HNSJ Humanities & Natural Sciences Journal
ISSN: (e) 2709-0833
www.hnjournal.net

مجلة العلوم الإنسانية والطبيعية
مجلة علمية محكمة (التصنيف: NSP)
معامل التأثير العربي للعام 2024 = 0.44

عنوان البحث

حماية الحديد من الصدأ والتآكل عن طريق آلية الطلاء بفلزي النحاس والخارصين وتأثير نوع التربة

عبدالله جباره *[1]، الهادي مهدي[1]، مدينة كومي كوكو[2]، ثورة عبده [2] و عاصم ازيرق[3]

[1] قسم الكيمياء والاحياء–جامعة الدلنج– كلية التربية، السودان.
[2] قسم الرياضيات والفيزياء–جامعة الدلنج– كلية التربية، السودان.
[3] قسم الكيمياء والاحياء–جامعة شرق كردفان–كلية التربية، السودان.
* بريد الكتروني الباحث المراسل: wadgobara35@gmail.com

HNSJ, 2026, 7(9); https://doi.org/10.53796/hnsj79/45
المعرف العلمي العربي للأبحاث: https://arsri.org/10000/79/45

تاريخ الاستقبال: 2026/08/15م تاريخ القبول: 2026/08/22م تاريخ النشر: 2026/09/01م

المستخلص

هدفت هذه الدراسة لحماية الحديد من الصدأ و التآكل عن طريق آلية الطلاء بفلزي النحاس والخارصين وتحديد اثر نوع التربة في زيادة صدأ الحديد. تم اجراء التجربة بمعمل الكيمياء بجامعة الدلنج. أخذت ثلاثة أنواع من التربة (طينية ، رملية ، صخرية) وبأحجام 500 جرام لكل نوع تربة وتم ذلك بأخذ التربة من السطح والوسط والعمق (50 cm) وخلطها مع بعضها البعض (لكل عينة تربة تخلط مع بعضها من المستويات الثلاث) ومن ثم وضعها في إناء زجاجي (حوض) ورشها بكمية كافية من الماء المقطر وغمر سلك الحديد وسلك الحديد المطلي بالخارصين (Zn) والنحاس(Cu) في الحوض وبزمن قدره (10يوم) وملاحظة أثر التربة عليه وأيهما يتسبب في تآكل أشد بفلز الحديد. اظهرت النتائج لم يتأثر طلاء الخارصين بالتربة الصخرية بينما تأثر الطلاء بالنحاس وكون ندبات تآكل قليلة والتصق سلك الطلاء بالتربة وتماسك التراب عليه، أما التربة الطينية والرملية والصخرية لم تتأثر الطلاء بالخارضين. بينما الطلاء بالنحاس تأثر في التربة الصخرية وكون ندبات تآكل قليلة وألتصق سلك الطلاء بالتربة وتماسك التراب عليه. وفي التربة الرملية تأثر الطلاء بالنحاس وتم التصاق التربة بالطلاء بدرجة شديدة وتشربت التربة في السلك المطلي باللون البني المحمر. وهذا يعني وجود تآكل. أما التربة الطينية فنجد طلاء النحاس كون ندبات أكسدة وتآكل واضحين والتصاق للتربة بالطلاء ولكنه أقل من إلتصاق التربة الرملية والصخرية. توصي الدراسة باستخدام الطلاء الكهربي كمعالجة لعدم التآكل في المعادن وذلك لأنه قليل التكلفة ورخيص واقتصادياً.

الكلمات المفتاحية: حماية، سلك حديد، الصدأ، النحاس والخارصين.

RESEARCH TITLE

Protection of Iron Against Rust and Corrosion Through Copper and Zinc Coating and the Effect of Soil Type

Abstract

This study aimed to protect iron from rust or corrosion using copper and zinc plating and to determine the effect of soil type on increasing iron corrosion. The experiment was conducted in the Chemistry Laboratory at Al-Dalanj University. Three types of soil (clay, sandy, and rocky) were used, with 500 grams of each soil type collected from the surface, middle, and a depth of 50 cm. The soil samples were mixed together (each sample was mixed from all three levels) and then placed in a glass container (basin). Sufficient distilled water was sprayed on the container, and iron wire and iron wire coated with zinc (Zn) and copper (Cu) were immersed in the basin for 10 days. The effect of the soil on the iron was observed, and which soil caused the most corrosion of the iron. The results showed that the zinc coating was unaffected by rocky soil, while the copper coating was affected, forming few corrosion scars and causing the coated wire to adhere to the soil. Clay, sandy, and rocky soils did not affect the zinc coating. While copper plating was affected in rocky soil, producing few corrosion scars, the plating wire adhered to the soil, and the soil bonded to it. In sandy soil, the copper plating was affected, with the soil adhering to the plating to a high degree, and the soil absorbed the plating wire, turning it reddish-brown. This indicates corrosion. In clay soil, the copper plating produced clear oxidation and corrosion scars, and the soil adhered to the plating, but to a lesser extent than in sandy and rocky soils. The study recommends using electroplating as a treatment to prevent corrosion in metals because it is inexpensive, cost-effective, and economical.

Key Words: Protection, Iron Wire, Rust, Copper and Zinc.

المقدمة:

جميع المعادن تصدأ بصورة عامة وان كانت درجة الصدأ وتأثيره يختلف من معدن إلى آخر، لأن الصدأ هو عبارة عن تعريف عام ينطبق على تلك العملية التي تتحول فيها فلزات غير متحدة إلى مركبات (ميشيل ج :1989م). الصدأ الذي يحدث في المعادن يختلف باختلاف العامل المؤكسد يمكن أن يكون الصدأ أوكسيد للفلز مثل (أول أوكسيد الكربونCO) (أوكسيد الحديد Fe_2O_3 أوكسيد الخارصين CuO , (وقد يكون الصدأ أو التآكل كبريتات أو كربونات أو نترات أو كلورات) ($FeCO_3$, $Cu\ SO_4$) ولا ننسى أن الصدأ أيضاً قد يكون هيدروكسيدات للفلزات المؤكسدة $Fe(OH)_3$) ويمكن مثلاً كتابة هيدروكسديات الحديد كعملية تأكسد كالأتي:

$$4\,Fe(OH)_2 + O_2 \rightarrow 4Fe\,(OH)_3$$

نظراً لأن الحديد يصدأ في هواء جاف أو في ماء خال تماماً من الاوكسجين، فإنه يبدو، كلاً من (O_2) (H_2O) يكونان ضروريين لتكوين الصدأ. وعلاوة على ذلك فإنه يمكن إسراع الصدأ عن طريق وجود أحماض أو وجود صدأ نفسه على الفلز (عامل حفز ذاتي)، (نتائج الصدأ "أضرار" ص14، Consequences of Rust)

أ. فقدان اللمعان:

الصدأ يسبب فقدان اللمعان للمعادن، وفقدان اللمعان هو عبارة عن تحول في شكل انعكاس الضوء عن المادة بسبب تغطيتها بطبقة من الصدأ كالتي تتكون على سطح النحاس، الألمونيوم، الفضة حيث أنه يحدث لهذه الفلزات تأكسد.

