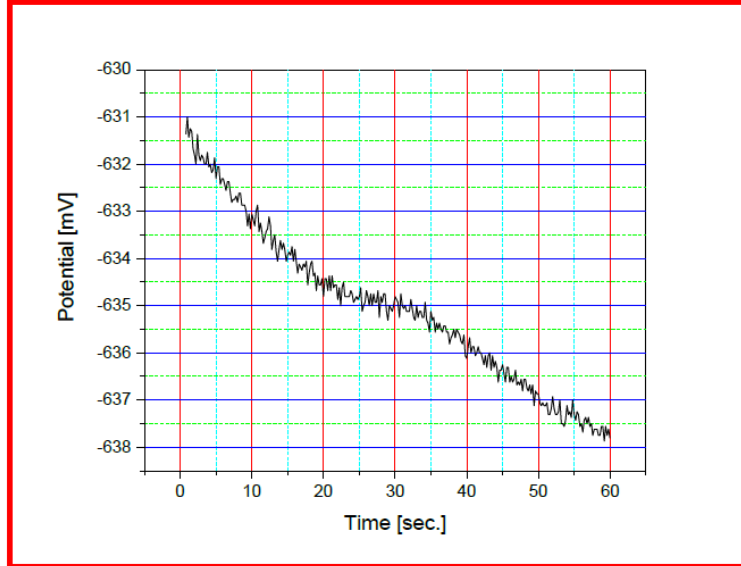
III. طريقة التثبيت:

III.1.1 التجربة الأولى:

لمعرفة قيمة الجهد الخاص بإرجاع مادة الجيلاتين، نحدد جهد التوازن للمحلول الإلكتروليتي الذي يحتوي على الجيلاتين مذاباً في محلول ملحي من كبريتات الصوديوم (Na_2SO_4) بتركيز 1 مول/لتر. من خصائص هذا المحلول أن التركيز الكتلي للجلياتين يعادل 100/1 من كتلة كبريتات الصوديوم.

لقياس جهد التوازن، يتم غمس قطب العمل المصنوع من الفولاذ داخل الخلية التي تحتوي على القطبين المرجعي (ECS) والقطب المساعد (Pt).

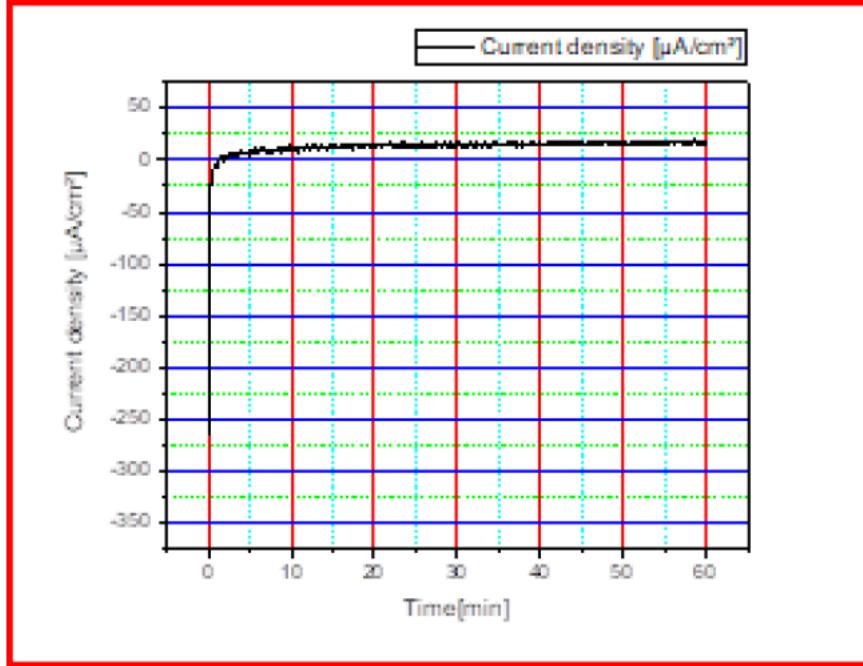
نلاحظ جهد التوازن كما هو موضح في الشكل (III-7).



