

## دراسة سلوك تآكل الفولاذ الكربوني في الأوساط المائية

د. خالد عثمان شرف\*

### الملخص

دُرِسَ سلوك تآكل الفولاذ الكربوني في الأوساط المائية. استخدمت في هذه الدراسة مجموعة من أنواع الفولاذ الكربوني في أوساط التآكل الأكثر شيوعاً التي هي الماء المالح وماء الشرب. غُمِرَ العينات في الأوساط المائية مدة (30, 45, 60 days)، وحُسِبَ معدلات التآكل باستخدام طريقة فقدان الوزن. دُرِسَ تأثير محتوى الكربون، وأوساط التآكل ومدد الغمر في معدلات تآكل عينات الفولاذ الكربوني الهيبويوتكتويدي. الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير محتوى الكربون في معدلات التآكل للفولاذ في أوساط تآكل مختلفة وبفواصل زمنية متغيرة. بيّنت النتائج الحاصلة وجود علاقة جيدة ترتبط بالبنية المجهرية، إذ كلما كان البرليت مرتفعاً كان معدل التآكل أعلى، لذلك يزداد معدل التآكل مع الزيادة في نسبة الكربون. بيّنت النتائج أيضاً أن معدل تآكل الفولاذ الكربوني في الماء المالح يكون أعلى مما هو عليه في ماء الشرب. ووجد أيضاً أنه كلما كان زمن التعرض لوسط التآكل أطول كان معدل التآكل أقل مع بقاء استمرار الزيادة في فقدان الوزن.

الكلمات المفتاحية: الفولاذ الكربوني، محتوى الكربون، الأوساط المائية، عمليات التآكل.

\* قسم هندسة التصميم الميكانيكي - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

## 1- المقدمة:

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 للكهرباء (Electrolyte)، وقد تم التركيز على هذا النوع من التآكل الذي يصيب الأجزاء المعدنية، ومثال ذلك تآكل الفولاذ الكربوني عند وجود الماء، يسمى هذا النوع من التآكل بالتآكل الغلفاني نسبة إلى مكتشفه العالم الإيطالي كلفاني. تتكون خلية التآكل الغلفاني (Galvanic corrosion cell) من قطبين يمثل أحدهما المصعد أي الأنود (Anode) ويمثل الآخر المهبط أي الكاثود (Cathode) وأن فرق الجهد بين المصعد والمهبط يمكن أن يحصل في حال كون قطبي الخلية من معدنين مختلفين أو من معدن واحد. سيتم التركيز في هذا البحث على التآكل في المعدن الواحد، وبذلك يصبح المعدن الواحد عبارة عن قطبين، يمثل أحد هذين القطبين المصعد، في حين يمثل الآخر المهبط [5,6]. تتكون البنية المجهرية (microstructure) للفولاذ الكربوني (carbon steel) المستخدم في هذا البحث من الفريت (Ferrite) والبرليت (Pearlite)، حيث يمثل الفريت طوراً أحادياً (Single phase)، أما البرليت فيمثل طورين مختلفين (Two phases) هما الفريت والسمنتيت، ويعطي الطوران المختلفان خواصاً ميكانيكية متميزة لكنهما أكثر عرضة للتآكل من البنية المجهرية ذات الطور الأحادي، إذ تتشكل خلايا التآكل الغلفاني المجهرية (Micro-galvanic corrosion cell) بسبب اختلاف الجهد المتوقع بين الطورين المجهريين [6,7].

يعدُّ الفولاذ الكربوني أكثر عرضة للتآكل؛ وذلك بسبب

يعدُّ التآكل (Corrosion) من أهم مشكلات الإخفاق السطحي التي تتعرض له وتعاني منه المنشآت الهندسية والصناعية أينما وجدت، ويعرف التآكل بعدة أشكال أهمها: انحلال المعدن بسبب تفاعله مع وسط التآكل (Corrosion environment) الذي يتعرض له، ويعرف أيضاً بأنه تلف في المعدن نتيجة تفاعله كيميائياً أو كهروكيميائياً مع الجو أو وسط التآكل المحيط به، أو هو العملية العكسية لاستخلاص المعدن من خاماته أي إعادة المعدن إلى صورته الأصلية الحرة الثابتة التي كان عليها في الطبيعة قبل استخلائه، أو هو رد فعل كهروكيميائي (Electrochemical) للمعادن المحاطة بمواد كيميائية من التربة أو الماء، وتشكل هذه خلايا توصيل تولد الكهرباء نتيجة فرق الجهد (Different potentials) الطبيعي بين المعادن الذي ينتج عنه ذوبان المعدن الأكثر نشاطاً [1,2,3,4]. تتعدد الأضرار التي يسببها الإخفاق السطحي بسبب التآكل، وجميعها ذات مردود اقتصادي سيئ، وتمثل الخسائر الناتجة عن التآكل جزءاً لا يستهان به من الناتج القومي للدول الصناعية، إذ يسبب التآكل خسائر جسيمة في الاقتصاد العالمي، تقدر بالمليارات سنوياً، لأنه يدمر كمية ضخمة من المنشآت والآلات المعدنية. كما يسبب في -كثير من الأحيان- توقف المصانع عن العمل توفراً غير مبرمج، وما يرافق ذلك من تكاليف اقتصادية ضخمة غير متوقعة تتمثل في فواقد الإنتاج وارتفاع كلف الصيانة الدورية، فضلاً عن تكاليف الإحلال وتطبيق الأساليب والطرائق الحديثة في مقاومة التآكل [4,5]. إن التآكل الذي سوف نتناوله في هذا

(2005)[10] وزميله تأثير نسبة الكربون في مقاومة التآكل في المحيط الجوي، ووجدوا أن الفولاذ الحاوي نسبة 0.08% C أكثر مقاومة للتآكل من الفولاذ الحاوي على 0.30% C، ويعود السبب في ارتفاع مقاومة التآكل للفولاذ الحاوي على 0.08% C إلى انخفاض مساحة خلايا التآكل الغلفاني المجهري المتمثلة بالبرليت، وبين الباحثان أن مقاومة التآكل في الفولاذ الكربوني تقل بزيادة نسبة الكربون فيه.

وقام الباحث (Takasaki S., 2007) [11] وزملاؤه بدراسة تأثير زمن التعرض للتآكل في معدلات التآكل في الفولاذ الكربوني الطري (Mild steels) واستنتجوا أن زيادة زمن التعرض للتآكل يقلل من معدلات التآكل، كما استنتج الباحث (Takasaki S.) وزملاؤه من خلال دراسة تأثير تركيز أيونات  $Cl^-$ ،  $SO_4^{2-}$  في معدلات التآكل في الفولاذ الكربوني الطري أن معدلات التآكل تزداد بازدياد تركيز الأيونات.