ب.علاج ظاهرة فقدان اللمعان:

عند وقوع فقد البريق يتم معالجته كيميائياً وغالباً ما يكون ذلك بحمض قوى.

ج. منع الظاهرة

يتم منع هذه الظاهرة غالباً بالطلاء (القصدرة) حيث يتم طلاء سطح المعدن بمادة أخرى غير نشطة كيميائياً (مثل القصدير أو الشمع) وهذا يمنع وصول الأوكسجين إلى سطح المادة المراد حمايتها. (2017م : Wikipedia)

د. أنواع التآكل بالصدأ:

يمكن تقسيم التآكل بالصدأ إلى ثلاثة مجموعات رئيسة الصدأ المنتظم والصدأ المكاني والصدأ بين البلوري.

1. الصدأ المنتظم:

تبدو مظاهره في تآكل منتظم للمعدن على كل السطح ويحدث هذا النوع في المعادن أو السبائك ذات البنية الوحيدة الطور (المعادن النقية) والمحاليل الصلبة والمركبات الكيميائية). (2017م : Wikipedia)

2. الصدأ المكاني:

يتآكل أثناءه المعدن في أماكن متفرقة من السطح، ويلاحظ حدوث هذا النوع من الصدأ بالسبائك الكثيرة الأطوار ذات البنية الخشنة الصدأ بالسبائك الكثيرة الأطوار ذات البنية الخشنة كما يحدث بالسبائك الوحيدة الطور والمعادن النقية عند تدمير الغلاف الواقي.(http://www.byto.com.co.:2016) وتسبب الخدوش الحزوز السطحية صدأ مكاني. إذ تتكون في هذه الأماكن ظروف لتكون الأعمدة الكهربائية المتناهية في الصغر.

3- الصدأ بين البلوري:

يتميز بانتشار الصدأ علي الحدود كحبيبات، ويرجع السبب في ذلك إلي أن تصعد الحبيبات أسفل (مصعد) وجهد

الحبيبات أعلي (مهبط) وهذا النوع من الصدأ هو أكثر الأنواع خطورة لأنه ينتشر في أعماق المعادن ولا يسبب أي تغير ملموس علي السطح.وتتعرض لهذا النوع من الصدأ أنواع الصلب النيكل– كروسية وسبائك الألمونيوم وهي التي يمكن أن تفرز أطواراً منتشرة. (Wikipedia : 2017م)

تآكل الحديد: Corrosion of Ferrum

تآكل الحديد الصلب يؤثر بشكل مستمر في المنازل، السيارات، الطائرات، الشوارع، الجسور، المباني ووسائل إنتاج الطاقة ومنشآت النفط والغاز. فمن وجهة نظر اقتصادية يكلف الصدأ حوالي 3–4% من الناتج المحلي الإجمالي في البلدان الصناعية، ففي الولايات المتحدة تقدر تكلفة الأضرار التي يسببها الصدأ ب .276 مليار دولار سنوياً وهو ما يعادل 3.1% من أجمالي الناتج المحلي. (Wikipedia : 2017م)

صدأ الحديد لا يلتصق بسطح المعدن مما يسبب تواصل واستمرار التآكل الذي يبدأ من نقاط صغيرة يمكن أن نسميها (لسعات التآكل) ثمّ بمرور الزمن ينتشر الصدأ إلى أجزاء الهياكل المعدنية. . (Wikipedia : 2017م)

تشكل الصدأ: Rust formatted

يمكن فهم عملية تشكل الصدأ من خلال المراحل الثلاث التالية: –

المرحلة الأولى: First stage

أكسدة الحديد إلى شوارد الحديد الثنائي:

$$Fe_{(s)} \rightarrow Fe^{2+} + 2e$$

إرجاع أكسجين الهواء في وسط مائي:

$$4e + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4HO^-{}_{aq}$$

المعادلة الإجمالية:

$$2Fe_{(s)} + O_{2(g)} + 2H_2O_{(l)} \rightarrow 2Fe^{2+}{}_{(aq)} + 4OH_{(aq)}$$

المرحلة الثانية: Second stage

تتأكسد شوارد الحديد الثنائي إلى شوارد الحديد الثلاثي:

$$Fe^{2+}{}_{(aq)} \rightarrow Fe^{3+} + e^-$$

ويتحول هيدروكسيد الحديد الثنائي إلى الثلاثي:

$$4Fe(OH)_2 + O_{2(g)} + 2H_2O_{(l)} \rightarrow 4Fe(OH)_3$$

المرحلة الثالثة: Third stage

يتحول هيدروكسيد الحديد الثنائي تلقائياً إلى أكسيد الحديد الثلاثي مشكلاً الصدأ:

$$4Fe(OH)_3 \rightarrow Fe_2.3H_2O$$

مع وجود زيادة من الرطوبة يمكن تتضاعف عدد جزيئات الماء المتحدة مع أكسيد الحديد الثلاثي، عدد جزئيات الماء الداخلة في تركيب الحديد الثلاثي متعلقة بمعدل الرطوبة وهي تحدد لون الصدأ من البرتقالي إلى الأحمر الداكن إلى الأسود.

$$2Fe(OH)_3.3H_2O_{(s)} + nH_2O_{(l)} \rightarrow Fe_2O_3.XH_2O_{(s)}$$

صدأ المعادن الأخرى Zn, Cu, Al :

المعادن الأخرى مثل الألمونيوم Al والنحاس Cu تتفاعل بدورها مع الأوكسجين O2 تشكل طبقة من أكسيد المعدن وعلى خلاف أكسيد الحديد فإن أكسيد الألمونيوم والنحاس تشكل طبقة واقية (Protective layer) لبقية ذرات المعدن وتمنع الأكسجين من ملامستها وأكسدتها وتتحقق بذلك حماية ذاتية من الآثار المدمرة للصدأ والتآكل. (http://mandooz.com%...)

