

تأثير تركيز عسرة الكالسيوم على معدل تآكل أنابيب الماء المنزلي المصنوعة من الفولاذ المغلون

محمد حسين جعفر العظيمة

دائرة بحوث المواد - وزارة العلوم والتكنولوجيا

E-mail: mohammed57online@yahoo.com

خلاصة

أنابيب الفولاذ المغلون المادة الأساسية في تنفيذ شبكات توزيع الماء المنزلي في عموم العراق ولدراسة المتغيرات المؤثرة في تآكلها ، اشتمت علاقة رياضية لاحتساب تغير معدل تآكل هذه الأنابيب بدلالة تركيز الأوكسجين المذاب وسرعة الجريان ودرجة الحرارة بالاعتماد على أسس ومبادئ انتقال الكتلة والكيمياء الكهربائية ، ولغرض إضافة تأثير عسرة الكالسيوم إلى دلالة التغير لهذه العلاقة ، أجريت تجربة قياس معدل التآكل بأسلوب الجريان المستقيم داخل نماذج من أنبوب مغلون بقطر داخلي 18.5 ملم عند سرعة جريان تراوحت بين 0.18 و 1.12 م\ثا ولثلاث أنواع من الماء (عسر ومعتدل العسرة ويسر) ، بينت نتائج هذه التجربة أهمية عسرة الكالسيوم تبعاً لتركيزها في تثبط عملية التآكل لأكثر من خمسة أضعاف في الماء العسر مقارنةً لما عليها في الماء اليسر والحصول على علاقة أسية للنسبة بين معدل التآكل المحسوب نظرياً إلى المستحصل عملياً بدلالة تغير مقدار العسرة حيث أُدخلت هذه العلاقة كعامل تصحيح للدالة الرياضية المشتقة مما جعل دقت نتائج الاحتساب خلالها تصل إلى أكثر من 90% ، لتسهيل هذه العلاقة تفسير التفاوت في عمر الخدمة وتوقعه.

الكلمات المفتاحية : التآكل، تآكل أنبوب الفولاذ المغلون، سرعة الجريان، معامل انتقال الكتلة، عسرة الكالسيوم، الماء المنزلي.

المقدمة:

تستخدم الأنابيب الفولاذية المغلونة Galvanized steel pipes وملحقاتها في تنفيذ شبكات توزيع الماء للمنازل والأبنية السكنية في عموم العراق وهي عبارة عن أنابيب فولاذية مغطاة بطبقة من طلاء الخارصين تحد من تآكلها بألية الحماية الكاثودية Cathodic protection وتعتبر هذه الطبقة الأنود المضحى Sacrificial anode لحماية سطح الفولاذ الذي يتحول إلى كاثود، تستمر هذه الأنابيب بالتآكل حيث تطرح نواتج تآكلها عند السطح الداخلي وتنمو باتجاه مركزها مما يؤدي ذلك إلى تقليص مساحة مقطع الأنبوب وبالتالي تقليل ضغط الجريان وغالباً ما يؤدي نمو نواتج التآكل إلى الانسداد وإيقاف الجريان، كما يؤدي التآكل إلى حصول تحريف جدار الأنبوب وحصول

الثقوب في النقاط الضعيفة لينتهي بحصول تدفق الماء في هيكل البناء. أن الدراسات في مجال تآكل أنابيب توزيع الماء المنزلي قديمة وقد عثرنا على أقدمها والذي يمتد لعام 1918 [1] ، ولا زالت متواصلة [2,3] ، ولما لهذا الموضوع من أهمية اقتصادية طبقاً للدراسة المنجزة من قبل الجمعية الوطنية الأمريكية لمهندسي التآكل NACE [4] ، فإنه حظي بدائرة اهتمام كبيرة في مجمل دراسات تآكل أنابيب الرصاص [5] والنحاس [6,7] ولكن ليس بنفس الدرجة للأنابيب الفولاذية المغلونة ، ولعل السبب يرجع إلى حداثة استخدام هذه الأنابيب حيث أن في كندا مثلاً لم يُصرَح باستخدامها إلا في عام 1980 كبديل لأنابيب الرصاص الذي حُرِم استخدامها لديهم عام 1975 [8] وفي الولايات المتحدة الأمريكية لازالت 90% من شبكات التوزيع يُستخدم النحاس في تنفيذها بالرغم من مشاكله التآكلية [9-11] ، وفي العراق لم يُسجل لهذا القطاع دراسات وبحوث تخدم نشأته الممتدة من أيام الوالي حازم بك الذي أنشئ في بغداد مكنة إسالة للماء بمضخة نصبت على شريعة الميدان وتم إيصال الماء بالأنابيب للدور وكان ذلك عام 1907 [12] . في هذا المبحث يتم التركيز على استنباط دوال تصميمية لاحتساب تأثير تركيز عسرة الماء والأوكسجين المذاب وسرعة الجريان ودرجة حرارة على معدل تآكل أنابيب الفولاذ المغلون في الماء المنزلي.