كما درس الباحث (Wall F. D. 2005) [12] وزملاؤه تأثير زمن التعرض للتآكل في معدل التآكل، حيث وجدوا تناقصاً في معدلات التآكل بمرور الوقت، وعللوا ذلك بوجود الصدأ وطبقات التآكل التي تميل إلى تخفيض معدل التآكل، وقد تشكل هذه الطبقات أغشية واقية تقلل من تفاعل سطح المعدن مع وسط التآكل. واستنتج الباحث (Corvo F. 2005) [13] وزميله أن سبب اختلاف معدلات التآكل للفولاذ الكربوني في الأوساط الجوية هو اختلاف تركيز أيونات الكلوريدات  $Cl^-$  التي تسبب تعجيل معدلات التآكل ولاسيما المناطق المتعرضة للأمطار

كثرة تطبيقاته واستخداماته الهندسية والصناعية. وؤدي التآكل بواسطة الماء دوراً هاماً في العديد من المنشآت الهندسية والصناعية منها: أنابيب نقل المياه والنفط، ومعدات تسخين الماء وخزانات الماء، والمصانع، والجسور، والمنشآت البحرية، والسفن، والطائرات، ووسائل النقل البري. ويشبه سلوك الماء كوسط تآكل سلوك المحيط الجوي من حيث توافر محلول مائي موصل للكهرباء بصورة دائمة وتوافر عامل مؤكسد وهو الأوكسجين المذاب، لذا فإن التآكل بواسطة الماء يصنف كنوع من أنواع التآكل الكهروكيميائي [6,7,8]. سوف يتم التركيز في هذه الدراسة على سلوك التآكل في الفولاذ الكربوني الذي يحتوي نسباً مختلفة من الكربون، وذلك لمعرفة مدى تأثير البنية المجهرية للفولاذ الكربوني في مقاومة التآكل؛ وذلك باختيار أوساط التآكل الآتية: ماء الشرب (Drinking water) والماء المالح (Salt water). استخدم في هذا البحث الماء المالح الصناعي، وذلك بإضافة 3.5% من كلوريد الصوديوم (ملح الطعام)  $NaCl$  إلى الماء المقطر لتقريبه إلى مكونات ماء البحر. أجريت العديد من البحوث والدراسات في مجال التآكل المعدني، وقد درس الباحث راجا وزملاؤه (Raja V.S., 2002) [9] تأثير نسبة الكربون في معدل التآكل باستخدام حمض الكبريت (Sulfuric acid) بتركيز (5%) كوسط للتآكل، واستنتجوا أن معدل التآكل يزداد بازدياد نسبة الكربون في الفولاذ بسبب تزايد مساحة خلايا التآكل الغلفاني المجهري المتمثلة بالبرليت. ودرس الباحث (Batis G., )

ضمن المجال (من  $25^{\circ}\text{C}$  إلى  $80^{\circ}\text{C}$ ).

**2-2- تصنيف التآكل على أساس منشأ التآكل:** - التآكل الكيميائي (Chemical corrosion): هو التآكل الذي ينشأ بسبب التفاعل المباشر بين الفلز أو (السبيكة) والبيئة المتصلة بها.

- التآكل الكهروكيميائي (Electrochemical Corrosion): هو التآكل الذي ينشأ بسبب تيار كهربائي يتعرض له الفلز أو السبيكة، وتتشأ هذه التيارات بسبب تطبيق جهد خارجي أو وجود ازدواج غلفاني أو وجود خلايا تركيزية.

**2-3- تصنيف التآكل على أساس وجود الرطوبة من عدمها:**

- التآكل الرطب (Wet Corrosion): هو التآكل الذي يحدث في وسط سائل (Liquid) كتآكل الحديد في الماء أو الحمض.

- التآكل الجاف (Dry Corrosion): هو التآكل الذي يحدث في غياب السائل أو عند درجة حرارة أعلى من درجة تكثف بخار السائل. والوسط الأكال في هذه الحالة عبارة عن الأبخرة والغازات، وهو مرتبط دائماً بدرجات الحرارة العالية. وأقرب مثال على هذا النوع من التآكل هو تآكل الحديد بواسطة غازات الأفران.

**2-4- تصنيف التآكل على أساس نوع التآكل (Types of Corrosion):**

يمكن تمييز أنواع من التآكل أبرزها ما يأتي:

1 - التآكل المنتظم (Uniform Corrosion)

2 - التآكل الغلفاني أو ثنائي المعدن

(Galvanic or Bimetallic Corrosion)

ولأوقات مستمرة أو في المناطق البحرية، إذ تؤدي زيادة تركيز أيونات الكلوريدات إلى زيادة الموصلية (Conductivity) التي تزيد من معدل التفاعل الكهروكيميائي، وبذلك يزداد معدل التآكل. واستنتج الباحث (Garcia K.E., 2008) [14] وزملاؤه أن زيادة تركيز أيونات الكلوريدات  $\text{Cl}^-$  سيزيد من فقدان في الوزن للفولاذ الكربوني وتزداد الموصلية أيضاً. وبيّنوا أن زيادة تركيز (NaCl) تؤدي إلى زيادة معدلات التآكل.

إن للتآكل علاقة وثيقة بنوعية المادة المعرضة للتآكل وبنوعية الوسط المسبب للتآكل، وهناك عددٌ كبيرٌ من الأوساط المساعدة على التآكل التي تظهر منها أنواع مختلفة من التآكل، لعل أهم تلك الأوساط المحيط الجوي والماء والتربة والأحماض والأملاح. ولدى إجراء الفحوصات والاختبارات الخاصة بظاهرة التآكل في وسط ما ولمعدن معين، لابدّ أولاً من التحليل الدقيق لكل من الوسط والمعدن، وذلك لغرض تحديد نوع التآكل الذي سوف يسببه، وبناءً عليه يجري استنتاج الطرائق الكفيلة للحماية منه. دُرِسَ في هذا البحث تآكل أنواع من الفولاذ الكربوني في الماء العذب والماء المالح.

## 2- تصنيف التآكل

(Classification of Corrosion):

يمكن تصنيف التآكل بعدة طرائق منها:

**1-2- تصنيف التآكل على أساس درجة الحرارة:**

- التآكل عند درجات الحرارة العالية (High-temperature Corrosion): ينشأ هذا النوع من التآكل

ضمن المجال (من  $100^{\circ}\text{C}$  إلى  $1000^{\circ}\text{C}$ ).