الشكل (III-7) : جهد توازن الجيلاتين على الفولاذ بالنسبة للقطب المرجعي (ECS) بدلالة الزمن.

III.1.2. منحني كرونوأمبيروميري:

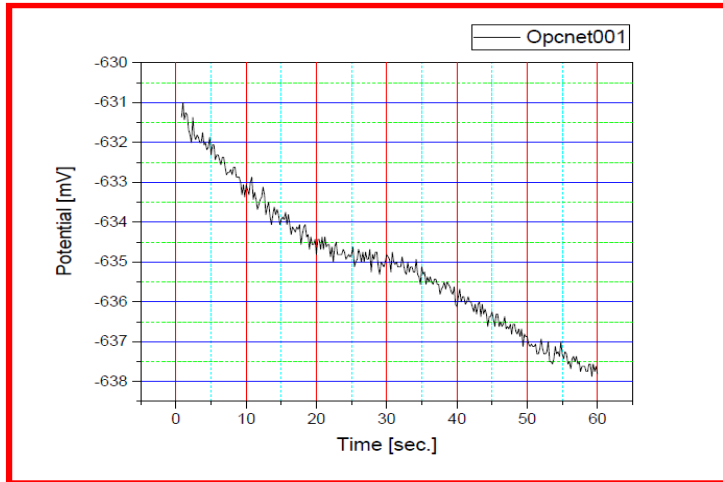
من الشكل (III-7)، تتراوح قيمة جهد التوازن خلال دقيقة بين -631 mV و -638 mV - عند تطبيق جهد أقل من جهد التوازن، أي -1000 mV - لإرجاع مادة الجيلاتين على قطب الفولاذ، يتم متابعة تغير شدة التيار مع مرور الزمن.



الشكل (III-8): منحنى الكروانومبيرومترى $i = f(t)$ (الجهد $E = -1000$ mV) لمدة ساعة.

بعد تثبيت مادة الجيلاتين على قطب الفولاذ باستخدام تقنية الكروانومبيرومترى، ننقل إلى دراسة ظاهرة التآكل على سطح القطب المعدل (الفولاذ / جيلاتين).

3.1.III. قياس جهد التوازن:

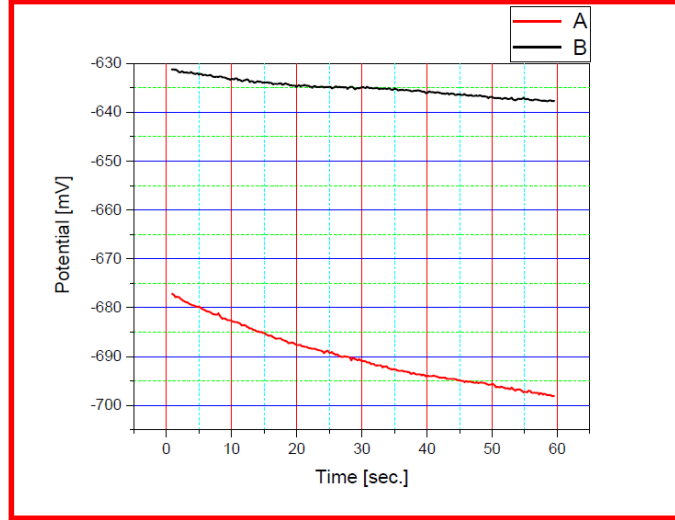


الشكل (III-9): منحنى لقياس جهد التوازن بدلالة الزمن لقطب الفولاذ.

نقارن منحنى جهد توازن في ماء البحر بين القطبيين التاليين :

A: قطب العمل المعدل (فولاذ / جيلاتين).

