

## تأثير نسبة الكربون على مقاومة التآكل للصلب الكربوني في الأوساط المائية

ياسر عبد الوهاب عبدالله

مهندس

قسم الهندسة الميكانيكية - كلية الهندسة - جامعة الموصل

د. صبحي إسماعيل إبراهيم

أستاذ مساعد

### الخلاصة

يعد الصلب الكربوني من المعادن الواسعة الاستخدام في التطبيقات الهندسية والصناعية، استخدمت في هذه الدراسة مجموعة من أنواع الصلب وبنسب كربون مختلفة. اختبرت أوساط التآكل المائية الأكثر شيوعاً في هذا البحث والتي شملت الماء المالح وماء الشرب والأوقات تعرض للتآكل محددة وهي خمس أوقات شملت شهر وشهرين وثلاثة أشهر وأربعة أشهر وخمسة أشهر. تم استخدام طريقة فقدان الوزن لغرض احتساب معدلات التآكل فقد تبين أن نسبة الكربون لها تأثير على مقاومة التآكل للصلب من خلال دراسة معدلات التآكل لهذا الصلب وهذه العلاقة تم ربطها بالبنية المجهرية. حيث أكدت النتائج أن مقاومة التآكل تقل مع زيادة طور البيرلايت في الصلب الهايبوبوتكتويدي، وتزداد هذه المقاومة مع نقصان طور البيرلايت في الصلب الهايبيربوتكتويدي وان اقل مقاومة للتآكل وجدت في الصلب البوتكتويدي وفي أوساط التآكل المستخدمة فضلاً عن ذلك فقد تبين أن معدلات التآكل تتغير بتغير وسط التآكل، فمثلاً معدلات التآكل للصلب في الماء المالح هي الأعلى أما ماء الشرب فقد مثل أوطاً معدلات للتآكل. فضلاً عن مذكر، فقد لوحظ أن هناك علاقة بين زمن التعرض للتآكل ومعدلات التآكل فهي تقل بزيادة زمن التعرض للتآكل مع بقاء استمرار الزيادة في فقدان الوزن.

الكلمات الدالة : الصلب الكربوني، نسبة الكربون، معدلات التآكل، الأوساط المائية.

## The Influence of Carbon Contents on the Corrosion Resistance of Plain-Carbon Steels in the Water Environments

Sobhi.I.Ibrahim

Ass. Prof

Mech. Eng. Dept. / College of Engineering / Mosul University

Yasir.A.Abdullah

Engineer

### Abstract

Plain-carbon steels are considered to be the most widely used materials in engineering and industrial applications. In this study wide range of carbon steels are used in the most common corrosion environments which are salt water and drinking water. The weight loss method is used, then corrosion rate is found to correlate with carbon percentage of steels. The results indicate good correlation which are related to the microstructure where higher pearlite show higher corrosion rate and pearlitic steel represents the maximum corrosion rate. This is found in both environments used where higher corrosion rate is the characteristic of salt water. It is also found that the longer exposure time the lower corrosion rate while weight loss is still continuing.

Keyword: Plain-carbon steels, Carbon content, Corrosion rates, Water environments.

## المقدمة

يعد التآكل (Corrosion) من اكبر المشاكل التي تعاني منها الصناعة أينما وجدت, ويعرف التآكل بعدة أشكال هي: انحلال المعدن بسبب تفاعله مع وسط التآكل (Corrosion environment) الذي يتعرض له , ويعرف بأنه تلف في المعدن نتيجة لتفاعله كيميائياً (Chemical reaction) أو كهروكيميائياً (Electrochemical) مع الوسط المحيط به. إن التآكل الذي سوف نتناوله في هذا البحث هو التآكل الرطب (Wet Corrosion) الذي يتضمن تفاعلات كهروكيميائية وهذا النوع من التآكل لا يحصل إلا عندما يكون الوسط الذي فيه المعدن وسطاً ناقلاً للكهربائية (Electrolyte) وقد تم التركيز على هذا النوع من التآكل الذي يصيب الأجزاء المعدنية, ومثال ذلك تآكل الصلب الكربوني عند وجود الماء. وتكون خلية التآكل الغلفاني (Galvanic Corrosion Cell) من قطبين يمثل احدهم أنود (Anode) والآخر كاثود (Cathode) وإن فرق الجهد بين الانود والكاثود يمكن أن يحصل في حالة كون قطبي الخلية من معدنين مختلفين أو من معدن واحد, وفي هذا البحث سيكون التركيز على التآكل في المعدن الواحد وبذلك سوف يصبح عبارة عن قطبين أحد هذه الأقطاب يمثل الانود, والآخر كاثود [1]. وتتألف البنية المجهرية للصلب الكربوني من: الفرايت والبيرلايت, البيرلايت فقط, البيرلايت والسمنتايت ويمثل الفرايت طور أحادي (Single phase) أما البيرلايت فيمثل طورين مختلفين (Two phases) هما الفرايت والسمنتايت وإن الطورين المختلفين يعطيان خواصاً ميكانيكية (Mechanical properties) متميزة, إذ تجمع بين أكثر من صفة ميكانيكية كقوة الشد (Tensile strength) والصلادة (Hardness), إلا أنها تكون عرضة للتآكل أكثر من البنية المجهرية ذات الطور الأحادي لتكون خلايا التآكل الغلفانية المجهرية (Microgalvanic corrosion cells) بسبب اختلاف الجهد المتوقع بين الطورين المجهرين [2,3,4]. إن الصلب الكربوني يعتبر أكثر عرضة للتآكل وذلك بسبب كثرة تطبيقاته واستخداماته الصناعية. ويلعب التآكل بواسطة الماء دوراً هاماً في منشآت صناعية وهندسية عديدة منها: إساءة الماء وأنابيب المياه ومعدات تسخين الماء وخزانات المياه والمصانع والجسور والمنشآت البحرية والسفن والمركبات. ويشبه سلوك الماء كمادة تآكل, سلوك المحيط الجوي, من حيث توفر محلول مائي موصل للكهرباء (Electrolyte) بصورة دائمة وتوفر عامل مؤكسد وهو الأوكسجين المذاب, لذا فإن التآكل بواسطة الماء يصنف كنوع من أنواع التآكل الكهروكيميائي. ويؤدي الأوكسجين دوراً أساسياً في عملية التآكل بواسطة الماء ويستهلك الأوكسجين الموجود بنسب قليلة في شبكات تسخين الماء المغلقة بسرعة, ولذلك يمكن اعتبار مياه التدفئة خالية من الأوكسجين ونلاحظ عدم تآكل هذه المنشآت بعد مضي عشرات السنين من العمل. ويختلف سلوك الماء في المنشآت المعرضة للهواء الخارجي, مثل الخزانات أو حاويات معاملة الماء الساخن والتي تتم تغذيتها باستمرار بالماء الحاوي على الأوكسجين المذاب وفي هذه الحالة سوف يتوفر الماء المشبع بالهواء مما يزيد من حدوث عملية التآكل [5,6]. وسوف يتم التركيز في هذه الدراسة على سلوكية التآكل في الصلب الكربوني الذي يحتوي على نسب مختلفة من الكربون وذلك لمعرفة مدى تأثير البنية المجهرية للصلب الكربوني بأنواعه الأساسية وهي صلب الهايبويوتكتويدي