تعريفه: الصدأ هو فساد المعادن والمواد عن طريق التداخل الكيميائي في البيئة المحيطة للمعادن. (Graemer:2009) يتآكل سطح المعدن الموجود في حالة تفاعل كيميائي أو كهروكيميائي مع الوسط الخارجي، ويسمى هذا التآكل بالصدأ. وهناك نوعان من الصدأ:

أنواع الصدأ:

الصدأ الكيميائي: Chemical Corrosion

يحدث بسبب تفاعل المعدن مع الغازات الجافة والسوائل العازلة دون ظهور تيار كهربائي. ومن الأمثلة على حدوث التآكل للمعادن هو صدأ، اخضرار النحاس، تعتم الفضة وازرراق الألمونيوم، (سهير وآخرون: 2008م)؛ ويحدث صدأ الحديد نتيجة لتأين الحديد في الماء معطى أيونات الحديد في الماء الأكسجين المذاب في الماء عند سطح الحديد الثنائي إلى هيدوكسيد الحديد الثلاثي. ويتكون صدأ الحديد من خليط من (هيدروكسيد الحديد الثنائي وهيدروكسيد الحديد الثلاثي) وعليه يمكن القول بأن صدأ الحديد أذا توفر الشرطين معاً:

أ- الماء أو الرطوبة

ب- الهواء (الأكسجين)

وفي حالة غياب أحدهما لا يحدث الصدأ.

2. الصدأ الكهروكيميائي: Electrochemical corrosion

أما بالنسبة للصدأ الكهروكيميائي يحدث نتيجة لظهور التيار الكهربائي بين المعدن والإلكترونات المحيطة، تتكون الشبكة البلورية للمعدن من أيونات موجبة الشحنة (كاتيونات) موجودة في أركان الشبكة والبلورية والإلكترونات الحرة المتحركة في المعدن كله. ويمكن أن تنفصل الكاتيونات عن سطح المعدن وأن تنتقل إلى الوسط الجاور (الالكتروليت) ويسمى فرق الجهد المتكون عند تلامس المعدن مع الالكتروليت (بالجهد القطبي) وهو الدال على ميل المعدن للذوبان وتتوقف قيمته أساساً على تركيب الالكتروليت ويحدد الجهد القطبي للمعادن تجريبياً بمقارنته بجهد الهيدروجين هو المعتبر مساوياً للصفر. والمعادن تختلف في الجهد القطبي، والمعادن النقية والسبائك هي الوحيدة تقاوم الصدأ جيداً(google – العلوم الفيزيائية ...http:physique 14).

أضرار الصدأ: Detriments of the corrosion

نتائج الصدأ كثيرة ومتعددة ولها تأثيرات على الأدوات والأجهزة وتركيب المعدن المعني وهذه الأضرار هي:

1/ انخفاض كتلة المعدن: Reducing the mass of metal

2/ الأذى الجسيم الناتج من التراكيب الهندسية المنهارة نتيجة للصدأ وتسبب جروح وأذى للإنسان مثل الكباري- السيارات-

الطائرات فقد يعمل الصدأ في الخفاء ويحدث الانهيار فجأة في المنشأة أو الجسم المعدني.

3/ فقد وإضاعة الزمن في استبدال الأجزاء المعدنية المنهارة بأجزاء جديدة وبذل شتى الطرق في المحافظة على الجزء المعدني السليم وذلك بوسائل الحماية المختلفة (طلاء معدني– دهانات (بوهيات)– حماية جلفانية– كاثودية ..الخ).

4/ تلوث السوائل liquid contamination الموجودة في الآنية المعدنية Metal vessels contamination والأنابيب Pipes بكميات قليلة من الصدأ وذلك حسب نوع وتركيب المادة الكيميائية وأكثر المواد الكيميائية تلوثاً بالصدأ هي الأحماض والقواعد والأملاح.(Aisha and etl:2008)

5/ ثقب الأواني والأنابيب مما يدع هروب محتوياتها وتسببها للأذى لما يحيط بها من أشياء مثل أنابيب التدفئة المنزلية عندما تثقب عن طريق الصدأ فإنها تدمر السجادات وما يحيط بالمنزل من زينة.

6/ مياه البحار قد تدخل إلى أجزاء محطات الطاقة Power station في البحار وتسبب خسائر للأنابيب والمحركات الداخلية للآلة.

طرق حماية المعادن من الصدأ:

Methods of protection metal from corrosion

1) العوازل الاعتيادية:

مثل الزيوت والشحوم مثلاً لتخزين وحماية قطع الغيار لمختلف الآليات حيث لا يصدأ المعدن لأنه موجود في بيئة معزولة عن الرطوبة والهواء كما نلاحظ الإسبيرات Spares على رفوف الدكاكين. (http://www.by to.com...)

2) الطلاء بالدهان (البوهيات):

أفضل طريقة موجودة الآن هي طلاء المعدن بالدهان لكن إذا ما خدش الدهان أو ثقب بحيث يتقشر ولو جزء بسيط من المعدن فإنه سرعان ما يتكون الصدأ تحت طبقة الدهان. ونجد الطلاء بالدهان في مختلف وسائل النقل، الهياكل المعدنية للمنشآت الصناعية والجسور وغيرها.(http://www.by to.com)

وتقل قدرة الحديد كثيراً عند التأكسد مقارنة بسبائكه المطلية بمعادن أخرى مثل (الستانلس ستيل) (Stainless steel) وهو سبيكة من الحديد والكروم Cr حيث تتكون طبقة من أوكسيد الكروم تحمي الحديد من التآكل.

3) الحماية الكاثودية (المهبطية): Cathodic protection

أن تآكل الأنابيب تحت الأرض وخزانات الحديد يمكن منعها بتوصيلها بمعادن مثل الخارصين Zn والمغنسيوم Mg والتي تتأكسد بسرعة أكثر من الحديد. والعملية تتم بوضع المعدن المراد عزله موضع المهبط بحيث يكون المصعد مصنوعاً من الجسم العازل، بحيث يصبح التحول الكيميائي المسبب للتآكل غير ممكن الحدوث.

(amaany.www.com)

4) الجلفنة: Galvanization protection

تغليف المعدن بطبقة من الخارصين أو النحاس مثل الصفائح التي تستخدم في صناعة الصهاريج المخصصة لماء

الشرب وللأنابيب المعدنية لشبكات المياه. وذلك بتغطية المعدن بطبقة رقيقة من الزنك تحمي الحديد من التآكل وما يسمى بألواح الزنك المستخدمة في المباني هي في الحقيقة ألواح حديد مغطاة بطبقة رقيقة من الزنك (صلاح الدين – 2006م) وذلك يتم في خلية تحليل كهربي ذات تيار ضعيف 1.1 فولت. السبب في عملية الحماية بالخارصين أو ما تعرف بجلفنة الحديد iron galvanization (طلاء الحديد بالزنك) لأن يتأكسد بسهولة أكثر من الحديد كما في التجربتين (1)، (2)

$$Zn_{(s)} \rightarrow Zn_{(aq)} + 2e \quad E^0 = 76.V$$

لذا إذا تعرض الحديد للخدش فإن الزنك يقاوم الهجوم لأن معدن Zn يعمل كمصعد (+) والحديد Fe كمهبط (−) (سهير وآخرون 2008م) كما هو واضح في تجربة الطلاء بالخارصين.