B: قطب العمل (فولاذ).

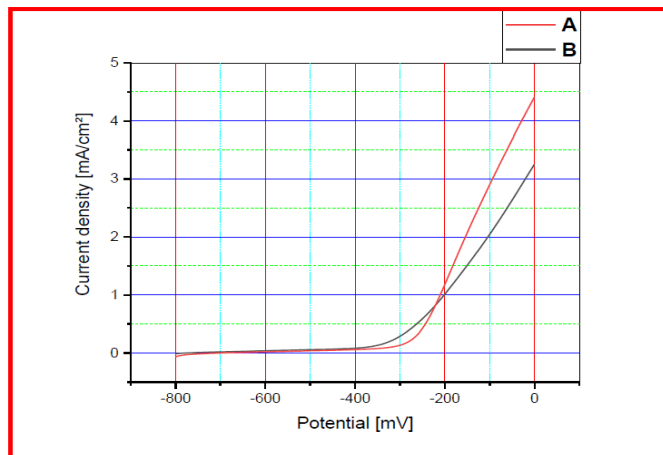


الشكل (10-III): جهد توازن القطب المعدل (فولاذ / جيلاتين) وقطب العمل في وسط مؤكسد (ماء البحر).

4.1.III. منحنى الاستقطاب :

نغلق الدارة للحصول على منحنى التآين واختار مجال المسح من 0 mV - إلى 800 mV - الموضح في الشكل

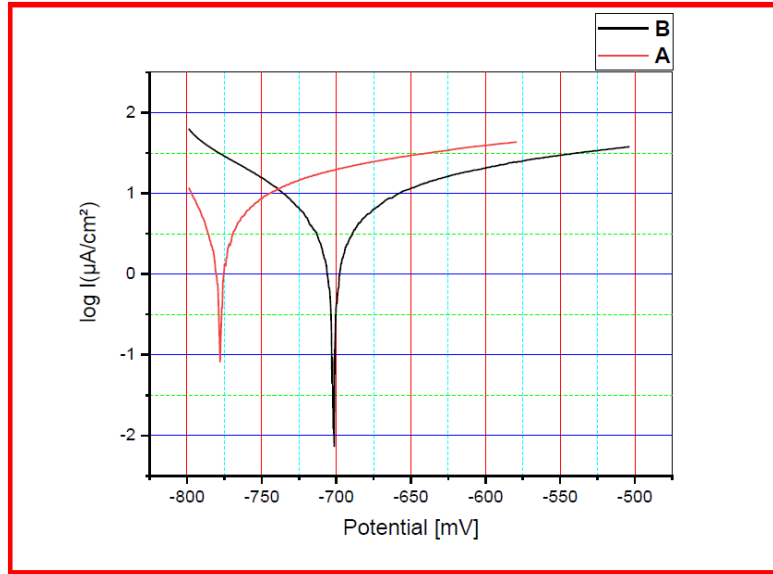
(11-III) حيث كانت سرعة المسح 10 mV/s.



الشكل (11-III): مقارنة منحنى الإستقطاب بين A: القطب العمل المعدل و B: قطب العمل في ماء البحر.

5.1.III. منحنى تفال (Tafel):

انطلاقاً من منحنى الاستقطاب نتحصل على منحنى تفال (Tafel) الخاص بقطب العمل والقطب المعدل في ماء البحر.



الشكل (12-III): منحنى تفال Tafel للقطبين فولاذ / جيلاتين، الفولاذ في ماء البحر.

يُظهر المنحنى إزاحة في قيم جهد التآكل نحو القيم السالبة عند وجود المثبط، مما يشير إلى أن آلية الحماية هي من النوع الحماية الكاثودية.

كما يمكننا الاستنتاج من الشكل (12-III)، الذي يوضح سرعة التآكل وشدة تيار التآكل، ومن خلال هذه المعطيات، يمكن حساب نسبة كفاءة المثبط.