(Hypo-eutectoid Steels), وصلب اليوتكتويدي (Eutectoid Steels) وصلب الهايبيريوتكتويدي (Hyper-eutectoid Steels) على مقاومة التآكل وذلك بأخذ أوساط تآكل (Corrosive media) مائية تم اختيارها وهي الماء المالح (Salt water), وماء الشرب (Drinking water). يعد الماء المالح وسط نشيط في التفاعل الكهروكيميائي إذ تعمل الأملاح المذابة فيه وخاصة الكلوريدات منها على نشر التفاعل للمساحات السطحية الأكثر من خلال التوصيل الكهربائي المتميز لهذه الأملاح. وهناك نوعان من الماء المالح وهما الماء المالح صناعياً والماء المالح طبيعياً (ماء البحر). يحضر الماء المالح صناعياً بإضافة نسبة من الأملاح إلى الماء, وقد تكون هذه الأملاح من نوع واحد كإضافة كلوريد الصوديوم للماء مثلاً أو إضافة مجموعة أنواع من الأملاح مثل كلوريد الصوديوم, كلوريد المغنيسيوم, أو بوتاسيوم وغيرها من الأملاح. أما الماء المالح طبيعياً فهو ماء البحر الذي يحتوي على 3.5% من كلوريد الصوديوم, كما يحتوي أيضاً على أملاح أخرى وهي كلوريد المغنيسيوم والكالسيوم والبوتاسيوم والبروميد. كما يحتوي على أيونات مثل أيونات الكبريتات وأيونات الخارصين, والماء المالح له توصيل كهربائي أعلى من الماء العذب وهذا لوحده يُمكن أن يزيد معدل التآكل للعديد من المعادن, وإن محتوى الماء المالح من الكلوريد العالي سبب في زيادة الفشل الموقعي (Localized breakdown) لطبقات الأكسيد السطحية بسبب اختراقه لها [7]. ويشمل الماء العذب كل أنواع المياه ماعدا ماء البحر كونه مالح, والماء العذب يتضمن ماء الشرب وماء النهر ومياه الينابيع. وإن أغلب المياه الطبيعية تميل إلى القاعدية بسبب وجود الكربونات والبيكاربونات, والتآكل في الماء العذب يتأثر اعتماداً على محتواه من الأوكسجين, وإيونات الكلوريدات والكبريتات, وقيمة pH, والبيكاربونات وإيونات الكالسيوم. وفي التآكل ينتشر الأوكسجين المذاب من خلال الماء الموجود على السطح المعدني أو من خلال غشاء الرطوبة السطحي إلى كل الاتجاهات الممكنة, وبهذا يكون التآكل تحت سيطرة انتشار الأوكسجين المذاب [8,9]. وقد استخدم في هذا البحث الماء المالح صناعياً وذلك بإضافة 3.5% كلوريد الصوديوم (ملح الطعام) إلى الماء المقطر لتقريبه إلى مكونات ماء البحر.

## الدراسات السابقة

درس كل من: الباحث (Han 2008) [10] وزملاؤه تأثير ماء البحر على معدل التآكل لنعين من الصلب الكربوني بنسبة كربون (0.13% C, 0.23% C), حيث تم اختيار موقع بحري شرق الصين خلال مدة 60 يوماً، ودرس الباحث (Melchers 2003) [11] تأثير الوسط البحري على صلب منخفض الكربون (0.12% C, 0.18% C), كما ودرس الباحث (Pillai 1982) [12] وزملاؤه تأثير نسبة الكربون على معدلات التآكل وتم أخذ نوعين من الصلب منخفض الكربون (0.03% C, 0.13% C), واستنتج الباحثين انه بتغيير نسبة الكربون سوف يزداد معدل التآكل مع زيادة نسبة الكربون وذلك بسبب تغير البنية المجهرية التي تؤدي إلى زيادة طور السمنتايت ونقصان طور الفريت وذلك تزداد المساحة الانودية مع زيادة نسبة الكربون والتي تؤدي بدورها إلى زيادة معدلات التآكل. وقد أكد الباحث (Tomlinsion 1983) [13] من خلال دراسته انه بزيادة نسبة الكربون تأثيراً على معدلات التآكل، إذ تزداد نسبة البيرلايت وذلك تزداد عدد خلايا التآكل الغلفاني المتمثلة بالسمنتايت المتكون والفريت للصلب، والذي يؤدي إلى زيادة معدلات التآكل.

أما الباحث ( Miroslav 2002 ) [14] فقد أجرى دراسة حول تأثير نسبة الكربون في تكون حبيبات السمنتايت للصلب من خلال مقارنة معدلات التآكل بين الصلب الكربوني المستخدم بنسبة (0.8% C, 0.5% C) مستخدماً حامض الكبريتيك بتركيز مختلفة كوسط للتآكل. واستنتج الباحث أن زيادة نسبة الكربون هي التي أدت إلى زيادة في تكون السمنتايت والذي أثر بشكل سلبي على مقاومة التآكل. والباحث (Raja 2002) [15] وزملاؤه فقد تمكنوا من دراسة تأثير نسبة الكربون على معدل التآكل من خلال المقارنة بين صلب كربوني بنسبة كربون (0.05%, 0.14%, 0.5%) في محلول حامض الكبريتيك بتركيز 5% كوسط للتآكل. ومن هذه الدراسات تبين للباحثان أن معدل التآكل يزداد بزيادة نسبة الكربون والذي يزيد بدوره من مساحة قطب الانود المتمثلة بطور السمنتايت داخل تركيب البيرلايت على حساب طور الفريت والذي يمثل القطب الكاثودي.

وتوصل الباحث (Takasaki 2007) [16] وزملاؤه من خلال دراسة تأثير تركيز ايونات  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$  على معدلات التآكل في الصلب الكربوني الطري (Mild steels) حيث استخدم ثلاثة أنواع من ماء الشرب (Drinking waters) واستنتج أن معدلات التآكل تزداد بزيادة تركيز الايونات. وقد ذكر الباحث في دراسته أن الباحثين (Larson and Skold 1958) استنتجوا أن التآكل الذي يحصل في ماء الشرب يعتمد على نسبة تركيز ايونات  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$  نسبة إلى  $HCO_3^-$  حيث أن ايونات  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$  تزيد من معدلات التآكل على عكس ايون  $HCO_3^-$  الذي يقلل من معدلات التآكل.

واستنتج الباحث ( Garcia 2008 ) [17] وزملاؤه أن زيادة تركيز ايونات (Cl) سيؤدي إلى فقدان في الوزن ( Weight loss ) للصلب الكربوني وتزداد التوصيلية ( Conductivity ) أيضاً، واستخدم الباحث أربعة أنواع من المحاليل التي تكون تراكيز كلوريد الصوديوم NaCl فيها مختلفة وكالاتي (0.005, 0.01, 0.1, 0.6)، وكانت نسبة الكربون للصلب المستخدم (0.12% C) ووجد أن زيادة تركيز NaCl تؤدي إلى زيادة معدلات التآكل.

وقد قام كل من: الباحث (Takasaki 2007) [16] وزملاؤه بدراسة تأثير زمن التعرض للتآكل على معدلات التآكل في الصلب الكربوني الطري (Mild steels) واستخدم الباحث ثلاثة أنواع من ماء الشرب، والباحث (Macdonald 1978) [18] وزملاؤه بدراسة مدى تأثير مدة التعرض للتآكل على معدل التآكل والفقدان في الوزن مستخدماً صلب منخفض الكربون بنسبة (0.14% C) واستخدمت 6 نماذج متماثلة وعرضت بشكل مستمر ولمدة 60 يوماً وسحبت كل عشرة أيام للنموذج الواحد، واستنتجوا أن زيادة زمن التعرض للتآكل يقلل من معدلات التآكل وأكدوا أيضاً أن هناك زيادة بكمية الفقدان في الوزن مع زيادة مدة التعرض للتآكل.

واستنتج الباحث (Moller 2007) [19] دراسة تأثير ايونات الكالسيوم  $Ca^{+2}$  على معدل التآكل في صلب منخفض الكربون (0.038% C) باستخدام ماء البحر كوسط للتآكل، إن الهدف من هذه الدراسة كان لإيجاد كيفية تأثير ايونات الكالسيوم الموجودة في ماء البحر على معدل التآكل حيث أكد الباحث ترسب كربونات الكالسيوم ( $CaCO_3$ ) وهي فعالة جداً ومن ثم ستؤدي إلى تكون طبقة كلسيه على سطح المعدن تمنع وصول الأوكسجين إلى المعدن وبذلك يقل معدل التآكل.

أما الباحث (Corvo 2005) [20] فقد استنتج من خلال دراسته أن سبب اختلاف معدلات التآكل للصلب الكربوني في الأوساط الجوية هو اختلاف تركيز ايونات الكلوريدات ( $Cl^-$ ) التي تسبب تعجيل معدلات التآكل ولاسيما في المناطق المتعرضة للأمطار ولأوقات مستمرة أو في المناطق البحرية، حيث أن زيادة تركيز ايونات الكلوريدات ستؤدي إلى زيادة التوصيلية التي تزيد من معدل التفاعل الكهروكيميائي وبذلك يزداد معدل التآكل.