5) السبائك:

يمكن إضافة بعض العناصر للحديد مثل الكروم Cr والفناديوم (V) أو المنجنيز (Mn) لتنتج أنواع من الصلب ذات خواص مطلوبة كما في سبيكة الحديد والكروم الغير قابلة للصدأ حيث تتكون على سطحها طبقة رقيقة صماء من أوكسيد الكروم تحمي السبيكة من التآكل. (ميشل، جميس: 1990م).

الفلزات الثلاثة الشائعة والمقاومة لتأثير الأحماض مثل حمض HCl هي النحاس والفضة والزئبق. والسبب ببساطة أن أيون +H ليس عاملاً مؤكسداً قوياً لدرجة تفاعله معهم. فإنهم يتطلبون بالإضافة إلى +H أيوناً سالباً مؤكسداً. مثلاً ايون النترات −NO3 فهذه الفلزات تذوب في حمض النتريك HNO_3 والناتج يعتمد إلى حد ما على مدى تركيز الحامض: (ميشل، جميس: 1990م).

$$(1).\ 3Cu + 2NO^-_3 + 8H^+ \rightarrow 3Cu^{2+} + 2NO + 4H_2O$$

$$(2).\ Cu + 2NO^-_3 + 4H^+ \rightarrow Cu^{2+} + 2NO + 4H_2O \quad (HNO_3 \text{مخفف})$$

طرق التحكم في الصدأ:

أ- السبائك:

وهي إضافة عناصر إلي أخري لصفات مرغوبة في عنصر محدد وأخري غير مرغوب فيها بالعنصر الأخر.(http://www.by to. Com)

ب- الأغلفة الأكسيدية: ويحصل عليها علي سطح الأجزاء المعدنية بالأكسدة أو الفسفتة وتقي المعدن من الصدأ بشكل جيد وفعال. وتجري الأكسدة في عوامل مؤكسدة قوية مثل المحلول المائي لصودا كاوية أو أملاح آخري. وطريقة الأكسدة غالباً تؤكسد المشغولات المصنوعة من الألمونيوم لان طبقة الأكسيد في الألمونيوم تشكل مانع وحامي جيد من الصدأ بما تسمي عملية Anodizinghttp://www.by to. Com وتجري الفسفته في محاليل ساخنة من الفوسفات الحامضية للحديد والمنجنيز وتعتبر الطبقة الأكسيدية والفوسفاتية قاعدة جدية للتشحيم الواقي والطلاء وإعطاء الألوان للمنتجات.

ج- الوقاية بمعاملة الوسط الخارجي:

تتلخص هذه الوقاية إما في إزالة المركبات الضارة التي تسبب الصدأ (كأن يزال الأوكسجين من الماء لمنع الصدأ) . أو أن يضاف عامل يقلل من فعاليته وهو الكروميك- بايكرومات البوتاسيوم بنسبة 0.5 % تستعمل هذه الطريقة في نظام التبريد بمحركات الاحتراق الداخلي ويمنع هذا حدوث الصدأ عملياً..(http://www.by to. Com)

د- التغطية بطريقة النثر:

تتلخص في نثر المعدن المصهور بواسطة الهواء المضغوط من جهاز خاص يسمي (المزرر atomizer) أي يسبب التزرية لدقائق المعدن المنصهر علي سطح المعدن الأساسي الذي ينظف قبل عملية الرش. ويغذي الجهاز بالمعدن علي شكل سلك يصهر بلهب غازي أو بقوس كهربائي أو يغذي علي شكل مسحوق. وتكون بهذا الطريقة مسامية وهي لذا أقل جودة من التغطية الجلفانية ويغطي لهذا الطريقة صناعياً الصلب بالزنك Zn والكادميوم Cd وسبائكهما. http://www.by to. Com

هـ- التغطية بطريقة ضغط طبقة واقية: تتلخص في إيجاد طبقة علي المعدن من معدن آخر يكون غلاف متين واقياً وعادة يغطي الحديد بالنحاس الغير قابل للصدأ.

1- الطلاء الكهربي:

ربما كانت بطارية (الفرثيين) أول نظام يستخدم الطلاء الكهربائي علي الرغم من أن هذا لم يؤكد بعد، ثم أختراع الكهروكيمياء الحديثة من قبل الكيميائي الإيطالي لوجي برونيالتيللي عام 1805م. أستخدم برونياتيللي اختراع زميله اليساندرو فولتا المخترع قبل ذلك بخمس سنوات ليسهل بذلك عملية الترسيب الكهربي الأولي اختراعات برونياتيللي أوقفت من قبل الأكاديمية الفرنسية للعلوم.وثم منعها في الصناعة في الثلاثين عام اللاحقة. في عام 1839م علماء فير بريطانيا وروسيا أخترعوا عمليات ترسب المعادن بشكل مستقل مماثلة لطريقة برونياتيللي لعملية طلاء النحاس بالكهرباء أكتشف جون رايت من برمنجهام (انكلترا) أن سيانيد البوتاسيوم يعتبر من المكونات المناسبة لالكتروليت الطلاء الكهربي للذهب والفضة. وقد منح زملاء رايت جون رايت جون الكنجتون وهنري الكنجتون براءة الاختراع الأول للطلاء الكهربائي في عام 1840 كام Norddeutsche Affinerie في هامبروغ بألمنايا الغربية أول مصنع للطلاء الكهربائي الحديث بدعم إنتاجه في عام 1876م. وبتطور علم الكيمياء الكهربائية أصبحت علاقتها بعملية الطلاء الكهربائي أكثر فهماً وتطورت تطبيقات أخري غير زخرفية (تربينية) لعملية الطلاء للمعادن توسعت عمليات الطلاء في الأحواض ومعداتها واستيعاب إعداد هائلة لأجسام كبيرة الحجم ولتطبيقات هندسية خاصة.