الجدول (3-II) : نتائج منحنى تفال Tafel

Milieu eau de mer	E (i=0)	Rp	i corr:	Ba	Bc	Coef	Corrosion
A	- 777.5 mV	1940 ohm .cm ²	16.9241 mA/cm ²	485.0 mV	- 95.2 mV	1.0000	1197.9 μm/γ
B	- 701.8 mV	7460 ohm .cm ²	4.9322 mA/cm ²	142.6 mV	- 95.2 mV	1.0000	57.68 μm/γ

الفصل الثالث: تحليل ومناقشة النتائج

وبالعلاقة التالية نتحصل على نسبة كفاءة المثبط:

$$IE = \frac{LCun - LCin}{LCun} \times 100\%$$

$$IE = (16.9241 - 4.9322) \div 16.9241 = 0.708570 = 70.85\% \quad \text{تطبيق عددي :}$$

أي أن نسبة كفاءة المثبط تقدر ب : **70.85%**

خلاصة:

يُعتبر الجيلاتين مادة فعّالة وغير سامة في عمليات التثبيط على سطح الفولاذ X52 باستخدام الطريقة الكهروكيميائية، حيث يُظهر مردودًا أفضل مقارنةً بإذابته في ماء البحر وغمس الفولاذ مباشرةً.

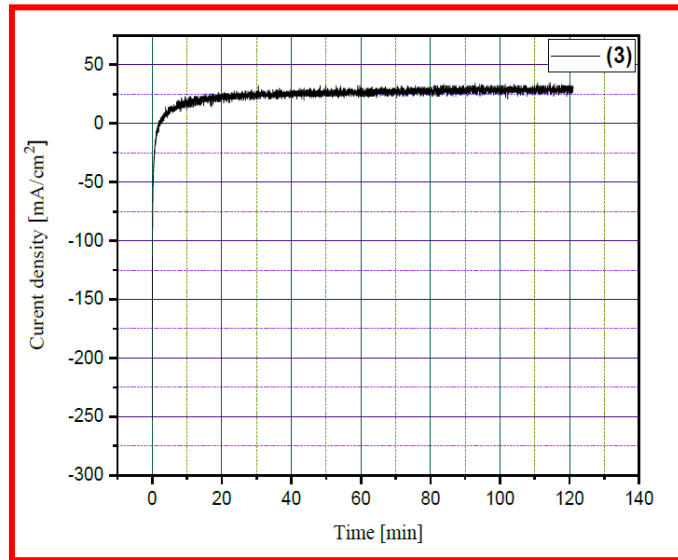
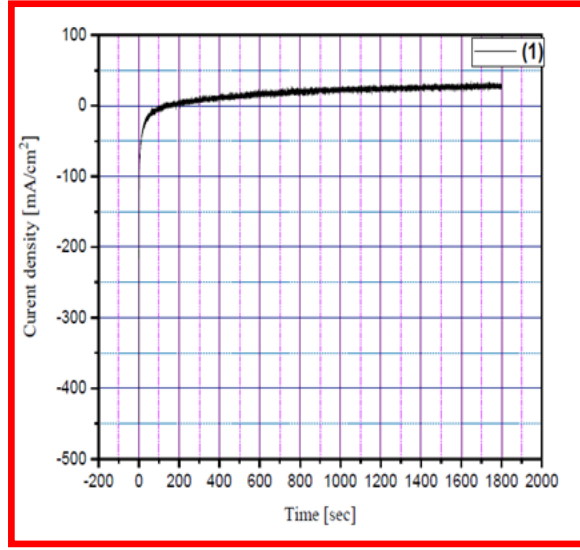
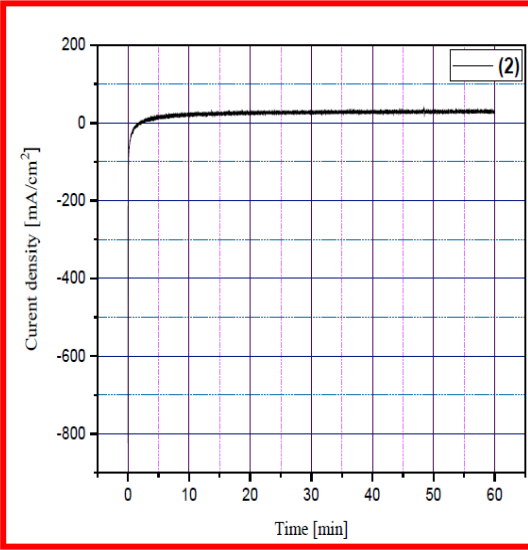
كما أن طريقة تثبيط الجيلاتين في محلول ملحي من كبريتات الصوديوم تُوفّر حماية فعّالة للمعدن