## هدف البحث

إن الهدف الأساسي من هذا البحث هو دراسة تأثير نسبة الكربون على سلوكية التآكل للصلب الكربوني في الماء المالح وماء الشرب، وإيجاد العلاقة بين تغير نسبة الكربون ومعدلات التآكل للصلب وعلاقتها بالتركيب المجهري وتأثير هذه الأوساط المائية المستخدمة وعامل زمن التعرض للتآكل على معدلات التآكل.

## المواد والتقنيات العملية

## المواد

تم استخدام عدد من أنواع الصلب الكربوني والتي تضمنت نسبة الكربون فيها الأنواع الأساسية للصلب الكربوني وهي صلب الهايبيوتكتويدي، وصلب اليوتكتويدي وصلب الهايبيوتكتويدي.

## التقنيات العملية

تم التحضير لإجراء اختبارات التآكل للصلب الكربوني الذي تم اختياره وفق مراحل أساسية تضمنت:-

تهيئة نماذج الاختبار: تم تهيئة عدد مناسب من النماذج تضمنت (10) نماذج لكل نوع من أنواع الصلب الكربوني والتي تضمنت أحد عشر نوعاً من الصلب المستخدم في هذا البحث، وقطعت هذه النماذج إلى نوعين من الأشكال، الأول عبارة عن متوازي المستطيلات أما الثاني على شكل أقراص دائرية حسب مقطع الصلب الذي تم الحصول عليه، وتم إعداد سطوح نماذج الصلب المستخدمة بشكل متماثل عن طريق التجليخ والتنعيم لإزالة الخشونة السطحية والزوايا الحادة غير المرغوبة.

المعاملة الحرارية للنماذج: أجريت عملية المعادلة وهي إحدى المعاملات الحرارية المتزنة (Equilibrium heat-treatments) الصلب تحت الدراسة وذلك لأجل إعادة الصلب إلى وضعه المتزن والمتمثل بظهور أطواره المتزنة وهي الفرايت والبيرلايت والسمنتايت لغرض دراسة تأثير البنية المجهرية للصلب الكربوني بأنواعه الأساسية على مقاومة التآكل في الأوساط المائية.

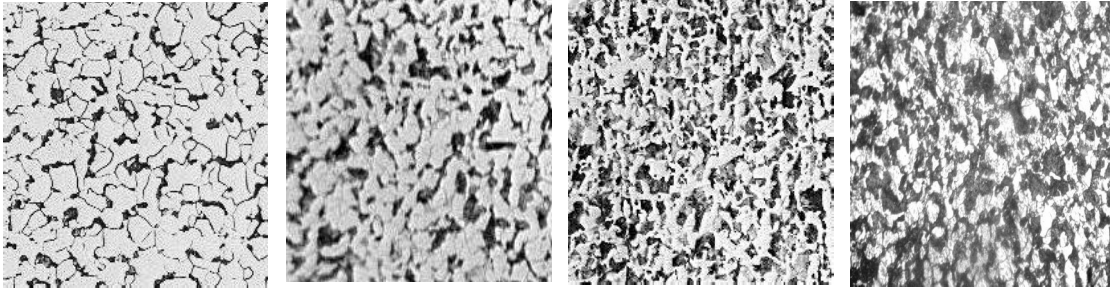
الفحص المجهري: تم تحضير عينات من نماذج الصلب الكربوني المستخدمة والمعاملة حرارياً لغرض الفحص المجهري بالطريقة التقليدية والتي شملت التنعيم بدرجات (320, 600, 800, 1000) والصلقل (Polishing) ثم عملية الإظهار (Etching) باستخدام محلول النايكل (2% Nital) حيث يحتوي على (2% Nitric acid and 98% alcohol) ( [21], تم اختيار هذه العينات لغرض التصوير المجهري وكما مبين في الشكل (1).

اختبارات التآكل: تم إجراء اختبارات التآكل لنماذج الصلب الكربوني، وذلك بوضع النماذج في داخل أوساط التآكل المختارة بعد تعليقها بشكل عمودي في أحواض زجاجية وغمرها بالكامل حيث تم بعد ذلك غلق محكم لهذه الأحواض لتصبح بذلك عملية الاختبار مغلقة (Close condition) وذلك لمنع ذوبان أوكسجين الهواء في داخل أوساط التآكل المختارة، وكانت أشهر الاختبار هي شباط، آذار، نيسان، أيار وحزيران من السنة 2008 وفي درجة حرارة الغرفة. وتم تحديد الأوساط المستخدمة في اختبارات التآكل والتي شملت:-

الماء المالح (Salt water): تم إضافة % 3.5 من كلوريد الصوديوم (NaCl) لكل % 96.5 من الماء المقطر حيث تم التأكد من الإذابة بالكامل والترشيح قبل غمر نماذج الصلب.

ماء الشرب (Drinking water): الماء المستخدم هو ماء الشرب المتداول في مدينة الموصل / الساحل الأيسر.

تمت عملية التحليل الكيميائي والفيزيائي لأوساط التآكل المستخدمة كما موضحة في الجدول (1).

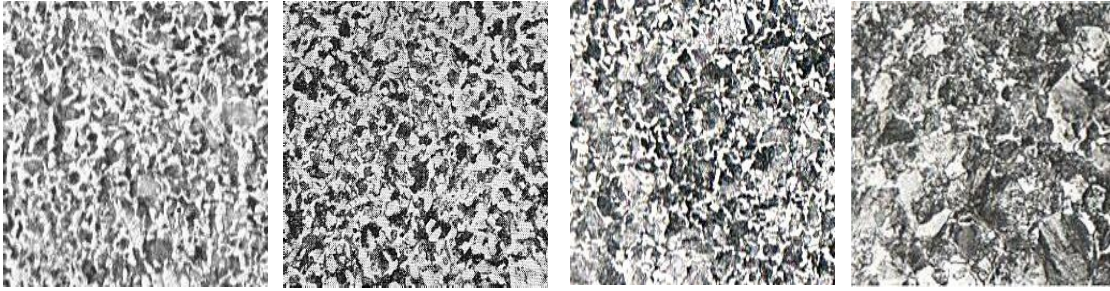


1) 0.1% C Steel.

2) 0.2% C Steel.

3) 0.3% C Steel.

4) 0.35% C Steel.



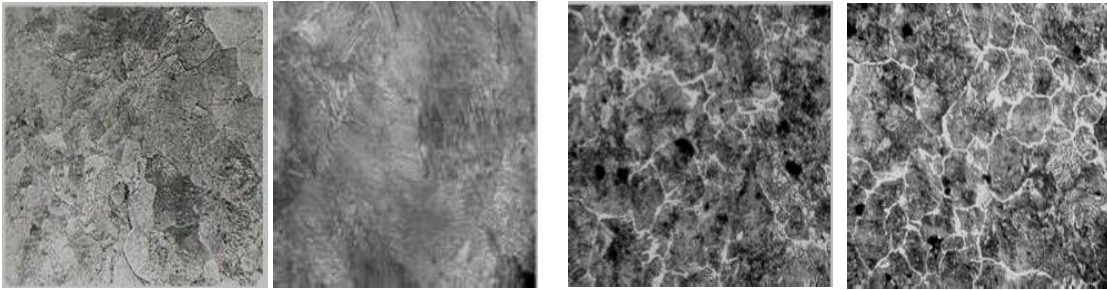
5) 0.4% C Steel.

6) 0.5% C Steel.

7) 0.6% C Steel.

8) 0.65% C Steel.

(a)



9) 0.8% C Steel.

10) 0.8% C Steel.

11) 1.0% C Steel.

12) 1.2% C Steel.

(b)

(c)

الشكل (1): صور التركيب المجهرى لأنواع الصلب الكربوني المستخدمة.

صور مجهرية لأنواع الصلب الكربوني الهايبوتكتويدي 1,2,3,4,5,6,7,8 ذو التركيب الفرايتي والبيرلايتي (X150).

صور التركيب المجهرى للصلب اليوتكتويدي (0.8% C) ذو التركيب البيرلايتي (X150), (X500).

صور التركيب المجهرى للصلب الهايبيريوتكتويدي المستخدم ذو التركيب البيرلايتي والسمنتايت (X150).

جدول (1): التحليلات الكيميائية والفيزيائية لأوساط التآكل المستخدمة في اختبارات التآكل.