و- الطلاء بالكهرباء:

هو عملية الطلاء التي يتم فيها نقل أيونات المعادن في محلول إكتروليتي بواسطة مجال كهربائي. العملية تستخدم التيار الكهرباء لإزالة الكاتيونات من مادة مرغوبة في المحلول وتغطي مادة موصلة للكهرباء بطبقة رقيقة من هذه المادة، كمعدن معين مثلاً وتستخدم هذه العملية في المقام الأول للتغليف بطبقة من مادة معينة لتضفي خاصية مرغوب فيها علي المادة الأساسية (علي سبيل المثال: التآكل والكشط، الحماية من الصدأ، صفات جمالية وزينة وغيرها). استخدام آخر للطلاء الكهربي هو زيادة سمك جزء معين لديه نقص في الأبعاد وتسمي هذه العملية المستخدمة في الطلاء الكهرباء (بالترسيب الكهربي) Electrodepositing وهي مماثلة لخلية جلفانية تعمل في الاتجاه المعاكس. (الموسوعة الحرة : 2017). الجزء الذي يتم طلاؤه هو القطب السالب للدائرة. يتم صنع الأنود من المعدن المراد طلائه غمر كلا من المكونات في محلول يسمي إلكتروليت يحتوي علي واحد أو أكثر من الأملاح المعدنية الذائبة وكذلك الأيونات الأخرى التي تسمح بتدفق الكهرباء. مصدر الطاقة هو تيار مستمر موصل بالطب الموجب مما يؤكسد ذرات المعدن التي يتألف منها الأنود ويسمح لها بالذوبان في المحلول. عند القطب السالب يتم إزالة ايونات المعدن الذائبة في المحلول عند الكاثود، فتلتصق الأيونات بالكثود وبذلك يكون معدل ذوبان القطب الموجب يساوي المعدل الذي به الكاثود بالتوازي مع التيار المار بالدائرة. في حالة

الأيونات تتجدد بإستمرار من خلال الدائرة في محلول الالكتروليت بواسطة القطب الموجب.(الموسوعة الحرة : 2017). في بعض الطرق الأخرى لعملية الطلاء الكهربي يمكن استخدام قطب موجب قابل للذوبان، مثل الرصاص في الطريقة الأيونات المستخدمة في الطلاء الكاثود لابد أن يتم تحديدها دورياً في نفس الوقت الذي يتم فيه سحبها من محلول الألكتروليت.

2- آثار الطلاء الكهربي:

الطلاء بالكهرباء يغير الخواص الكيميائية والفيزيائية والميكانيكية. مثل التغير الكيميائي هو عندما يتم الطلاء بالنيكل (Ni) مما يحسن من مقاومة التآكل والصدأ مثال التغير الفيزيائي هو تغير في المظهر الخارجي مثال علي تغير الميكانيكي هو تغير في قوة الشد أو صلابة السطح التي هي السمة المطلوبة في صناعة أدوات القطع.(الموسوعة الحرة:2017).

3- خلية هال:

خلية هال هي نوع من خلايا الاختبار المستخدمة لفحص حالة أحواض الطلاء الكهربائي من حيث الجودة. لأنها تتيح الاستفادة من كثافة التيار العالية وفحص تركيز للإضافات والتعرف علي الشوائب.

خلية هال تبدل أحواض الطلاء علي نطاق المختبر. يملأ الحوض بعينة من محلول الطلاء المعدني، قطب موجب مناسب متصلاً بمقدم تيار. يتم استبدال (السطح المراد طلائه) بلوحة اختبار يتمم طلاؤها لتظهر مدي (فاعلية) اللحام.

خلية هال حاوية على هيئة شبه منحرف يحمل 267 ملليتر من محلول. هذا الشكل يسمح بوضع لوحة الاختبار علي زاوية إلي القطب الموجب ونتيجة لذلك الجسم يطلي في تيارات المحلول يقوم بالتحسين الكمي لتركيز الإضافات. إضافة إلي 267 مل ليتر أي ما يعادل 0.5 أوقية في خزان الطلاء.(الموسوعة الحرة :2017).

يتأكسد النحاس عن القطب الموجب Cu^{2+} إلي عن طريق فقد إلكترونين:

$$Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$$

يتحد Cu^{2+} مع $SO_4{}^{2-}$ في المحلول لتشكيل كبريتات النحاس عند القطب السالب:

$$Cu^{2+} + SO_4{}^{2-} \rightarrow CuSO_4$$

يتم تحويل Cu+2 إلي نحاس لامع من خلال حصولها علي اثنين من الالكترونات. النتيجة هي نقل فعال للنحاس من الأنود إلي طبقة تغطي القطب السالب ولا يتم استخدام السبائك في عملية الطلاء إلا في بعض الأستثناءات يمكن استخدام سبيكة النحاس الأصفر والقصدير. (الموسوعة الحرة :2017).

العديد من أحواض الطلاء تتضمن سيانيد المعادن الأخرى (سيانيد البوتاسيوم) بالإضافة إلي سيانيد من المعدن المراد ترسيبه هذا السيانيد الحر يسهل تآكل القطب الموجب ويساهم في زيادة التوصيل الكهربائي. بالإضافة إلي ذلك يمكن إضافة المواد الكيميائية غير المعدنية مثل الكربون والفوسفات لزيادة التوصيل. (الموسوعة الحرة :2017).

4- حمض الهيدروكلوريك (**HCl**):

من المستحضرات الكيميائية المشهورة هو حمض كلور الماء أو ما يسمي تجارياً حمض الهيدروليك وهو عبارة عن حمض أكال قوي للغاية يعمل علي تآكل الأشياء وهو المكون الرئيس للعصارة الهضمية في المعدة التي تعمل علي هضم الطعام. وأول من أكتشف هذا الحمض هو العام المسلم جابر بن حيان ويعتبر تركيبه الكيميائي عبارة عن تفاعل كيميائي بين الكلور والهيدروجين جزيئ لجزيئ بشكل متعادل في تركيب لكلا الجزئيات وهذا يجعل من هذا المركب مثمراً

في خواصه الفيزيائية والكيميائية بسبب بساطة تركيبه فمن خصائصه الفيزيائية لأنه يتواجد في الطبيعة علي شكل غاز وسهولة إنحلاله في الماء مكوناً الحمض المسمي بحمض الهيدروكلوريك والذي يتواجد بثلاثة تراكيز تجارية مختلفة تعتمد نسبة الغاز المذاب وهي النسب المشهورة 28 و 32 و 38% من الغاز المذاب إلي الماء المحقون فيه الحمض، ولكل تركيز من هذه التركيزات أستخداماته البشرية والصناعية ولكن يجب الحذر عند أستخدامه كونه حمض أكال حارق يعمل علي تآكل الأجسام بسهوله، وأيضاً من خواصه الفيزيائية لأنه ردئي التوصيل للتيار الكهربائي ويذوب في البنزين والكحول بسهولة، ويتميز بأنه عديم اللون ورائحته لاذعة كريهة لا يمكن أستنشاقها وتسبب مشاكل وضيق في التنفس عند إستنشاقها،(الموسوعة الحرة:2017).

ويتم أستخدامه في إزالة صدأ الحديد من علي الحديد لتحضيره لعملية الجلفنة والدهان والحماية من الصدأ فهو يعمل علي التفاعل مع أوكسيد الحديد ويعمل علي التخلص منه بشكل كامل. ويستخدم في المحاليل المنظمة لرفع درجة الرقم الهيدروجيني لها إذا كان تركيزه منخفضاً،(الموسوعة الحرة:2017).