- التآكل عند درجات الحرارة المنخفضة (Low-temperature Corrosion): ينشأ هذا النوع من التآكل

(Low-temperature Corrosion): ينشأ هذا النوع من التآكل

**4-2- إعداد نماذج الاختبار:**

تم تهيئة سبعة نماذج لكل نوع من أنواع الفولاذ الكربوني الستة المستخدمة في هذه الدراسة، ثلاثة منها بغرض إجراء اختبار التآكل في الماء العذب، وثلاثة لإجراء الاختبار في الماء المالح، وواحدة بغرض الفحص المجهرى، وقد أجريت عمليات التشغيل الميكانيكي التي تضمنت القطع والتجليخ والتفريز، إلى أن تم الحصول على النماذج جميعها بشكل متوازي المستطيلات بأبعاد (30\*20\*5mm)، وبعد الانتهاء من الحصول على النماذج بالشكل والقياسات المطلوبة تم تهيئة سطوح النماذج بشكل متماثل بواسطة عمليتي التجليخ والتنعيم لإزالة الخشونة السطحية والزوايا الحادة غير المرغوب فيها. وتُقيمت النماذج من إحدى الزوايا بقطر (1mm) بغرض تعليقها في أوساط التآكل، وبعد الانتهاء من كل عملية كانت النماذج تغسل بالماء المقطر والكحول وتجفف باستخدام المجفف الكهربائي، وأخيراً رُقِّمَتِ النماذج للتمييز فيما بينها.

**4-3- التحليل الكيميائي للنماذج المستخدمة:**

أُجريت اختبارات التحليل الكيميائي للنماذج المستخدمة في البحث باستخدام جهاز التحليل الطيفي للمعادن وذلك لتحديد نسب الكربون والعناصر الكيميائية الأخرى، ومن أجل الحصول على نتائج موثوق بها أُخِذَت ثلاث قراءات، ثم أخذ متوسط القراءات الثلاث. يبين الجدول (1) التركيب الكيميائي لأنواع الفولاذ الكربوني المستخدم في البحث.

**3- تآكل التماس الشائبي**

(Dissimilar Metal Corrosion)

**4 - التآكل الإجهادي التشققي**

(Stress Corrosion Cracking, SCC)

**5- التقصف الهيدروجيني**

(Hydrogen Embrittlement)

**6 - تآكل بين الحبيبات**

(Inter-granular Corrosion, IGC)

**7 - تآكل النزاع الاختياري أو (الفصل الانتقائي)**

(Selective Leaching or Parting)

**8- التآكل بالتعرية (Erosion corrosion)****9- التآكل الشقي أو الصدعي (Crevice Corrosion)****10- التآكل التنقري (Pitting Corrosion)****3- هدف البحث:**

هَدَفَ البحث إلى دراسة تأثير نسبة الكربون في سلوك تآكل الفولاذ الكربوني في أوساط التآكل الآتية: ماء الشرب والماء المالح، وإيجاد العلاقة بين تغيير نسبة الكربون ومعدلات التآكل للفولاذ وعلاقتها بالتركيب المجهرى، وتأثير أوساط التآكل المستخدمة وعامل زمن التعرض للتآكل في معدلات التآكل.

**4- الجزء العملي:****4-1- المواد:**

استُخدمت ستة أنواع من الفولاذ الكربوني الهيبويونكتويدي (Hypo-eutectoid Steels) واسع الاستخدام في التطبيقات الهندسية والصناعية. تحوي هذه الأنواع نسباً مختلفة من الكربون، وهي مبينة في جدول التحليل الكيميائي (1).

الجدول(1): التركيب الكيميائي لأنواع الفولاذ الكربوني المستخدم

Type	Chemical Compositions (%)									
	C	Si	Mn	p	S	Cr	Ni	Mo	Al	Fe%
S1	0.112	0.240	0.512	0.009	0.016	0.111	0.045	0.013	0.005	Bal.
S2	0.196	1.920	0.952	0.024	0.009	0.016	0.008	0.004	0.023	Bal.
S3	0.314	1.761	0.681	0.015	0.007	0.050	0.026	0.008	0.011	Bal.
S4	0.394	2.023	0.910	0.014	0.037	0.242	0.230	0.071	0.018	Bal.
S5	0.496	0.251	1.211	0.006	0.036	0.441	0.083	0.028	0.009	Bal.
S6	0.648	0.214	0.810	0.003	0.038	0.082	0.093	0.043	0.041	Bal.

## 4-4- المعالجة الحرارية للنماذج:

الكربوني المستخدم في البحث في فرن كهربائي إلى درجة حرارة فوق درجة الحرارة  $AC_3$  أي فوق المنحنى (GS) بمقدار  $(30-50^\circ C)$ ، ثم يحتفظ بها عند هذه الدرجة مدة تتوقف على سمك العينة [16]، بعد ذلك أُخْرِجَتِ النماذج من الفرن وتركت تبرد في الهواء الساكن حتى درجة حرارة الغرفة. يبين الجدول (2) زمن الإبقاء ودرجة حرارة عملية المعادلة الحرارية التي أُجريت على أنواع الفولاذ الكربوني المستخدم في البحث.

أُجريت عملية المعادلة (Normalizing) التي هي إحدى عمليات المعالجة الحرارية المتزنة- (Equilibrium heat treatment) على نماذج الفولاذ الكربوني المستخدمة، وذلك من أجل إعادة الفولاذ إلى وضعه المتزن المتمثل بظهور أطواره المتزنة وهي الفريت والبرليت [15,16] بغرض دراسة تأثير البنية المجهرية للفولاذ الكربوني المستخدم في مقاومة التآكل في الأوساط المائية. أُجريت عملية المعادلة بتسخين نماذج الفولاذ

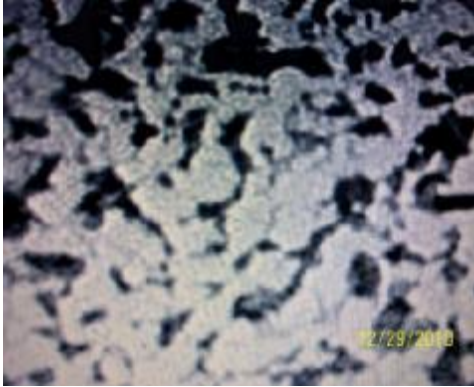
الجدول(2): عملية المعادلة الحرارية على أنواع الفولاذ الكربوني

زمن الإبقاء أو التشريب Time(min) Soaking	درجة حرارة المعادلة Normalizing Tem.(°C)	محتوى الكربون Carbon content
30	900	0.112 % C
30	890	0.196 % C
30	865	0.314 % C
30	850	0.394 % C
30	820	0.496 % C
30	800	0.648 % C

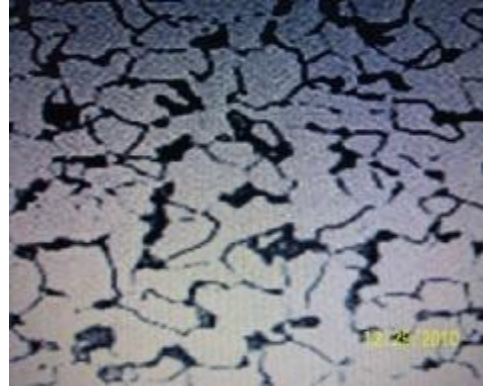
## 4-5- الفحص المجهرى:

يلي ذلك عملية الإظهار (Etching) باستخدام محلول النايتل (Nital) الذي يتكون من النسب الآتية: 2% حمض النتريك المركز، و98% كحول مثيل (2% Nitric acid and 98% alcohol). يبين الشكل (1) البنية المجهرية لنماذج الفولاذ الكربوني التي عولجت حرارياً بعملية المعادلة.