COMPOUND	SALT WATER	DRINKING WATER
Total hardness mg/L	1700	230
Calcium hardness mg/L	260	120
(Cl <sup>-</sup> )mg/L	1596	36
(Mg <sup>+2</sup> )	322	24.64
(Ca <sup>+2</sup> )	104.2	48.1
Electrical conductivity	775	492
PH	8.35	8.39
Electrode potential (Volt)	-36.9	-70.2

جدول (2): تحليل التركيب الكيميائي لجميع العناصر الكيميائية المكونة لعينات من نماذج الصلب الكربوني المستخدمة.

STEEL SAMPLE NO.	CHEMICAL COMPOSITIONS (% WEIGHT)									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Fe
S1	.120	.238	.510	.008	.016	.107	.044	.012	.003	balance
S2	.190	2.01	.950	.022	.009	.015	.007	.003	.020	balance
S3	.341	1.74	.670	.014	.006	.049	.023	.007	.008	balance
S4	.388	1.99	.870	.013	.036	.230	.220	.062	.019	balance
S5	.473	.230	1.19	.005	.033	.437	.081	.026	.008	balance
S6	.586	.281	.660	.016	.028	.117	.066	.008	.013	balance
S7	.681	.192	.790	.002	.035	.810	.091	.042	.038	balance
S8	.702	.271	.790	.004	.017	.610	.770	.037	.011	balance
S9	.813	.251	1.09	.008	.020	1.02	.101	.043	.009	balance
S10	1.08	1.74	.670	.014	.006	.049	.023	.007	.008	balance
S11	1.13	0.23	1.19	.005	.033	.437	.081	.026	.008	balance

أوقات الاختبار: تمت الاختبارات خلال خمس أوقات زمنية تضمنت شهراً مستمراً يليه شهران، وثلاثة أشهر، وأربعة أشهر وخمسة أشهر، وبعد انتهاء أوقات الاختبار ترفع النماذج من الأوساط لتنظيفها من طبقات مخلفات التآكل ميكانيكياً باستخدام فرشاة ناعمة أولاً ثم باستخدام محلول حامض مكون من (500 ml hydrochloric acid and 3.5g hexamethylene tetramine distilled water to make 1000ml) وتغمر النماذج في داخل المحلول لمدة عشر دقائق لإزالة بقايا مخلفات التآكل دون التأثير على المعدن وبعدها تغسل مباشرة بالماء المقطر ثم بالكحول لتجفيفها لغرض وزنها بعد كل مدة اختبار للتآكل وذلك طبقاً للطريقة القياسية الواردة في [22].

التحليل الكيميائي للنماذج المستخدمة: أخذت عينات من نماذج الصلب الكربوني المستخدمة في هذا البحث وتم تحليلها كيميائياً لإيجاد نسبة الكربون وبشكل دقيق. استخدم جهاز لتحليل العناصر الكيميائية حسب المواصفة القياسية لفحص النماذج. الجدول (2) يوضح تحليل التركيب الكيميائي لجميع العناصر الكيميائية لعينات من نماذج الصلب الكربوني المستخدمة.

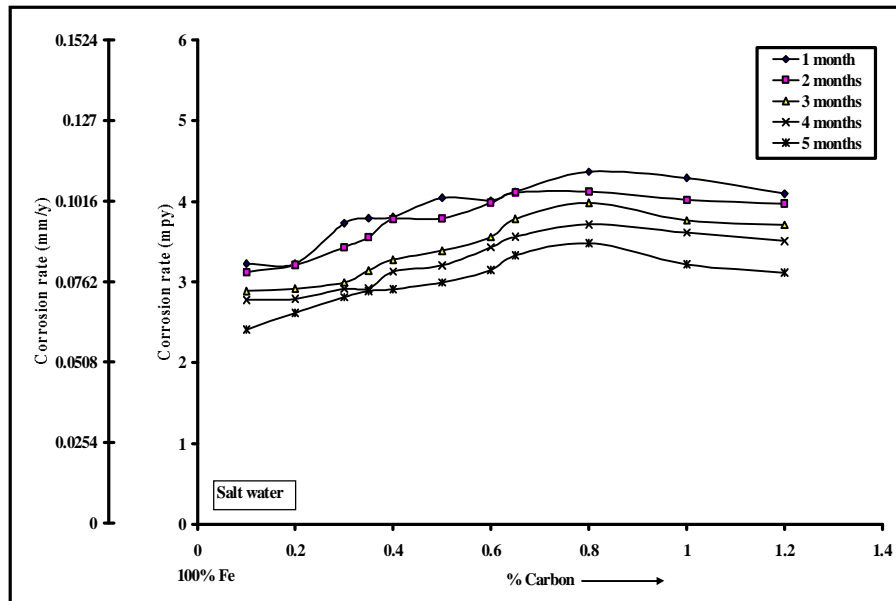
حساب معدل التآكل: يتم تحديد معدل التآكل (Corrosion rate) المقاس بوحدة ميلز / سنة (Mils Per Year) بالاعتماد على الدالة الرئيسية لذلك وهي فقدان في الوزن (W) أثناء مدة الاختبار (T)، أما ثوابت الاختبار في هذا البحث فهي كثافة الحديد (الصلب) (D)، والمساحة السطحية (A). يمكن حساب معدل التآكل من خلال العلاقة الآتية، والمستخدم في هذه الدراسة [1,8]:-

$$\text{Corrosion rate (mpy)} = \left[ \frac{534 W}{DAT} \right] \dots\dots(1)$$

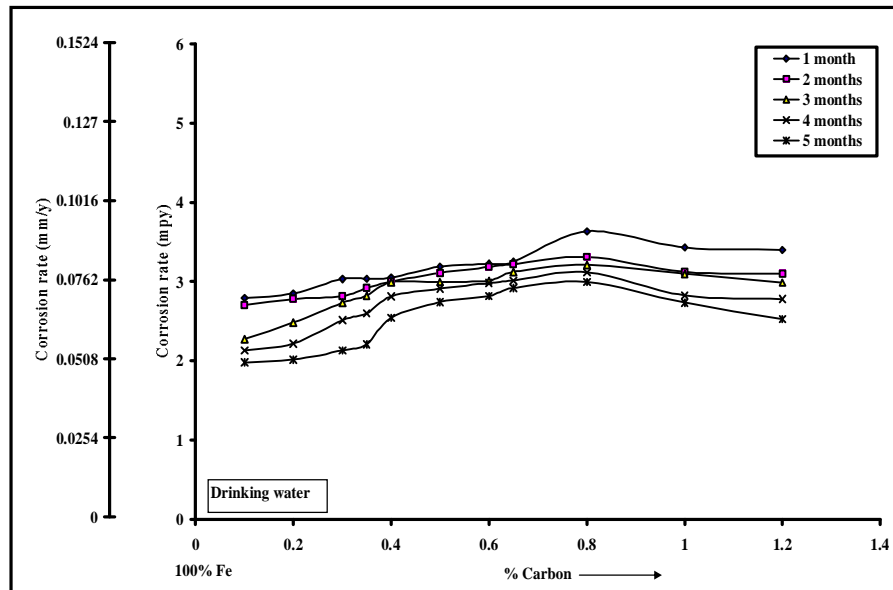
- (mg): فقدان الوزن  
(D): كثافة الحديد (g/cm<sup>3</sup>)  
(A): المساحة السطحية (in<sup>2</sup>)  
(T): زمن التعرض للتآكل (hours)  
(mil): تعادل 0.001 inch