المواد والطرق: Materials and Methods

المواد الكيميائية: Chemicals

حبيبات حديد Fe صلب (النقاوة 95% LOBA Chemie Bombay India)، مسحوق خارصين Zn صلب(النقاوة 97% LOBA Chemie Bombay India) ، حمض الهيدروكلوريك مولاري HCL. (LOBA Chemie Bombay India)، حمض النتريك HNO_3 مولاري. (LOBA Chemie Bombay India)، حمض الكبريتيك H2SO4 مولاري. (LOBA Chemie Bombay India)، هيدروكسيد الصوديوم NaOH. 5جم/لتر (BRECKLAND Scientific Supplies. Thetford, Norfolk)، محلول كبيرتات النحاس 5.CuSO4 جم/لتر (BRECKLAND Scientific Supplies. Thetford, Norfolk)، سلك حديد، سلك نحاس.

الأدوات: Equipment

أنابيب أختبار، حوامل أنبوب، أسطوانة قياس 100مل، سحاحة صغيرة 10مل ،كأسات زجاجية سعة(40 مل ، 200 مل)، ميزان حساس، قطعة حديد وزن 5 جم بها شوائب(مؤكسدة)، صنفرة حديد، بطارية (فولتية)، أسلاك نحاس توصيل كهربي، ورق ترشيح عادي، مصدر تيار كهربي، ساعة.

تحضير العينات: Preparation of Samples

أضيف واحد جرام من مسوق الزنك إلي حجم 1جم من مسحوق الخارصين Zn الصلب لمدة 28 دقيقة. وكذلك أضيف نفس الحجم مع برادة الحديد Fe وبنفس التركيز المذكور وأيضاً تكرار التجربة وذلك لمدة 48 دقيقة مدة أخري. ثم أضيف حمض HCl مولاري إلي مسحوق الخارصين الصلب (1جم) لمدة 15 دقيقة وأعيدت التجربة مع مسحوق الحديد Fe بنفس الطريقة والتركيز المذكورة.

$$2Fe_{(s)} + 6HCl_{(aq)} \rightarrow 2FeCl_3 + 3H_2$$

$$Zn_{(s)} + 2HCl_{(aq)} \rightarrow ZnCl_2 + H_2$$

واحد جرام من حبيبات الحديد أضيف إلى حمض النتريك HNO_3 مولاري وصبة في أنبوب الاختبار الذي يحتوي على الحديد وملاحظة سير التفاعل ثم أعيدت التجربة مع الخارصين Zn

$$Zn_{(s)} + 4HNO_3 \rightarrow Zn(NO)_3 + 2H_2O + 2NO_2$$

$$Fe_{(s)} + HNO_3\ conc \rightarrow Fe(NO)_3 + H_2O + NO_2$$

الطلاء الكهربي: Electroplating

حضر المحلول من كبريتات النحاس $CuSO_4$ في كأس سعة 250 مل ووضع سلك نحاس كمصعد وسلك حديد كمهبط داخل المحلول. توصيل الأسلاك (Cu، Fe) بمصدر للكهرباء وأكملت الدائرة الكهربية بفتح وضبط فرق الجهد وترك التفاعل يسير بهدوء مع تغيير فرق الجهد في كل تجربة (1.5فولت 3فولت،6 فولت). في تجربة آخري تم غمر الأسلاك المطلية في محلول ملح الطعام $NaCl$ 025.0 جم/ ديسم3 لمدة 24 ساعة.

$$Zn_{(s)} + NaOH \rightarrow Zn(OH)_2 + H_2$$

$$Fe_{(s)} + NaOH \rightarrow \text{No reaction}$$

53 جرام من الحديد الذي يحتوي على شوائب تم تفاعلها مع حمض H_2SO_4 مولاري وأعيدت التجربة بعد نظافة القطعة. وأعيد تفاعلها مع حمض HCl مولاري.

تحديد اثر التآكل وفقاً انواع التربة:

Determination of correction effect according to types of soil:

لمعرفة التآكل بالتربة تم أخذ ثلاثة أنواع من التربة (طينية ، رملية ، صخرية) وبأحجام 500 جرام لكل تربة ويتم ذلك بأخذ التربة من السطح والوسط والعمق (50 cm) وخلطها مع بعضها البعض (لكل عينة تربة تخلط مع بعضها من المستويات الثلاث) ومن ثم وضعها في كأس أو إناء زجاجي (حوض) ورشها بكمية كافية من الماء المقطر وغمر سلك الحديد وسلك الحديد المطلي بالخارصين (Zn) والنحاس(Cu) في الحوض وبزمن قدره (10يوم) وملاحظة أثر التربة عليه وأيهما يتسبب في تآكل أشد وضرر بالغ بفلز الحديد.

النتائج والمناقشة: Results and Discussion

حضرت العينات وفقاً لما هو ذكر في الطرائق وتم اختبارها وتجهيزها بمعمل جامعة الدلنج. عند تفاعل عنصر الزنك مع هيدوكسيد الصوديوم بتركيز NaOH 100 % وكذلك 10% كان الزمن المستهلك بالدقيقة الاول 28 دقيقة والثانية 4 دقائق. من خلال الملاحظة وجد أن هنالك راسب رمادي بعكارة وتصاعد غاز ضعيف (فقاعات) وكذلك راسب رمادي عكر وتصاعد غاز ضعيف جداً (فقاعات) وهذا يعني أن هنالك تآكل للخارصين في محلول هيدروكسيد الصوديوم. بينما عند تفاعل عنصر الحديد مع هيدوكسيد الصوديوم بتركيز 100% و 10% كان الزمن المستهلك في التجربة الاولى 123 دقيقة وفي الثانية 123 دقيقة. عند الملاحظة نجد انه ليس هنالك تفاعل ملاحظ ولا يوجد تفاعل ملاحظ أيضاً. وهذا يعني عدم وجود صدأ للحديد في محلول هيدروكسيد الصوديوم.

جدول (1) يوضح قطعة حديد وزنها 53 جم بها شوائب (صدأ):

م	الوزن الابتدائي/ جم	نوع الحمض وتركيزه	الوزن النهائي بالجرام	وزن الشوائب Fe2O3
(1)	5 جم	H_2SO_4 مركز 98%	48.9	4.1
(2)	48.9	H_2SO_4 مركز 98%	48.7	0.2
(3)	48.7	H_2SO_4 مركز 98%	48.6	0.1
(4)	48.6	HCl 35%	48.1	0.5