حُضِرَتُ عينات من نماذج الفولاذ الكربوني المعالجة حرارياً بغرض الفحص المجهرى بالطريقة التقليدية المعروفة التي شملت عمليات التجليخ والتنعيم (Grinding) باستخدام أوراق صنفرة من كربيد السليكون (SiC) بدرجات (320, 600, 800, 1000, 1200)، ثم الصقل الكهربائي (Electrical Polishing)،



فولاذ كربوني نسبة الكربون فيه 0.196%



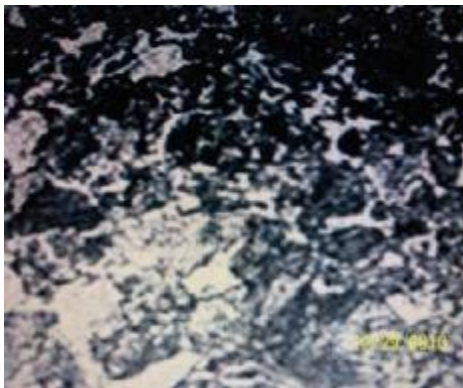
فولاذ كربوني نسبة الكربون فيه 0.112%



فولاذ كربوني نسبة الكربون فيه 0.394%



فولاذ كربوني نسبة الكربون فيه 0.314%



فولاذ كربوني نسبة الكربون فيه 0.648%



فولاذ كربوني نسبة الكربون فيه 0.496%

الشكل(1): صور البنية المجهرية لنماذج الفولاذ الكربوني الهيبويوتكتويدي المعالج

حرارياً ذي التركيب الفيريتي والبرليني (Magnification 200x)

### 5- اختبارات التآكل:

### 5-3- طريقة إجراء اختبار التآكل:

أُجريت اختبارات التآكل لنماذج الفولاذ الكربوني المعدة سابقاً، وذلك بغمرها بشكل كامل في أوساط التآكل المختارة بعد تعليقها بشكل عمودي في أحواض زجاجية معدة لهذا الغرض خلال المدة الزمنية المحددة، بعد ذلك أُغْلِقَتِ الأحواض بشكلٍ محكمٍ لتصبح عملية الاختبار مغلقة وذلك لمنع ذوبان أو أكسجين الهواء داخل أوساط التآكل. أُجريت اختبارات التآكل جميعها في درجة حرارة الغرفة.

### 5-4- حساب معدل التآكل بطريقة فقدان الوزن:

(Weight Loss Method)

### A- حساب الفقد في الوزن:

حُسِبَ الفقد في الوزن وفق الخطوات الآتية:

1- نُظِّفَتِ النماذج قبل عملية الوزن بحمض كلور الماء المخفف (HCL) ذي التركيز 10%، بعد ذلك غُسِلَتُ بالماء المقطر والكحول ثم جُفِّفَتُ كهربائياً.

2- تم إيجاد وزن كل نموذج باستخدام ميزان إلكتروني حساس نوع (Sartorius) ألماني الصنع بدقة (0.1mg)، حيث سجلت نتائج قياس الوزن الابتدائي (Original weight).

3- وُضِعَتِ النماذج في أوساط التآكل بحيث تكون معلقة بخيوط عازلة للكهرباء ومغمورة تماماً في الحوض الزجاجي الذي يحوي على أوساط التآكل.

4- بعد انتهاء مدة التعرض لوسط التآكل، ترفع النماذج المحددة لتلك المدة من وسط التآكل ثم تنظف من طبقات الصدأ الناتجة باستخدام فرشاة ناعمة وماء أولاً، ثم باستخدام محلول حمض كلور الماء (HCl) المخفف لتنظيف الطبقات المتآكلة دون المساس بالمعدن، بعد ذلك

### 5-1- مدد التعرض لوسط التآكل:

- المدة الزمنية الأولى: ثلاثون يوماً (30 days) أي (720 hours).

- المدة الزمنية الثانية: خمسة وأربعون يوماً (45 days) أي (1080 hours).

- المدة الزمنية الثالثة: ستون يوماً (60 days) أي (1440 hours).

### 5-2- أوساط التآكل (Corrosive media):

- الماء المالح (Salt water): للحصول على الماء المالح أُضِفَ مقدار (3.5%g) من كلوريد الصوديوم (NaCl) إلى كل (96.5%g) من الماء المقطر، حيث تم التأكد من إذابة كلوريد الصوديوم في الماء بشكل كامل قبل غمر النماذج.

- ماء الشرب (Drinking water): الماء المستخدم كوسط تآكل هو ماء الشرب المتناول في مدينة دمشق. يبين الجدول (3) التحليل الكيميائي والفيزيائي لأوساط التآكل.

### الجدول (3): التحليل الكيميائي والفيزيائي لأوساط التآكل

#### المستخدمة في البحث

Properties	الماء المالح Salt water	ماء الشرب Drinking water
Total hardness (mg/l)	1700	225
Calcium hardness (mg/l)	260	120
(Cl <sup>-</sup> ) (mg/l)	1596	38
(Mg <sup>+2</sup> ) (mg/l)	323	25.54
(Ca <sup>+2</sup> ) (mg/l)	104.4	50.23
PH	8.35	8.38
Electrical conductivity(EC)	775	486
Electrical potential (volt)	-37	-69.6



(Corrosion penetration rate). يعطى معدل تغلغل

التآكل بالعلاقة الآتية:

$$CR \text{ (mm/y)} = (87.6 \times \Delta W) / (D \times A \times T)$$

إذ: CR :

معدل التآكل بالمليمتري بالسنة  $\Delta W$  (mm/y): النقص بالوزن (mg).

A: مساحة السطح المعرض للوسط  $T$  (cm<sup>2</sup>): زمن

الاختبار بالساعة (D: Hours): كثافة المعدن (g/cm<sup>3</sup>).

#### 6- النتائج والمناقشة:

إن الهدف الرئيسي من البحث هو دراسة تأثير نسبة الكربون في معدل تآكل الفولاذ الكربوني وفقاً لتغير كل من وسط التآكل وزمن التعرض لهذا الوسط. تبين الجداول (4، 5، 6، 7، 8) نتائج اختبارات التآكل التي أجريت على نماذج الفولاذ الكربوني في أوساط التآكل المختارة خلال ثلاث مدد زمنية (30، 45، 60 days).