#### النتائج والمناقشة

إن النتائج الموضحة في الشكل {2} a,b تشير إلى مدى تأثير نسبة الكربون على معدلات التآكل الذي يعد مقياس لمقاومة التآكل في الصلب، ولكل وسط من أوساط التآكل خلال فترات التعرض للتآكل والتي ذكرت آنفاً. ويبين الشكل a {2} التآكل في الماء المالح وأن النتائج التي ظهرت بعد انتهاء أوقات الاختبار باستخدام الماء المالح وسطاً للتآكل توضح أنه عند زيادة نسبة الكربون في الصلب الهايبيوتكتويدي تزداد معدلات التآكل، وتكون هذه الزيادة تدريجية وتشبه إلى حد ما العلاقة الخطية، وأن الحد الأعلى لمعدلات التآكل كان متمثلاً بالصلب اليوتكتويدي (البيبرلايت اليوتكتويدي)، أما عند زيادة نسبة الكربون في الصلب الهايبيوتكتويدي فأن معدلات التآكل تتخفض وبصورة تدريجية عن الحد الأعلى لمعدلات التآكل والمتمثل بالصلب اليوتكتويدي وهذا الانخفاض يعتمد على نسبة مكونات البنية المجهرية للصلب الهايبيوتكتويدي. وأن هذه النتائج التي ظهرت قد تكررت في الشكل {2} b والذي تم استخدام ماء الشرب وسطاً للتآكل. الأمر الذي يؤكد أن معدلات التآكل مرتبطة وبصورة واضحة بنوع الصلب الكربوني وهو التركيب المجهرى (Microstructure) أي بما يحويه الصلب من الكربون والذي يمثل العنصر الرئيسي للتغيرات المجهرية للصلب عند اتحاده بالحديد حيث أن تغير نسبة الكربون يؤدي إلى تغير البنية المجهرية للصلب الكربوني وأن الصلب الكربوني عبارة عن سبيكة أساسها الحديد والكربون. إن للبنية المجهرية تأثير كبير على معدلات التآكل ومن خلالها يمكن معرفة وتحديد مقاومة التآكل لأي نوع من الصلب الكربوني، وأن تحديد البنية المجهرية للصلب الكربوني يمكن أن يحدد عمر القطعة الافتراضي المستخدمة [23,8]. تتكون البنية المجهرية للصلب الهايبيوتكتويدي من ( الفريت + البيبرلايت ) بنسب مختلفة تعتمد على تغير نسبة الكربون بينما تتكون البنية المجهرية للصلب اليوتكتويدي من البيبرلايت في حين يتكون الصلب الهايبيوتكتويدي من ( البيبرلايت + السمنتايت ) وبنسب مختلفة تعتمد على نسبة الكربون أيضاً [8]، إن السبب في زيادة معدلات التآكل مع زيادة نسبة الكربون في الصلب الهايبيوتكتويدي يرجع إلى تغير نسب مكونات البنية المجهرية لهذا الصلب حيث يزداد طور السمنتايت الذي يمثل القطب الانودي ونقصان طور الفريت الأساسي (Primary ferrite) المتمثل بالقطب الكاثودي الأساسي ومن الجدير بالذكر أن طور السمنتايت هنا يدخل ضمن طور البيبرلايت الذي يتكون من الفريت المتمثل بالقطب الكاثودي الثانوي والسمنتايت الذي يمثل القطب الانودي الأمر الذي يؤدي إلى زيادة المساحة الانودية مع زيادة نسبة الكربون في الصلب الهايبيوتكتويدي وأن هذه الزيادة تعتمد على نسبة مكونات البنية المجهرية للصلب الهايبيوتكتويدي، حيث أن مع زيادة نسبة الكربون في هذا الصلب تزداد عدد خلايا التآكل الغلفاني المتمثلة بالبيبرلايت الذي يتكون من ( الفريت + السمنتايت ) ونقصان طور الفريت الأساسي الذي يمثل القطب الكاثودي [24]. يعد الفريت محلولاً جامداً (Solid Solution) ذا الطور الأحادي حيث يمثل القطب الكاثودي في خلية التآكل الغلفاني أما السمنتايت فيمثل القطب الانودي ذا الطور الأحادي أيضاً كمركب معدني (Intermetallic compound) في خلية التآكل الغلفاني المجهرية داخل البيبرلايت ويمكن ملاحظة ذلك عند إجراء عملية الإظهار للبيبرلايت إذ يظهر السمنتايت بلون اسود وهذا يدل على تفاعله كيميائياً مع محلول الإظهار في حين يظهر الفريت بلون ابيض كونه يمثل القطب الكاثودي غير متأثر كيميائياً ويسمى هذا النوع من التآكل بالتآكل الغلفاني المجهرى (Microgalvanic corrosion) حيث يحصل التآكل بين الفريت والسمنتايت في البنية



(a)



(b)

الشكل (2): تأثير نسبة الكربون على معدلات التآكل خلال أوقات الاختبار ولكل وسط من أوساط التآكل المختارة.  
(a) ماء مالح. (b) ماء شرب.

المجهرية نتيجة لاختلاف فرق الجهد (Different potentials) فيما بينهما [21], والسبب في كون أعلى معدلات التآكل تحصل في الصلب اليوتكتويدي هو أن البنية المجهرية لهذا الصلب تتكون من 100% بيرلايت (فرايت + سمنتايت) أي متكون من تركيب ذو طورين (Two phase structure), وان سبب نقصان معدلات التآكل في الصلب الهايبريوتكتويدي هو ظهور السمنتايت الأساسي الكاثودي في هذه الحالة ونقصان طور البيرلايت أي نقصان نسبة السمنتايت الثانوي الانودي داخل تركيب البيرلايت وبمعنى آخر قلة عدد الخلايا الغلفانية الفعالة بظهور طور السمنتايت الأساسي على حساب نسبة البيرلايت. حيث يمثل السمنتايت المتكون حول البيرلايت القطب الكاثودي إذ يظهر ذلك واضحا عند معاملة الصلب الهايبريوتكتويدي بمحلول الإظهار النايتل (Nital) حيث يظهر السمنتايت بلون ابيض



غير متأثراً كيميائياً كونه يمثل القطب الكاثودي وان معدلات التآكل في الصلب الهابيويونكتويدي والهابيريونكتويدي تعتمد على نسبة مكونات البنية المجهرية لكل منهما [8] , ويظهر ذلك واضحاً من خلال الشكل {3} a,b الذي يبين وبوضوح تأثير البنية المجهرية المباشر على معدلات التآكل وفقدان الوزن للصلب الكربوني وذلك خلال تعرضه للتآكل لمدة خمسة أشهر متتالية في داخل أوساط التآكل المائية. وان هذه النتائج تتفق مع عدد من الباحثين منهم:

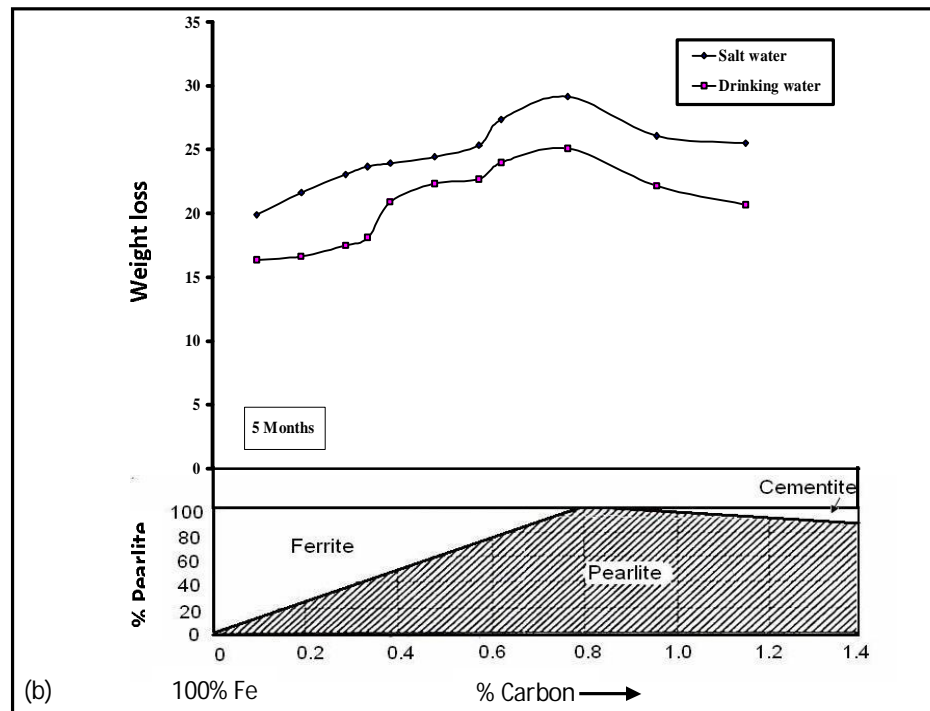
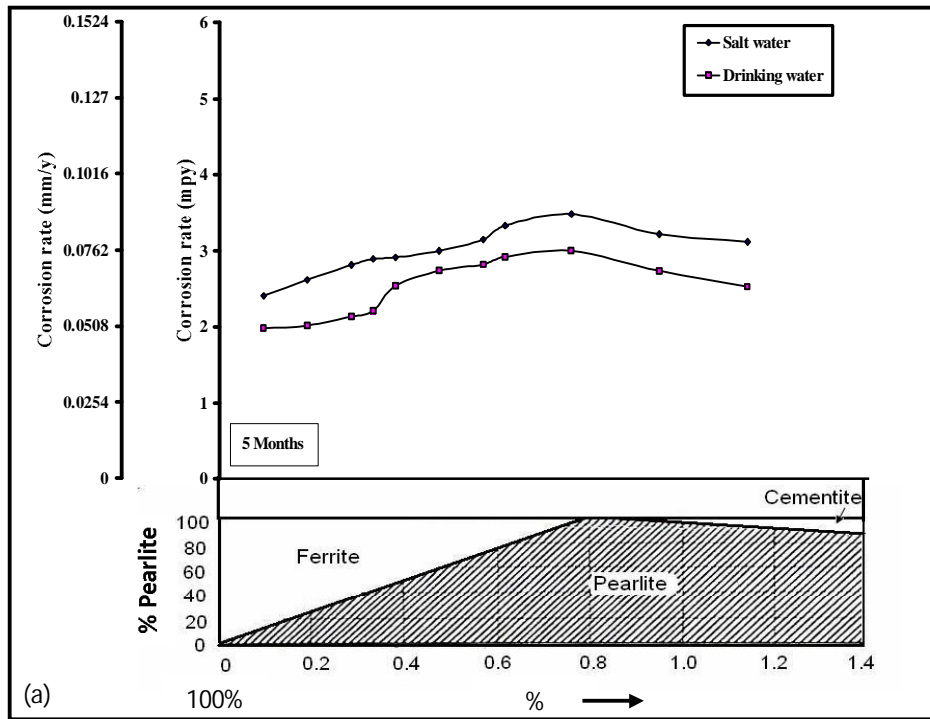
الباحث (Pillai 1982) [12], والباحث (Melchers 2003) [11], والباحث (Han 2008) [10], استنتجا أن زيادة نسبة الكربون في الصلب الهابيويونكتويدي سوف تؤدي إلى زيادة معدلات التآكل بسبب زيادة عدد خلايا التآكل الغلفاني المتمثلة بالبيريلايت ونقصان طور الفريت.