من خلال نتائج التجارب في الجدول (1) نجد أن هنالك فوران وراسب أسود محمر في كل من التجربة 1 والتجربة 2 والتجربة 3 بينما هنالك فوران شديد ولون المحلول اصفر مخضر تحول إلى اصفر داكن وهناك راسب اسود من $FeCl_3$ وهذا يعني أن حمض الكبريتيك يسبب تآكل شديد للحديد بدليل أنه كون راسب من كلوريد الحديد $FeCl_3$. تناقص وزن الشوائب بتدريج من 53 حتى وصل إلى 48.1 جرام وذلك لأن الحمض تفاعل مع الشوائب فقط في التجربتين الأولى والثانية. تكون الراسب الأسود، أما في التجربتين الثالثة والرابعة فهنالك حديد صافي Fe به شوائب قليلة جداً (0.1 جم) وهذا سبب الفوران الشديد ولون المحلول البني المحمر Fe_2SO_4 وفي الرابعة نجد أن حمض HCl تفاعل بشدة أدى إلى الفوران أشد من التجارب الأولى والثانية والثالثة مكوناً $FeCl_3$ وتصاعد H_2 لتأثيره القوى على الحديد النقي. تفاعل حمض HCl بسرعة وبشدة أكثر من حمض H_2SO_4 لذلك يمكن ان تكون المعاملة الانسب للحديد بحمض الهيدوركلوريك لأنه يعطي نتائج أفضل. والبيئة الرطبة على وجه الخصوص، لأن الوزن الابتدائي 53جم ونقص بمقدار 4.1 جم صدأ وشوائب لأن الحديد كان في بيئة رطبة بينما قل الفاقد في التجارب الاخرى. التآكل عملية غامضة وأن كيمياء التآكل غير مفهومة جيداً. الصيغ المحتملة للميكانيكية التي يحدث بها الصدأ (وفقاً لميشيل;1989).

جدول (2) يوضح تفاعل حمض الهيدروكلورك مع الخارصين والحديد بتركيز متغير وزمن ثابت:

المواد المتفاعلة	تركيز HCl مول/ ديسم3	خلال الزمن
Fe + HCl	1م / ديسم 3	15 دقيقة
Fe + HCl	0.5 مول / ديسم3	15 دقيقة
Fe + HCl	0.25 مول / ديسم3	15 دقيقة
Fe + HCl	0.125 مول/ ديسم3	15 دقيقة
Zn + HCl	1مول/ ديسم3	15 دقيقة
Zn + HCl	0.5 مول/ ديسم3	15 دقيقة
Zn + HCl	0.25 مول / ديسم3	15 دقيقة
Zn + HCl	0.125 مول / ديسم3	15 دقيقة

من نتائج الجدول رقم (2): نجد أن هنالك تفاعل بطئ، ولون المحلول أصفر باهت، راسب أسود من $FeCl_2$ ،بينما لم يشاهد تفاعل واضح للعين المجردة وكذلك لم يحدث تفاعل مرئي، تفاعل بفوران خفيف وتصاعد غاز H_2 وكذلك مع الخارصين لم يشاهد تفاعل واضح والسبب هو التركيز المنخفض (0.25 مول/ ديسم3). تفاعل الخارصين شبه لحظي وسريع مع حمض الهيدروكلوريكHCl الأحماض والقواعد $NaOH$ بينما الحديد بطيء نسبياً حيث نجد متوسط زمن تفاعل عنصر الخارصين Zn مع حمض الهيدروكلوريك HCl المركز 6 دقائق بينما في نفس الظروف وبذات العوامل الكيميائية كان الزمن المتوسط للحديد 20 دقيقة لذلك يظهر أثر عامل الزمن كمتغير في التجارب وبالتالي وجود هذه المعادن في البيئات المختلفة والأزمان المتعاقبة فكلما زاد الزمن زادت نسبة التآكل وتدهور حالة المعدن المعين بصورة عامة. يلاحظ في التجربة (Fe + HCl) أن التفاعل حدث ببطء حيث تحول لون المحلول إلي أصفر مخضر وراسب من كلوريد الحديد $FeCl_3$ وذلك نتيجة للتآكل الشديد الذي سببه الحمض. وفي المرة الثانية لم يشاهد تفاعل واضح ولكن في الطبقة هنالك تفاعل لأن التركيز كان منخفض 0.5 مول لذلك لم يظهر للعين المجردة ولكن في الواقع هنالك تفاعل ما بين الحديد والحمض. يلاحظ أن معدن الخارصين أكثر نشاطاً وتآكلاً من الحديد وذلك تحت نفس الظروف بذات

العامل الفعال (حمض HCl). لا يتأثر الطلاء بالخارصين ولا يتآكل بالتربة ويصلح كمادة طلاء جيدة داخل التربة للأنابيب وشبكات المياه والمواسير. يصلح الطلاء بالخارصين في البيئات الرطبة داخل التربة وخارجها. لا يصلح طلاء الحديد بفلز النحاس للأدوات والمواد المصنوعة من الحديد وهي داخل التربة لأنه يتأكسد بفعل التربة والرطوبة. الطلاء بالنحاس جيدة في البيئات المكشوفة ويصلح للأدوات المستخدمة في الحياة البسيطة والأدوات المنزلية.

جدول(3): يوضح تفاعل حمض النتريك $\mathbf{HNO_3}$ مع **Fe** و **Zn** في زمن ثابت:

المواد المتفاعلة	الزمن/ دقيقة
$Fe + HNO_3$	3 دقيقة
$Zn + HNO_3$	3 دقيقة

من خلال الجدول (3): نجد أن لم يحدث تفاعل ملاحظ واضح عبد تفاعل حمض النتريك مع الحديد بينما مع الخارصين تفاعل بفوران وعنف شديدين وتصاعد غاز NO_2 بني اللون محمر وراسب وأضح من $Zn\ NO_3$. هذا يعني أن هنالك تآكل للزنك مع الحمض وتكون نترات الزنك $Zn\ NO_3$ وهذا نوع من الصدأ.

جدول (4): يوضح عملية الطلاء الكهربي للحديد بفلز النحاس في كأس سعة 250مل:

م	المصعد (+)	المهبط (−)	فرق الجهد	الزمن/دقيقة
1	سلك Cu	سلك Fe	0.5 فولت	15 دقيقة
2	سلك Cu	سلك Fe	3 فولت	15 دقيقة
3	سلك Cu	سلك Fe	6 فولت	15 دقيقة

من خلال الجدول (4): نجد أن شكل الطلاء ناعم ولون السلك أسود ولكن بعد النظافة صار أصفر لامع وناعم الملمس والسبب فرق الجهد المنخفض0.5 فولت أما في حالة3 فولت نجد أن السلك ناعم وأسود اللون بعد النظافة صار لامع أصفر واقل نعومة من التجربة الأولي وبينما شكل الطلاء خشن الملمس ولون السلك أسود وبعد النظافة اصبح أصفر لامع ولكنه سميك الطبقة وخشن والسبب هو فرق الجهد 6 فولت.