مُثلت النتائج

بيانياً في الأشكال (2، 3، 4، 5، 6).

الجدول (4): قيم معدل تآكل الفولاذ الكربوني في وسطي

التآكل وفقاً لنسب الكربون خلال (30 days)

معدل التآكل في الماء المالح خلال 30 days)		معدل التآكل في ماء الشرب خلال 30 days)		نسبة الكربون (%) (C في النماذج)
(mm/y)	(mpy)	(mm/y)	(mpy)	
0.09779	3.85	0.08255	3.25	0.112
0.10337	4.07	0.09067	3.57	0.196
0.11099	4.37	0.09931	3.91	0.314
0.11455	4.51	0.10287	4.05	0.394
0.11658	4.59	0.10541	4.15	0.496
0.13970	5.50	0.11684	4.60	0.648

تغسل النماذج بالماء المقطر والكحول، ثم تجفف كهربائياً، عندئذ تتم إعادة وزن كل نموذج لإيجاد الوزن النهائي (Final weight)، وذلك من أجل حساب التغير في الوزن ( $\Delta W$ ) الذي هو عبارة عن الفرق بين الوزن الابتدائي (وزن النموذج قبل إجراء اختبار التآكل) والوزن النهائي (وزن النموذج بعد إجراء اختبار التآكل) وإزالة مخلفات التآكل).

#### B- حساب معدل التآكل:

حُدّد معدل التآكل (Corrosion rate) بوحدة (Mils per year) أي ميلز بالسنة أو اختصاراً (mpy) بالاعتماد على الدالة الرئيسية وهي الفقد في الوزن ( $\Delta w$ ) في أثناء مدة الاختبار (T)، أما ثوابت الاختبار في هذا البحث فهي: كثافة الفولاذ (D)، والمساحة السطحية المعرضة للتآكل (A) [2,3,4,5,6]. استُخدمت المعادلة الآتية لحساب معدل التآكل:

$$CR \text{ (mpy)} = (K \times \Delta W) / (D \times A \times T)$$

إذ:

CR: معدل التآكل (Corrosion rate).

mpy: وحدة قياس معدل التآكل.

K: قيمة ثابتة تساوي ( $3.45 \times 10^6$ ) حتى يصبح معدل

التآكل مقيساً ب (mpy).  $\Delta W$ : الوزن المفقود (g).

D: كثافة الفولاذ (g/cm<sup>3</sup>).

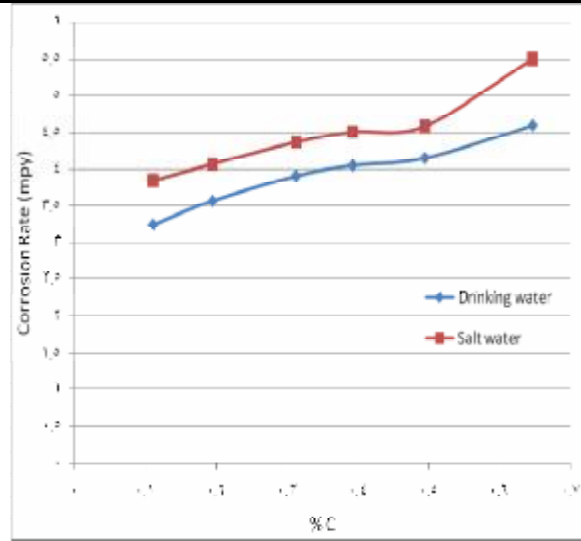
A: المساحة السطحية المعرضة للتآكل (cm<sup>2</sup>).

T: زمن التعرض للتآكل بالساعة (Hours).

Mil = 0.001 inch

كما يمكن حساب معدل التآكل بالمليمتري بالسنة

(mm/y)، ويدعى عادة معدل تغلغل التآكل



الشكل (2): تأثير نسبة الكربون في معدلات التآكل

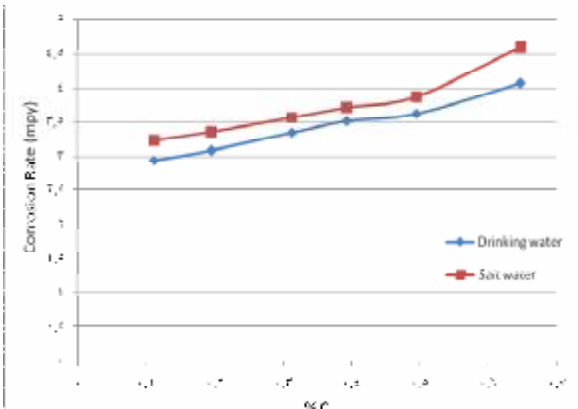
#### خلال (30) يوماً في وسطي التآكل

تشير النتائج الموضحة في الشكل (2) إلى مدى تأثير نسبة الكربون في معدلات تآكل الفولاذ الكربوني في الأوساط الأكلية خلال زمن تعرض مدته (30 days). ويبيّن الشكل (2) معدل التآكل في ماء الشرب والماء المالح، وقد تبين أنه عند زيادة نسبة الكربون في الفولاذ الهيبويوتكتويدي تزداد معدلات التآكل، وتكون هذه الزيادة تدريجية وتشبه -إلى حد ما- العلاقة الخطية، ونتيجة لذلك فإن معدل التآكل يزداد بازدياد نسبة الكربون في الأنواع الستة للفولاذ الكربوني المستخدم. إذ يظهر أن معدل تآكل الفولاذ الكربوني الذي يحوي (0.648% C) هو الأعلى مقارنة بأنواع الفولاذ الكربوني الأخرى المستخدمة، أمّا أقل معدل تآكل فكان للفولاذ (0.112% C)، وتدرّجت معدلات التآكل الأخرى لباقي أنواع الفولاذ تصاعدياً بينهما وفق زيادة نسب الكربون. ترتبط معدلات التآكل بصورة واضحة بنوع الفولاذ الكربوني بشكل عام وبتركيبه المجهرية بشكل خاص، أي بما يحويه الفولاذ من الكربون الذي يمثل العنصر الرئيس للتغيرات المجهرية للفولاذ عند اتحاده بالحديد إذ يؤدي تغيير نسبة الكربون إلى تغيير البنية

المجهرية للفولاذ الكربوني. تتكون البنية المجهرية للفولاذ الهيبويوتكتويدي من الفريت والبرليت بنسب مختلفة تعتمد على تغيير نسبة الكربون، يعود سبب ارتفاع معدلات التآكل مع زيادة نسبة الكربون إلى أن زيادة نسبة الكربون تؤدي إلى زيادة نسبة البرليت مما يؤدي إلى تزايد عدد خلايا التآكل الغلفاني بين الأطوار المجهرية، كون التركيب البرليني هو تركيباً مجهرياً ثنائي الأطوار مكوناً من الفريت والسمنتيت الذي يعكس أفضل تركيب للخلايا الغلفانية الممتلئة بقطب المصعد وهو السمنتيت وقطب المهبط وهو الفريت، ومن ثمّ يمثل البرليت خلية التآكل الغلفاني بسبب فرق الجهد بين المهبط والمصعد أي بين الفريت والسمنتيت عند وجودهما معاً وعند توافر الإلكترونات. ونتيجة لذلك يتبين أنه مع زيادة نسبة الكربون في الفولاذ الهيبويوتكتويدي تزداد المساحة الأنودية (مساحة خلايا التآكل الغلفاني) الممتلئة بالبرليت، مما يؤدي إلى زيادة معدلات التآكل.