وان النتائج التي ظهرت في الشكل {2} a,b توضح أن معدلات التآكل تبدأ بالانخفاض تدريجياً مع زيادة زمن التعرض للتآكل ولأوساط التآكل المستخدمة. هذه النتائج قد تكررت بشكل واضح لجميع أنواع الصلب الكربوني المستخدمة في هذا البحث كما مبين في هذا الشكل. يتضح أيضاً من خلال النتائج أن الحد الأعلى لمعدلات التآكل كانت عند انتهاء المدة الأولى من الاختبار والتي تضمنت شهراً كاملاً من زمن الاختبار لجميع أنواع الصلب ولأوساط التآكل المختارة وتنخفض معدلات التآكل بشكل تدريجي لتصل إلى الحد الأدنى بعد انتهاء مدة الاختبار الأخيرة وهي خمسة أشهر متتالية, إن السبب في ذلك يعود إلى وجود مخلفات طبقات التآكل (Corrosion products layers) المتكونة على سطح الصلب والتي لها دور في إعاقه التآكل وتعمل على تقليل معدل التآكل مع مرور الزمن بجعل المعدن أقل نشاطاً مع الوسط المسبب للتآكل أو ربما يعود السبب إلى تكوين طبقات حماية مترسبة تسمى طبقات الحماية بالصدأ (Oxides protection layers) كون المعدن المتآكل والذي يشبه إلى حد كبير خام الحديد في الطبيعة الأكثر استقراراً من المعدن غير المتآكل وهناك عوامل أخرى من الممكن أن تكون السبب ومنها استنزاف الأوكسجين المذاب. ففي بداية التفاعل الكهروكيميائي يحدث التآكل سريعاً ويسجل معدلات تآكل عالية إلا أنه مع مرور الزمن تقل نسبة الأوكسجين المذاب مما يؤدي إلى احتمال تجمع ايونات الهيدروجين عند قطب الانود وإعاقه تفاعل التآكل, وهذا ما يسمى بالاستقطاب [25]. وهذه النتائج تتفق مع كل من:

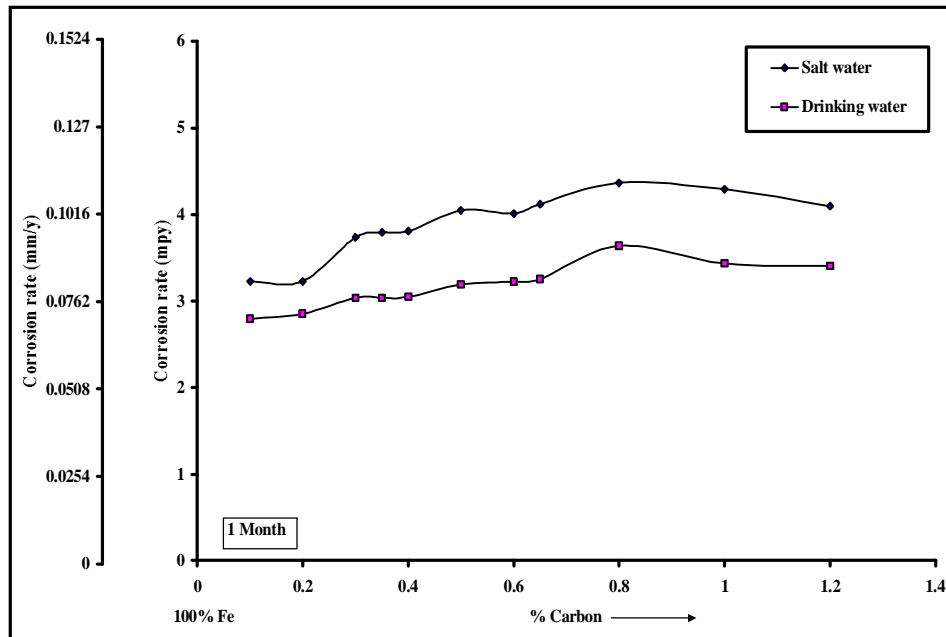
الباحث (Macdonald 1978) [18] حيث درس تأثير زمن التعرض للتآكل على معدلات التآكل واستنتج أيضاً أنه بزيادة زمن التعرض للتآكل تقل معدلات التآكل.

كما درس الباحث (Azzeri 1981) [26] تأثير نواتج التآكل على معدلات التآكل للصلب الكربوني واستنتج الباحث أن نواتج التآكل أدت إلى تشكيل طبقة حماية تغطي سطح النموذج وبذلك يقل معدل التآكل. أما الباحث (Takasaki 2007) [16] وزملاؤه فقد وجدوا أن زيادة زمن الاختبار للتآكل تؤدي إلى انخفاض معدلات التآكل.