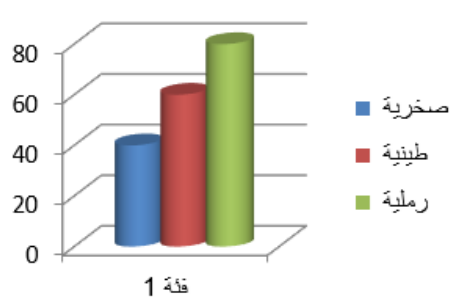
جدول رقم (5): يوضح تآكل الطلاء بالخارصين والنحاس في التربة بزمن قدره 10 يوم:

نوع التربة	نوع الطلاء	
	النحاس	الخارصين
صخرية	تآكل	لم يتآكل
طينية	تآكل	لم يتآكل
رملية	تآكل	لم يتآكل

من خلال الجدول (5): نجد أنه لم يتأثر طلاء الخارصين بالتربة الصخرية بينما تأثر الطلاء بالنحاس وكون ندبات تآكل قليلة والتصق سلك الطلاء بالتربة وتماسك التراب عليه.

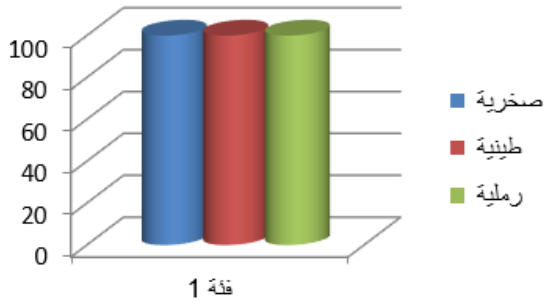
أما التربة الطينية والرملية والصخرية لم يتأثر الطلاء بالخارضين. بينما الطلاء بالنحاس تأثر في التربة الصخرية وكون ندبات تآكل قليلة وألتصق سلك الطلاء بالتربة وتماسك التراب عليه. أما التربة الرملية تأثر الطلاء بالنحاس وتم التصاق

التربة بالطلاء بدرجة شديدة وتشربت التربة في السلك المطلي باللون البني المحمر. وهذا يعني وجود تآكل. أما التربة الطينية فنجد طلاء النحاس كون ندبات أكسدة وتآكل واضحين والتصاق للتربة بالطلاء ولكنه أقل من إلتصاق التربة الرملية والصخرية.



النسبة المئوية للتآكل %

مخطط يوضح الطلاء بالنحاس وتآكله بالتربة



النسبة المئوية للتآكل %

مخطط يوضح الطلاء بالخارصين وتآكله بالتربة

الخاتمة: Conclusion

في الختام من خلال نتائج التجارب وأطر نظرية وعملية فقد توصلت الدراسة إلى عدة نتائج وتوصيات تفيد من يأتي من الباحثين والدارسين في هذا المجال و الاستفادة من التطبيقات لحل المشاكل الاقتصادية والصناعية للشركات والمؤسسات والجسور والمباني ذات المعادن المسلحة ومصانع الحديد. ثبت المعادن تتآكل بالفعل ويمكن حماية المعدن من التآكل بعدة طرق منها الطلاء بلفزي الخارصين والنحاس وان لنوع التربة اثر في زيادة الحديد لانها ذات كفاءة.

المراجع:

أولًا: المراجع العربية

1. برادي، جيمس إ.، وهومستون، جيرارد إ. (1990). *الكيمياء العامة: المبادئ والبنية* (ج1، ترجمة عيسى سعسع وآخرين). عمّان، الأردن: مركز الكتب الأردني.

Brady, James E., & Humiston, Gerard E. (1990). General Chemistry: Principles and Structure (Vol. 1, translated into Arabic by Issa Saasaa et al.). Amman, Jordan: Jordan Book Center.

2. بارو، جوردن م. (1985). *الكيمياء الفيزيائية*. نيويورك: دار ماكجرو–هيل.

Barrow, Gordon M. (1985). Physical Chemistry. New York: McGraw-Hill.

3. الزكوم، مهدي ناجي. (1986). *كيمياء العناصر الانتقالية*. البصرة، العراق: مطبعة جامعة البصرة.

Al-Zakoum, Mahdi Naji. (1986). Chemistry of the Transition Elements. Basra, Iraq: University of Basra Press.

4. سنكو، ميشيل ج. (1989). *الكيمياء العامة*. د.م.: د.ن.

Sienko, Michell J. (1989). General Chemistry. n.p.: n.p.

5. عبد الرحمن، سهير نظمي. (2008). *أساسيات في الكيمياء العامة*. ط1. الدمام، المملكة العربية السعودية، 1429هـ/2008م.

Abdelrahman, Soheir Nazmi. (2008). Fundamentals of General Chemistry (1st ed.). Dammam, Saudi Arabia.

6. عبود، صلاح الدين محمد علي .(2006) *أسس الكيمياء الفيزيائية*. الخرطوم، السودان: شركة مطابع السودان للعملة.

Abboud, Salah Al-Din Mohammed Ali. (2006). Foundations of Physical Chemistry. Khartoum, Sudan: Sudan Currency Printing Press Company.

7. المدني، سمير مصطفى .(1998) *أساسيات الكيمياء العامة*. الرياض: جامعة الملك سعود، عمادة شؤون المكتبات، النشر العلمي والمطابع، 1418هـ/1998م.

Al-Madani, Samir Mustafa. (1998). Fundamentals of General Chemistry. Riyadh: King Saud University, Deanship of Library Affairs, Scientific Publishing and Printing Presses.

ثانيًا: المراجع الأجنبية

1. Breck, W. G., Brown, R. J. C., & McCowan, J. D. (1981). *Chemistry for Science and Engineering*. Singapore: McGraw-Hill Far Eastern Publishers. Second printing, 1986.
2. Masterton, W. L., & Hurley, C. N. (1989). *Chemistry: Principles and Reactions*. Philadelphia, PA: Saunders College Publishing.
3. Noor, E. A., & Al-Moubaraki, A. H. (2008). Corrosion behavior of mild steel in hydrochloric acid solutions. *International Journal of Electrochemical Science, 3*(7), 806–818. https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)15485-X
4. Posypaiko, V. I., & Vasina, N. A. (1984). *Analytical Chemistry in Metallurgy* (I. Bandnya, Trans.). Moscow: Mir Publishers.
5. Wright, G. (n.d.). *Corrosion Protection of Metals*. Department of Chemistry, University of Auckland, Auckland, New Zealand.

ثالثًا: المواقع الإلكترونية

1. المعاني. (د.ت.) .*معجم المعاني الإلكتروني*. تم الاطلاع في 31 أغسطس 2026، من https://www.almaany.com

Almaany. (n.d.). Almaany Online Dictionary. Retrieved August 31, 2026, from https://www.almaany.com

2. ويكيبيديا، الموسوعة الحرة. (د.ت.) .*ويكيبيديا العربية*. تم الاطلاع في 31 أغسطس 2026، من https://ar.wikipedia.org

Wikipedia contributors. (n.d.). Arabic Wikipedia. Retrieved August 31, 2026, from https://ar.wikipedia.org