#### الجدول (5) قيم معدل تآكل الفولاذ الكربوني في وسطي التآكل وفقاً لنسب الكربون خلال (45 days)

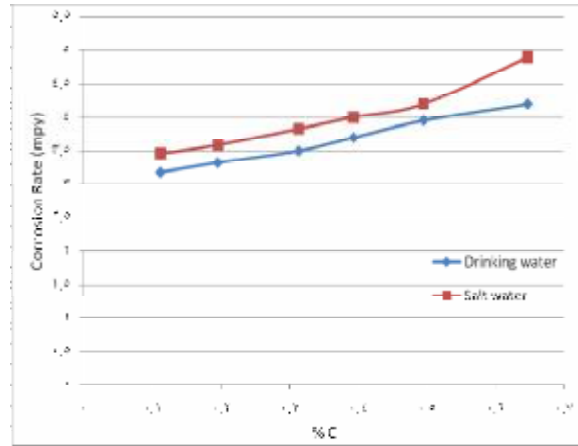
معدل التآكل في الماء المالح خلال (45 days) (mm/y)		معدل التآكل في ماء الشرب خلال (45 days) (mpy)		نسبة الكربون في (% C) في النماذج
(mm/y)	(mpy)	(mm/y)	(mpy)	
0.08788	3.46	0.08077	3.18	0.112
0.09118	3.59	0.08432	3.32	0.196
0.09728	3.83	0.08890	3.50	0.314
0.10160	4.00	0.09398	3.70	0.394
0.10668	4.20	0.10033	3.95	0.496
0.12446	4.90	0.10668	4.20	0.648



الشكل(4): تأثير نسبة الكربون في معدلات التآكل

خلال (60) يوماً في وسطي التآكل

يبين الشكل(4) معدلات تآكل الفولاذ الهيبويوتكتويدي في أوساط التآكل المائية المستخدمة في البحث خلال مدة تعرض مقدارها (60 days). توضح النتائج أنه عند زيادة نسبة الكربون في الفولاذ الهيبويوتكتويدي تزداد معدلات التآكل، وتكون هذه الزيادة تصاعدية وبشكل تدريجي، ونتيجة لذلك يزداد معدل التآكل بازدياد نسبة الكربون في الأنواع الستة للفولاذ الكربوني المستخدم، إذ يظهر أن معدل تآكل الفولاذ الكربوني الذي يحوي 0.648%C هو الأعلى مقارنةً بأنواع الفولاذ الكربوني الأخرى المستخدمة، أمّا أقل معدل تآكل فكان للفولاذ الذي يحوي 0.112%C. نستنتج أن معدل التآكل يزداد مع زيادة نسبة الكربون، وذلك بسبب تغيير البنية المجهرية التي تؤدي إلى زيادة طور السمنتيت ونقصان طور الفريت، وبذلك تزداد المساحة الأنودية مع زيادة نسبة الكربون التي تؤدي إلى زيادة معدلات التآكل. تشير النتائج جميعها الممثلة في الأشكال (2, 3, 4) إلى وجود اختلاف في معدلات تآكل الفولاذ الهيبويوتكتويدي باختلاف وسط التآكل، وهذا يدل على الدور المهم الذي يؤديه وسط التآكل في التأثير في معدلات التآكل. يظهر من الأشكال أن معدلات تآكل أنواع الفولاذ الكربوني في



الشكل(3): تأثير نسبة الكربون في معدلات التآكل

خلال (45) يوماً في وسطي التآكل

يبين الشكل(3) معدلات تآكل الفولاذ الهيبويوتكتويدي في أوساط التآكل المائية (ماء الشرب والماء المالح) خلال مدة تعرض مقدارها (45 days). تظهر نتائج اختبارات التآكل المبينة على الشكل(3) أن معدلات التآكل تزداد بازدياد نسبة الكربون، وتكون هذه الزيادة تدريجية أيضاً وبشكل تصاعدي بدءاً من الفولاذ الذي يحوي (0.112%C) حتى الفولاذ الذي يحوي (0.648%C).

الجدول(6): قيم معدل تآكل الفولاذ الكربوني في وسطي

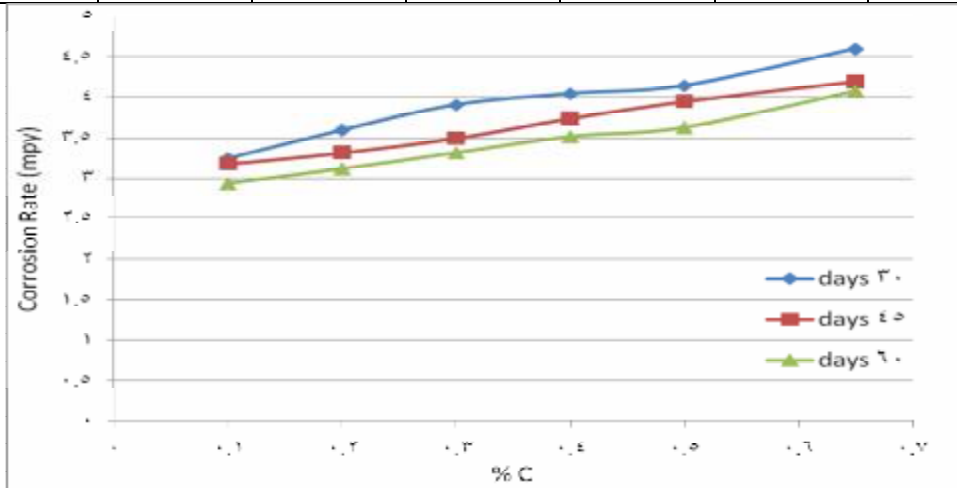
التآكل وفقاً لنسب الكربون خلال(60 days)

معدل التآكل في الماء المالح خلال (60 days)		معدل التآكل في ماء الشرب خلال (60 days)		نسبة الكربون (% C) في النماذج
(mm/y)	(mpy)	(mm/y)	(mpy)	
0.08204	3.23	0.07467	2.94	0.112
0.08534	3.36	0.07848	3.09	0.196
0.09067	3.57	0.08509	3.35	0.314
0.09448	3.72	0.08940	3.52	0.394
0.09855	3.88	0.09220	3.63	0.496
0.11684	4.60	0.10363	4.08	0.648

الماء المالح كانت الأعلى مقارنةً بمعدلات التآكل في ماء الشرب، ويعزى ذلك إلى أن الماء المالح يعدُّ وسطاً نشيطاً في التفاعل الكهروكيميائي، إذ تعمل الأملاح المذابة فيه ولاسيماً الكلوريدات منها على نشر التفاعل في معظم المساحات السطحية من خلال التوصيل الكهربائي المتميز لهذه الأملاح، كما أن تركيز أيونات الكلوريد  $Cl^-$  في الماء المالح أكثر مما هي عليه في الماء العذب، لأن الماء المالح يحوي الملح المتمثل بـكلوريد الصوديوم (NaCl)، الذي يزيد تركيز أيونات الكلوريد وشدة تأثيره [13].