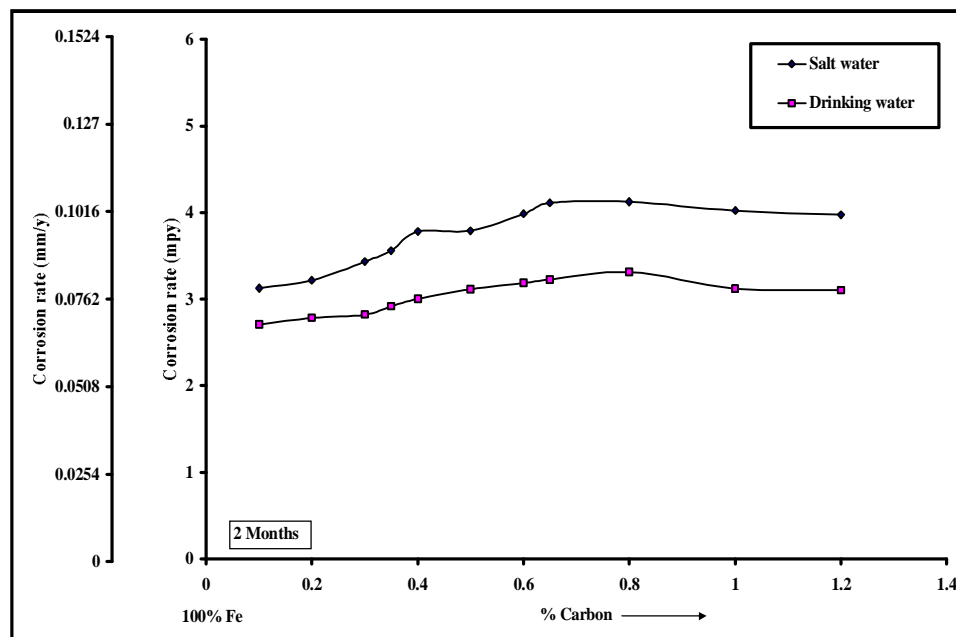
إن النتائج الموضحة في الشكل {4} a,b,c,d,e تشير إلى مدى تأثير أوساط التآكل على معدلات التآكل للصلب الكربوني ولكل وقت من أوقات الاختبار, حيث تشير هذه النتائج الموضحة في الأشكال المذكورة إلى وجود اختلاف في معدلات التآكل باختلاف وسط التآكل وهذا يدل على أن طبيعة الوسط الذي يسبب التآكل له دور أساسي في التأثير على معدل التآكل زيادة أو نقصان [27]. حيث تمثل الأشكال المشار إليها إلى استخدام نماذج من الصلب الكربوني وبنسب مختلفة من الكربون والتي تم تعريضها لاختبارات التآكل في أوساط التآكل المختارة. وتبين النتائج الموضحة في الأشكال المذكورة أعلاه إلى أن أعلى معدلات التآكل كانت في الماء المالح يليه ماء الشرب, ولجميع نماذج الصلب الكربوني المستخدمة تحت نفس الظروف ولجميع أوقات التآكل. وان السبب في كون معدلات التآكل في الماء المالح كانت أعلى من معدلات التآكل في ماء الشرب هو تركيز ايونات الكلوريد والمغنيسيوم حيث إن زيادة تركيز هذه الايونات تؤدي إلى زيادة معدلات التآكل بسبب زيادة التوصيل الكهربائي للكلوريد وان ايونات الكلوريد تمتاز بقابليتها العالية على اختراق الطبقة الاوكسيدية السطحية الواقية من خلال المسامات أو العيوب أسهل من اختراق الايونات الأخرى لهذه الطبقة. كما تعمل ايونات الكلوريد على الانتشار على السطح الملامس للكلتروليت وتزيد قابليته على التوصيل الكهربائي فضلاً عن وجود آلية أخرى لايونات الكلوريد وهي اتحادها مع ايونات الحديد لتكوين كلوريد الحديد عند قطب الانود وهيدروكسيد الصوديوم عند قطب الكاثود وبعد تفاعلها معا يتكون هيدروكسيد الحديدك وكلوريد الصوديوم وبنسب مختلفة تتكون طبقة الصدأ المعروفة [28]. كما أكد الباحث (Yunping 2002) [29] من خلال دراسته عند اختبار التآكل في الماء المالح الذي يحتوي على نسب مختلفة من كلوريد الصوديوم وبذلك تصبح قوة تآكل الماء معتمدة على نسبة ما يحتويه من ايونات الكلوريد. كما تبين أيضاً من النتائج التي ظهرت أن معدل التآكل في الماء المالح المستخدم والذي يحتوي على (3.5% NaCl) هو أعلى من معدلات التآكل في ماء الشرب ومن المحتمل أن يعود سبب ذلك التفاوت للتأثير الملحي الموجود في الماء المالح إذ أن وجود الملح المتمثل بكلوريد الصوديوم (NaCl) يزيد تركيز ايونات الكلوريد الموجودة في الماء المالح عن مستواها في ماء الشرب فضلاً عن زيادة التوصيل الكهربائي للماء المالح والتي بدورها تسمح لمساحة سطحية أكبر بالمشاركة في التفاعل الكهروكيميائي مما يؤدي إلى زيادة معدلات التآكل والذي أكده الباحث (Yunping 2002) [29].



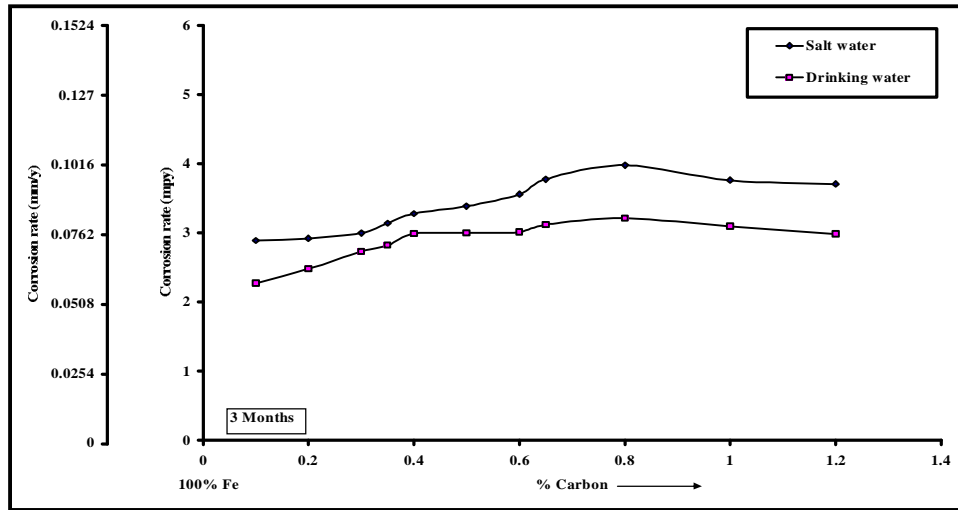
الشكل (3): يوضح تأثير البنية المجهرية على معدلات التآكل وفقدان الوزن للصلب الكاربوني بعد مدة تعرض للتآكل أمدها خمسة أشهر لأوساط التآكل المختارة. (a) معدل التآكل. (b) فقدان الوزن.



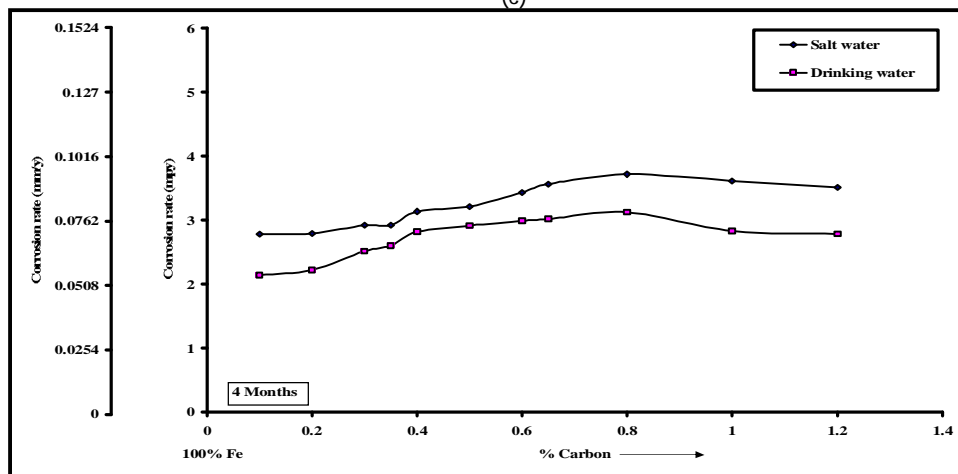
(a)



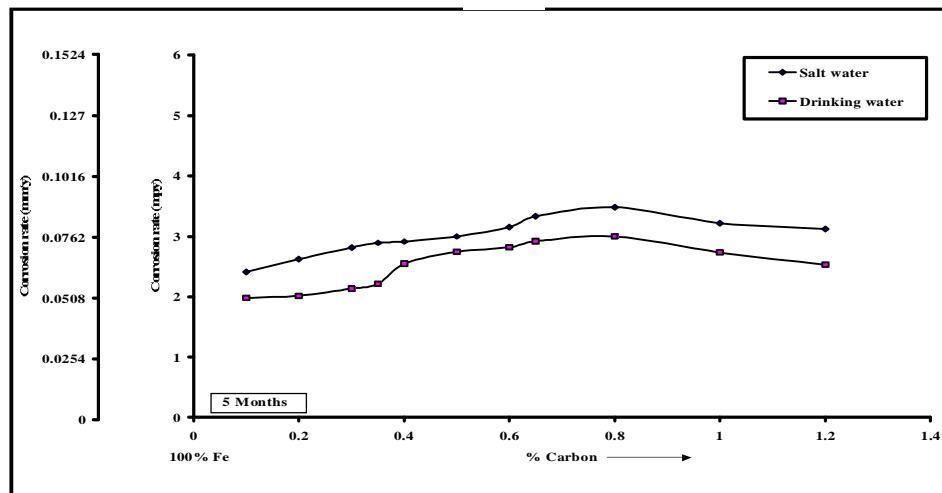
(b)



(c)



(d)



الشكل (4): تأثير أوساط التآكل المختارة على معدلات التآكل ولكل وقت من أوقات الاختبار. (a) التآكل خلال مدة شهر مستمر. (b) التآكل خلال مدة شهران متتاليان. (c) التآكل خلال مدة ثلاثة أشهر متتالية. (d) التآكل خلال مدة أربعة أشهر متتالية. (e) التآكل خلال مدة خمسة أشهر متتالية.