(الفولاذ X52) من التآكل، مما يساهم في تعزيز التثبيط الجيد على السطح.

2.III. التجربة الثانية :

1.2.III. منحنيات كرونوأمبيرومترية:

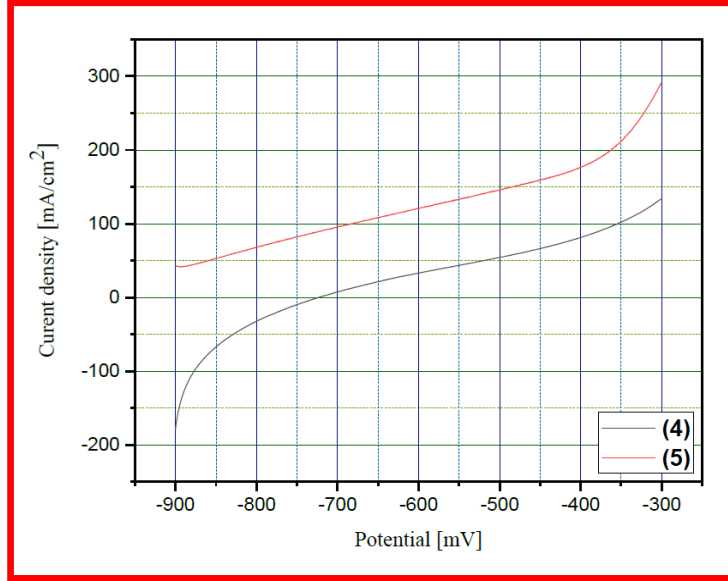
عند تطبيق جهد إرجاع بقيمة -1000 mV ، تم الحصول على المنحنيات التي توضح تغير شدة التيار مع الزمن، وذلك بهدف إرجاع مادة الجيلاتين أو بلمرتها على سطح الفولاذ.



الشكل (III-13): منحنيات الكرونة أمبيرومتري $i = f(t)$ (الجهد $E = -1000$ mV).

III.2.2. منحنى الإستقطاب لمدة ساعة :

في نفس الشروط السابقة نقوم بقياس جهد التوازن خلال ساعة كما هو موضح في الشكل (III-14.4.5) :

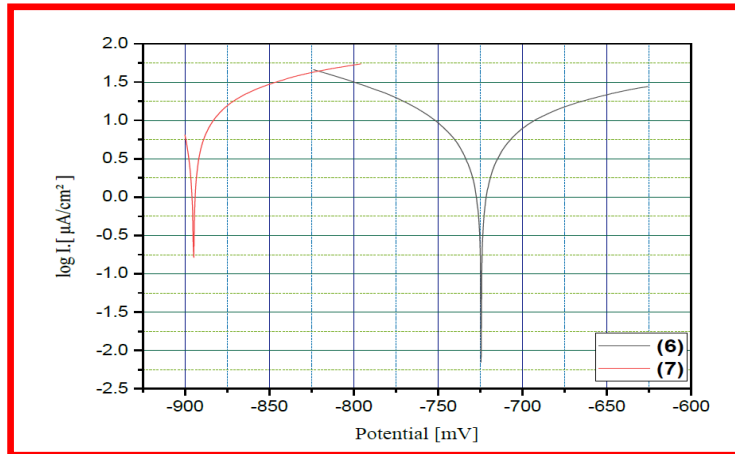


الشكل (14-III): (4): منحني إستقطاب الفولاذ في محلول NaCl
(5): منحني إستقطاب الفولاذ في 3 % NaCl بوجود الجيلاتين.