الجدول (7): قيم معدل تآكل الفولاذ الكربوني في ماء الشرب خلال مدد الاختبار

معدل التآكل في ماء الشرب خلال (60 days)		معدل التآكل في ماء الشرب خلال (45 days)		معدل التآكل في ماء الشرب خلال (30 days)		نسبة الكربون (% C)
(mm/y)	(mpy)	(mm/y)	(mpy)	(mm/y)	(mpy)	
0.07467	2.94	0.08077	3.18	0.08255	3.25	0.112
0.07848	3.09	0.08432	3.32	0.09067	3.57	0.196
0.08509	3.35	0.08890	3.50	0.09931	3.91	0.314
0.08940	3.52	0.09398	3.70	0.10287	4.05	0.394
0.09220	3.63	0.10033	3.95	0.10541	4.15	0.496
0.10363	4.08	0.10668	4.20	0.11684	4.60	0.648



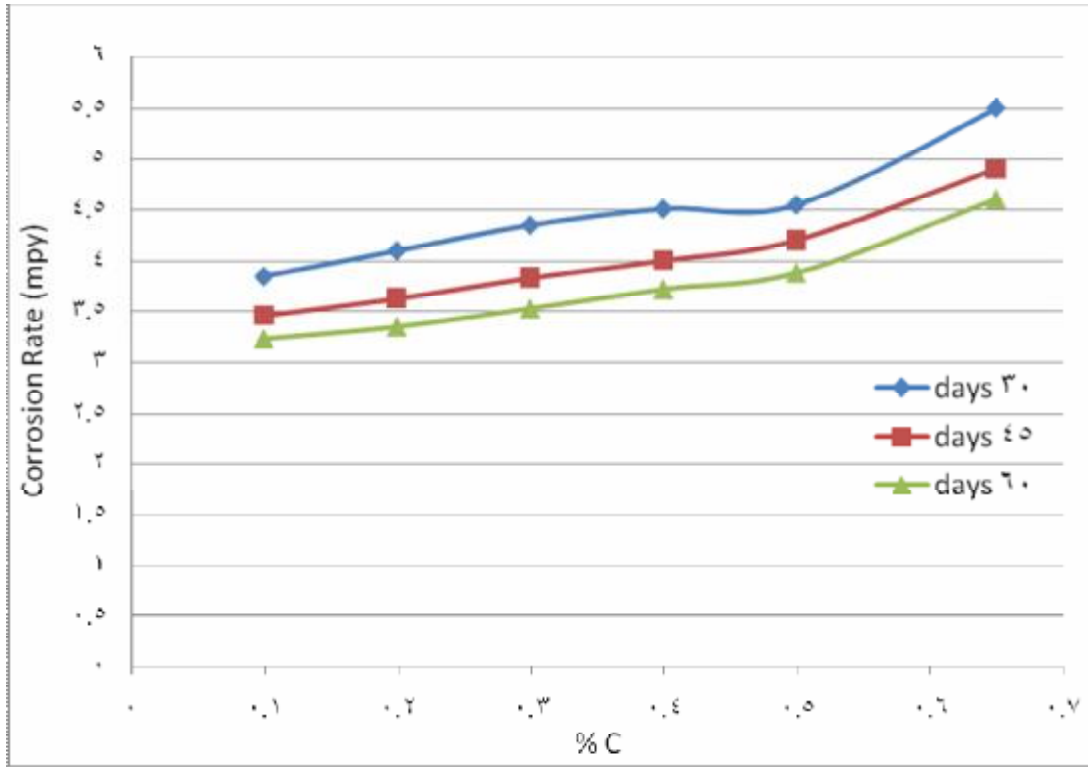
الشكل (5): تأثير زمن التعرض لماء الشرب في معدل تآكل الفولاذ الكربوني

نفاد الأوكسجين المذاب في وسط التآكل، إذ إنه في بداية اختبار التآكل يحدث التفاعل الكهروكيميائي بسرعة مما يؤدي إلى حصول معدلات تآكل عالية، لكن مع مرور الوقت تقل نسبة الأوكسجين المذاب مما يؤدي إلى زيادة تركيز أيونات الهيدروجين التي تتجمع عند قطب المصعد حيث تعيق تفاعلات التآكل، يدعى هذا بالاستقطاب (Polarization) [4,5,6]. كما تتأثر قيمة الدالة الحمضية (PH) بتركيز الأوكسجين المذاب، إذ إن حمضية وقاعدية الوسط تتأثر بقيمة (PH)، فإذا كانت قيمة (PH<6) يكون الوسط حامضياً وذا تأثير عالٍ جداً في المعدن، أما إذا كانت قيمة (PH=7) فيكون الوسط متعادلاً، ويصبح الوسط قاعدياً إذا كانت (PH>8)، ويعد هذا الوسط الأقل تأثيراً في الفولاذ.

يبين الشكل (5) تأثير زمن التعرض للتآكل في الماء العذب في معدلات تآكل الفولاذ الهيبويوتكتويدي. يتضح من النتائج الممثلة في الشكل (5) أن معدلات التآكل تقل تدريجياً مع زيادة مدة التعرض لوسط التآكل، إذ يلاحظ أن معدلات التآكل تتخفض مع زيادة زمن التعرض للتآكل في الماء العذب. يبدو من الشكل أن أقل معدلات التآكل التي حصلنا عليها كانت خلال زمن تعرض مدته ستون يوماً، أما أعلى معدلات التآكل فقد حصلنا عليها خلال مدة تعرض مدتها ثلاثون يوماً. إن سبب انخفاض معدلات التآكل مع زيادة زمن التعرض لوسط التآكل يعود إلى بطء سرعة التفاعل الكهروكيميائي مع استمرار زمن التعرض بسبب تشكل غشاء أو طبقات من مخلفات التآكل على سطح الفولاذ الكربوني المستخدم تعيق استمرار عملية التآكل الكهروكيميائي، مما يؤدي إلى تقليل معدلات التآكل مع استمرار الزمن. وكذلك بسبب