نلاحظ من خلال الجدول (1) أن تركيز ايونات الكلوريد والمغنيسيوم مرتفعة في الماء المالح وان اغلب المياه الطبيعية تميل إلى القاعدية بسبب وجود الكاربونات والبيكاربونات, إن زيادة درجة القاعدية في الماء تزيد من التوصيلية للماء والتي تؤثر على معدلات التآكل وكما مبين قيم الرقم الهيدروجيني للأوساط المختارة في الجدول (1).

#### الاستنتاجات

من خلال النتائج التي تم الحصول عليها يمكن استنتاج ما يأتي:  
إن تغير نسبة الكربون في الصلب الكربوني له تأثير كبير على معدلات التآكل من خلال تأثير البنية المجهرية على معدلات التآكل وذلك بزيادة أو نقصان خلايا التآكل الغلفاني بين الأطوار المجهرية.  
تتغير معدلات التآكل للصلب الكربوني حيث تزداد في الصلب الهايبيوتكتويدي بسبب زيادة عدد خلايا التآكل الغلفاني وتقل هذه المعدلات بنقصانها.  
أعلى معدلات التآكل وجدت في المراحل الأولى من التآكل بعد شهر من التعرض للتآكل وأوطأها في المراحل الأخيرة والتي استغرقت خمسة أشهر.  
انخفاض معدلات التآكل للصلب الكربوني مع زيادة فترة تعرضه للتآكل على الرغم من استمرار فقدان في الوزن.  
معدلات التآكل للصلب الكربوني في الماء المالح هي أعلى من نظيراتها في ماء الشرب.  
يتميز الصلب اليوتكتويدي بضعف مقاومته للتآكل والذي يمثل الاوطأ بين باقي أنواع الصلب بسبب زيادة عدد خلايا التآكل الغلفاني المتمثلة بمكونات البيرلايت والذي يمثل الحد الأعلى للخلايا الغلفانية المجهرية والذي حقق أعلى معدلات تآكل.

#### المصادر

Fontana G. and Green, D., "Corrosion Engineering", 3rd Edition, McGraw-Hill International, U.S.A, pp. 138-172, (1986).

Roberge P.R., "Hand Book of Corrosion Engineering", United States of America, New York, pp. 25-88, (2000).

Van Vlack H., "Elements of Materials Science and Engineering", 5th Edition, Wesley Publishing Company, Inc., U.S.A, pp. 53-79, (1985).

Shreir L.L., Jarman R.A., and Burstein G.T., "Corrosion", Vol. 2, Corrosion Control, Third edition, Great Britain, pp. 43-67, (2000).

رحمه الله. حسين باقر, "هندسة التآكل وحماية سطوح المعادن", الجامعة التكنولوجية, العراق, ص 16-72, (1989).  
الخرزجي. قحطان محمد خلف, والشريف. عبدالجواد محمد احمد, "التآكل أسبابه-أنواعه-طرق الحماية منه", العراق جامعة بغداد, ص 31-53, (1987).

Francis R., "Bimetallic Corrosion", National Corrosion Service, London, U.K., pp. 28-67, (2000).

Winston R., "Uhlig's Corrosion Handbook", John Wiley & Sons, Inc., Canada, pp. 47-78, (2000).

Salem A.H., and Saber T.M., "Inhibition of The Corrosion of Steel Pipes Carrying Potable Water", Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, Vol.93, pp.461-471, (1993).

Han L., and Song S., "A measurement System Based on Electrochemical Frequency Modulation Technique for Monitoring the Early Corrosion of Mild Steel in Sea Water", pp. 1-19, (2008)

Melchers R. E., "Effect on Marine Immersion Corrosion of Carbon Content of Low Alloy Steels", Journal of Corrosion Science, Vol. 45, pp. 2609-2625, (2003).

Pillai K. C., and Narayan R., "The Corrosion of Mild Steel in 0.01M, 1M, 3M HCL", Journal of Corrosion Science, Vol. 22, No. 1, pp. 13-19, (1982).

Tomlinsion W. J., and Giles K., "The Microstructures and Corrosion of 0.79C Steel Tempered in the Range 100-700 °C", Journal of Corrosion Science, Vol. 23, pp. 1353-1359, (1983).

Mirosalv H., and Mirosalv K., "Influence of Carbides Over Some Steel Corrosion", Acta University, Vol. 41, pp. 45-55, (2002).

Raja V.S., Baligheid R.G., and Shankar Rao V., "Effect of Carbon on Corrosion Behaviour of Fe<sub>3</sub>Al Intermetallics in 0.5 N Sulphuric Acid", Journal of Corrosion Science, Vol. 44, pp. 521-533, (2002).

Takasaki S., and Yamada Y., "Effects of Temperature and Aggressive Anions on Corrosion of Carbon Steel in Potable Water", Journal of Corrosion Science, Vol. 49, pp. 240-247, (2007).

Garcia K.E., and etal, "Lost Iron and Iron Converted in to Rust in Steels Submitted to Dry-Wet Corrosion Process", Journal of Corrosion Science, Vol. 50, pp. 763-772, (2008).

Macdonald D. D., and etal, "Corrosion of Carbon steel during Cyclical Exposure to Wet Elemental Sulphur and the Atmosphere", Journal of Corrosion Science, Vol. 18, pp. 499-501, (1978).

Moller H., "The Influence of Mg<sup>2+</sup> on the Formation of Calcareous Deposits on a Freely Corroding Low Carbon Steel in Sea Water", Journal of Corrosion Science, Vol. 49, pp. 1992-2001, (2007).

Corvo F., and Minotas J., "Changes in Atmospheric Corrosion Rate Caused by Chloride Ions Depending on Rain Regime", Journal of Corrosion Science, Vol. 47, pp. 883-892, (2005).

Higgins R.A., "Engineering Metallurgy", The English University Press.Ltd, London, U.K, pp. 152-160, (1999).

ASTM G 1-90: Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens, ASTM, Washington, USA, pp. 1-8, (1999).

Tomlinsion W. J., and Giles K., "The Microstructures and Corrosion of 0.79C Steel Tempered in the Range 100-700 °C", Journal of Corrosion Science, Vol. 23, pp. 1353-1359, (1983).

Ahmad Z., "Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control", Elsevier Science and Technology Books, pp. 9-17, (2006).

Bayliss D.A., and Deacon D.H., "Steel Work Corrosion Control", Second edition, London, pp. 60-70, (2002).

Azzerri N., and etal, "Assessment of Corrosion Rate of Steel in Sea Water by Polarization Resistance Technique", Journal of Corrosion Science, Italy Vol. 21, No. 11, pp.781-787, (1981).

Louis F., Jack T., and Henry L., "Prediction of Corrosion Defect Growth on Operating Pipelines", Trans. Canada Pipelines Ltd., Canada, (2004).

Salem A.H., and Saber T.M., "Inhibition of The Corrosion of Steel Pipes Carrying Potable Water", Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, Vol.93, pp.461-471, (1993).

Yunping X., and Zhaohui X., "Corrosion Effect of Magnesium Chloride and Sodium Chloride on Automobile Components", University of Colorado, U.S.A, Report No. CDOT-DTD- R-2002-4, (2002).