يُظهر الشكل (14.111) أنّ قِمة شدّة التيار تمثّل نهايات الأكسدة لكلّ من المنحني (4) والمنحني (5)، حيث تبلغ قيمتها 133.545 mA/cm^2 و 290.648 mA/cm^2 على التوالي. ونهايات الإرجاع في المنحنيين ممثلة بقِمة شدّة التيار 164.068 mA/cm^2 و 42.7583 mA/cm^2 على الترتيب. يُعزى ارتفاع شدّة التيار إلى تأثير الجيلاتين، ويُلاحظ السلوك ذاته في القياسات المماثلة.

3.2.III. منحني تفال (Tafel):

بنفس الشروط السابقة تحصلنا على منحني تفال الممثل في الشكل (15-III 7.6).



الشكل (15-III): منحني تفال (Tafel) (6): الفولاذ / NaCl
والمنحني (7): الفولاذ / NaCl بوجود الجيلاتين.

الفصل الثالث: تحليل ومناقشة النتائج

كما نستخلص من الشكل (III-15) الذي يبين سرعة التآكل بدلالة شدة تيار التآكل ، ومن هذه المعطيات نحسب نسبة التثبيط:

الجدول (II-4) : نتائج منحني تفال Tafel

Milieu eau de mer	E (i=0)	Rp	i corr:	Ba	Bc	Coef	Corrosion
6	-894.91 <i>mV</i>	0.93 <i>Kohm.cm²</i>	22.2933 <i>mA/cm²</i>	252.31 <i>mV</i>	- 144.50 <i>mV</i>	1.0000	260.71 <i>γm/μ</i>
7	-724.40 <i>mV</i>	2.91 <i>Kohm.cm²</i>	9.2943 <i>mA/cm²</i>	201.90 <i>mV</i>	- 142.2 <i>mV</i>	1.0000	108.70 <i>μm/γ</i>

و باستعمال العلاقة التالية نتحصل على نسبة كفاءة المثبط:

$$IE = \frac{LCun - LCin}{LCun} \times 100\%$$

$$IE = (9.2943 - 22.2933) \div 9.2943 = -1.39859 = 13.9858 \% \quad \text{تطبيق عددي :}$$

أي أن نسبة التثبيط : **13.98 %**

توضح المنحنيات (الإستقطاب و تفال) إزاحة قيم جهد التآكل بوجود المثبط نحو القيم السالبة وذلك يدل على أن نوع الحماية هو حماية كاثودية.

خاتمة

خاتمة عامة:

تُعدّ ظاهرة التآكل من التحديات العلمية والاقتصادية البارزة، لما لها من تأثيرات سلبية على المنشآت المعدنية وخسائر مادية جسيمة. وقد تم تطوير العديد من الوسائل للحد من هذه الظاهرة، من بينها استخدام المثبطات العضوية الصديقة للبيئة، نظراً لما تتميز به من فعالية عالية وانتشار واسع. ومن هذا المنطلق، تناولنا في هذه الدراسة تقييم فعالية الجيلاتين كمثبط طبيعي للتآكل على ركائز من فولاذ X52 المستخدم في نقل الغاز والمياه والنفط، وذلك في أوساط مختلفة تمثلت في ماء البحر ومحلول NaCl بتركيز 3%.