الجدول (8): قيم معدل تآكل الفولاذ الكربوني في الماء المالح خلال مدد الاختبار

معدل التآكل في الماء المالح خلال 60 يوماً		معدل التآكل في الماء المالح خلال 45 يوماً		معدل التآكل في الماء المالح خلال 30 يوماً		نسبة الكربون (% C)
(mm/y)	(mpy)	(mm/y)	(mpy)	(mm/y)	(mpy)	
0.08204	3.23	0.08788	3.46	0.09779	3.85	0.112
0.08534	3.36	0.09118	3.59	0.10337	4.07	0.196
0.09067	3.57	0.09728	3.83	0.11099	4.37	0.314
0.09448	3.72	0.10160	4.00	0.11455	4.51	0.394
0.09855	3.88	0.10668	4.20	0.11658	4.59	0.496
0.11684	4.60	0.12446	4.90	0.13970	5.50	0.648



الشكل (6): تأثير زمن التعرض للماء المالح في معدل تأكل الفولاذ الكربوني

التآكل الكهروكيميائي، مما يؤدي إلى تقليل معدلات التآكل مع استمرار الزمن. ومن ثم نستنتج أنه كلما ازدادت المدة الزمنية للغمر ازدادت مقاومة الفولاذ الكربوني للتآكل والصدأ، لأن زيادة المدة الزمنية للغمر تتيح الفرصة لإكمال التفاعل بين محلول الغمر (وسط التآكل) وسطح المعدن، وهذا يساعد على تكون طبقة من مخلفات التآكل على سطح المعدن وزيادة سمكها مشكلةً عائقاً أمام استمرار التآكل الكهروكيميائي.

#### 7 - الاستنتاجات والتوصيات:

1- يزداد معدل تأكل الفولاذ الهيبويوتكتويدي مع زيادة نسبة الكربون، أي إن مقاومته للتآكل تنخفض مع زيادة نسبة الكربون. وقد تبين أن معدل تأكل الفولاذ الكربوني الذي يحوي 0.648%C هو الأعلى مقارنةً بأنواع

بيّن الشكل (5) تأثير زمن التعرض للتآكل في الماء المالح في معدلات تأكل الفولاذ الهيبويوتكتويدي. يتضح من الشكل أن معدلات التآكل تقل تدريجياً مع زيادة مدة التعرض لوسط التآكل، إذ يلاحظ أن معدلات التآكل تنخفض مع زيادة زمن التعرض للتآكل في الماء المالح. يبدو من الشكل أن أقل معدلات التآكل التي حصلنا عليها كانت خلال زمن تعرض مدته ستون يوماً، أمّا أعلى معدلات التآكل فقد حصلنا عليها خلال مدة تعرض مدتها ثلاثون يوماً. إن سبب انخفاض معدلات التآكل مع زيادة زمن التعرض لوسط التآكل يعود إلى بطء سرعة التفاعل الكهروكيميائي مع استمرار زمن التعرض بسبب تشكل غشاء أو طبقات من مخلفات التآكل على سطح الفولاذ الكربوني المستخدم تعيق استمرار عملية

- 5- تم الحصول على أقل معدلات للتآكل خلال زمن تعرض لوسط التآكل مدته ستون يوماً، أمّا أعلى معدلات للتآكل فقد حصلنا عليها خلال مدة تعرض مدتها ثلاثون يوماً.
- 6- إجراء المزيد من الدراسات والبحوث في هذا المجال على أنواع أخرى من الفولاذ الكربوني وحديد الصب والنحاس والألمنيوم والفولاذ غير القابل للصدأ.
- 7- نقل النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها في هذا البحث إلى الواقع العملي الصناعي.
- الفولاذ الكربوني الأخرى المستخدمة، أمّا أقل معدل تآكل فكان للفولاذ الذي يحوي C 0.112%.
- 2- تتغير معدلات تآكل الفولاذ الكربوني باختلاف وسط التآكل، وقد بينت النتائج أن معدلات التآكل في الماء المالح كانت الأعلى مقارنةً بمعدلات التآكل في ماء الشرب.
- 3- تؤدي زيادة تركيز أيونات الكلوريد  $Cl^-$  في محلول التآكل الملحي إلى زيادة معدلات التآكل في الفولاذ الكربوني.
- 4- تتخفف معدلات تآكل الفولاذ الكربوني مع زيادة زمن التعرض للتآكل، أي كلما ازدادت المدة الزمنية للغمر ازدادت مقاومة الفولاذ الكربوني للتآكل والصدأ.

13. Corvo F., and Minotas J., "Changes in Atmospheric Corrosion Rate Caused by Chloric Ions Depending on Rain Regime", Journal of Corrosion Science, Vol.47, pp. 883 – 892, 2005.
14. Garcia K.E. and etal H., "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.
15. Mik Corite, Heat Treatment of Steel. 2004. Internet.
16. Brooks, C. R., Principles of the Heat Treatment of Plain Carbon and Low Alloy Steels, ASM International, Materials Park, OH, 1995.

### المراجع

1. ASM Handbook Volume13A: Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection ASM International, 2003.
2. Mars G. Fontana, "Corrosion Engineering" Third Edition, 2006.
3. NCS Schools Experiments Corrosion and Protection of Metals, Article given on the internet at the web site [http://www.npl.co.uk/.\(2005\)](http://www.npl.co.uk/.(2005)).
4. K.R. Trethewey & J. Chaberlain, "Corrosion for Science and Engineering" 2<sup>nd</sup> ed., printed in Singapore, 1996.
5. Pierre R. Roberge, Handbook of Corrosion Engineering, 1999.
6. Stephen C. D., "Galvanic Corrosion", University of Delaware, U. S. A. , 2003.
7. L. L. Shreir, R. A. Jarman and G.T. Burstein, "Corrosion Control", Third Edition, Vol.2, 2000.
8. William D. Callister, JR. Materials Science and Engineering an Introduction. Seventh edition, USA-2007.
9. Raja V. S., Baligidad R. G.,and Shankar Rao V., "Effect of Carbon on Corrosion Behavior of Fe<sub>3</sub> Al Inter-metallic's in 0.5 N Sulfuric acid ", Journal of Corrosion Science, Vol. 33, pp.521–533, 2002.
10. Batis G., and Rakanta E"Corrosion of Steel Reinforcement Due to Atmospheric Pollution",Journal of Cement and Concrete Composite, Vol. 27, pp. 269 – 275, 2005.
11. 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.
12. Wall F. D., Martinez M. A., and Missert N. A., "Characterizing Corrosion Behavior Under Atmospheric Conditions Using Electrochemical Techniques", Journal of Corrosion Science, Vol. 47, pp. 17-32,2005.