تمت متابعة سلوك التآكل باستخدام تقنيات كهروكيميائية، حيث أظهرت النتائج وجود تأثير واضح لمادة الجيلاتين في الحد من التآكل، وتم تحليل التفاعل بين المعدن والوسط من خلال منحنيات التآكل وأكسدة المعدن. كما أُجريت مقارنات بين حالتها وجود المثبط وغيابه لتحديد نسبة التثبيط وسرعة التآكل.

أظهرت النتائج أن الجيلاتين يمتلك قدرة جيدة على تثبيط التآكل في كلا الوسطين، غير أن فعاليته كانت أوضح في وسط ماء البحر، حيث بلغت كفاءة التثبيط حوالي 70.85%، مقارنة بـ 48.46% في وسط NaCl. يؤكد هذا الأداء المرتفع إلى قدرة الجيلاتين على تشكيل طبقة واقية أكثر استقراراً في بيئة البحر الغنية بالأيونات، مما يحدّ من تفاعل المعدن مع العوامل المؤكسدة.

بناءً عليه، يمكن الاستنتاج أن الجيلاتين يُعدّ مثبطاً فعالاً وصديقاً للبيئة، وتزداد فعاليته في الأوساط المعقدة مثل ماء البحر، مما يجعله خياراً واعداً في التطبيقات الصناعية، خصوصاً في البيئات البحرية.

المخلص:

يهدف هذا البحث إلى دراسة فعالية الجيلاتين كمثبط طبيعي لتآكل فولاذ X52. تم فحص تأثير الجيلاتين في وسطين مختلفين: ماء البحر ومحلول كلوريد الصوديوم (NaCl). استخدمت الدراسة تقنيات الفولطا متري الخطي ومنحنى Tafel لتحليل سلوك التآكل. أظهرت النتائج أن الجيلاتين قادر على تقليل معدل التآكل بشكل ملحوظ في كلا الوسطين. يعزى ذلك إلى تكوين طبقة حماية على سطح الفولاذ تمنع التفاعل مع الوسط المسبب للتآكل. بالتالي، يعتبر الجيلاتين مثبطاً فعالاً وصديقاً للبيئة لحماية الفولاذ في الظروف المختلفة.

الكلمات المفتاحية : جيلاتين مثبط تآكل, فولطامتر حلقي, منحنى الاستقطاب (التأين) الفولاذ X52 .

Abstract: This research aims to study the effectiveness of gelatin as a natural inhibitor of the corrosion of X52 steel. The effect of gelatin was examined in two different environments: seawater and sodium chloride (NaCl) solution. The study used linear voltammetry and Tafel curve techniques to analyze corrosion behavior. The results showed that gelatin is capable of significantly reducing the corrosion rate in both environments. This is attributed to the formation of a protective layer on the surface of the steel that prevents interaction with the corrosive medium. Therefore, gelatin is considered an effective and environmentally friendly inhibitor for protecting steel under different conditions.

Keywords: Gelatin corrosion inhibitor, cyclic voltammetry, polarization (ionization) curve, X52 steel.

Résumé: Cette recherche vise à étudier l'efficacité de la gélatine comme inhibiteur naturel de la corrosion de l'acier X52. L'effet de la gélatine a été examiné dans deux milieux différents : l'eau de mer et une solution de chlorure de sodium (NaCl). L'étude a utilisé les techniques de voltampérométrie linéaire et la courbe de Tafel pour analyser le comportement de la corrosion. Les résultats ont montré que la gélatine est capable de réduire de manière significative le taux de corrosion dans les deux milieux. Cela est attribué à la formation d'une couche protectrice à la surface de l'acier, empêchant l'interaction avec le milieu corrosif. Ainsi, la gélatine est considérée comme un inhibiteur efficace et respectueux de l'environnement pour la protection de l'acier dans différentes conditions.

Mots clés : Inhibiteur de corrosion de la gélatine, voltamétrie cyclique, courbe de polarisation (ionisation), acier X52.