الجانب النظري

طبيعة الماء التآكلية : من المعروف أن طبيعة الماء التآكلية للفولاذ المغلون تتغير بدلالة كمية العسرة ، هذا التغير يُحكم بتكوّن ترسبات طبيعية غير ذائبة نتيجة اتحاد الأملاح الذائبة المكونة للعسرة في الماء مع الخارصين لتكوين طبقة معتبرة من كاربونات الخارصين على السطح المغلون [13] أو ترسبها مباشرة [14] ، هذه الترسبات من الناحية العملية وجدت بعد التعرض لفترات طويلة تتكون من خليط كاربونات الكالسيوم والخارصين والحديد تعمل بمجملها على حجز السطح المغلون عن محيطه وبالتالي حمايته [15] . في هذا البحث استخدمت ثلاث أنواع من الماء بدرجات عسرة مختلفة للوقوف على دالة تؤثر علاقة واضحة لتغيير معدل التآكل بدلالة مقدار العسرة ، هذه الأنواع توضح كالاتي:

إن نسبة الأوكسجين المذاب في الماء تتغير تبعاً لدرجة الحرارة في نظام التجهيز المفتوح المعتمد في البيوت والمجمعات السكنية Open loop system وفق دالة موضحة في الشكل رقم (1) [13] ، فقد بينت الدراسات الحديثة [20] أن انتزاع الأوكسجين المذاب من ماء الشرب يقلل أيضاً من التآكل الكلفاني Galvanic corrosion بشكل كبير جداً نتيجة اختلاف مواد الصمامات المستخدمة مع الأنابيب المغلونة فضلاً عن التآكل العام General Corrosion، وهذا ما قد يحصل جزئياً في منظومة الماء الساخن المستخدمة في البيوت حيث يتم انتزاع الأوكسجين المذاب جزئياً نتيجة ارتفاع درجة الحرارة أثناء مرور الماء في السخانات المنزلية عبر أنبوب التنفيس المتصل بها ولغاية درجة حرارة 55°م بعدها يزداد التآكل بغير هذه الآلية بشكل سريع جداً ، كذلك بينت دراسة أخرى [21] تأثير واضح للأوكسجين المذاب في تحديد نسبة الحديد المتحرر للماء نتيجة عملية التآكل، ولغرض بلوغ دوال تساعد في احتساب معدل التآكل، تم اعتماد تركيز الأوكسجين المذاب البالغ 6.6غم/م³ والذي يقابل درجة الحرارة 35°م عند الدالة في الشكل رقم (1).

سرعة الجريان: تُعد سرعة الجريان من العوامل المؤثرة على معدل التآكل العام General Corrosion في منظومة تجهيز وتدوير الماء في المنازل والوحدات السكنية وقد يحدث بالآلية البلي Erosion - Corrosion إضافة إلى التآكل العام في المناطق التي تنشأ عندها اضطرابية جريان عالية إما نتيجة السرعة العالية للجريان أو التحول المفاجئ في اتجاهه [22] أو نتيجة انحسار مساحة مقطع الجريان إما بسبب ترسيبات نواتج التآكل أو لوجود خلل تنفيذي في مناطق الربط بين الأنابيب وملحقاتها، هذه الآلية هي الغالبة في التأثير باتجاه الفشل المبكر في الخدمة، ولغرض الوقوف على دالة تغير معدل التآكل بدلالة سرعة الجريان، فقد تم اختيار ستة سرع جريان خطية للماء Linear velocity تغطي حالات تدوير الماء خلال الخزان الرأسي المستخدم في البيوت ذات الطابق الواحد لغاية مبنى سكني مكون من ثلاث طوابق تمتد بين 0.18 و 1.12 م/ثا.

دوال احتساب معدل التآكل (CR): يُعرّف معدل التآكل لمعدن معين في وسط معين بمقدار الوزن المفقود لوحدة المساحة السطحية منه لوحدة الزمن ويمكن احتسابه عملياً وفق المواصفة القياسية ASTM G-1 بالوحدات (ملم/سنة) بفرض أن التآكل متجانس لعموم سطح النموذج وكما يلي [24, 23]:

◀ ماء عسر Hard water يحوي 200-500 ملغم/لتر (CaCO₃) بمعدل 392 ملغم/لتر.
 ◀ متوسط العسرة Moderate Hardness يحوي على 50-200 ملغم/لتر (CaCO₃) بمعدل 173 ملغم/لتر.
 ◀ ماء يسر Soft water يحوي على أقل من 50 ملغم/لتر (CaCO₃) بمعدل 33 ملغم/لتر.

درجة الحرارة: إن العلاقة بين درجة الحرارة وعملية التآكل ليست بالبسيطة حيث تؤثر في نوعية الماء بعدة اتجاهات ، كذوبانية الأوكسجين واللزوجة ومعدل الانتشار ومعامل التنشيط وطاقة التفاعل وذوبانية نواتج التآكل ومعدل الأكسدة [8]، وعلى العموم فإن معدل تفاعل الماء مع الخارصين والحديد عادةً يُعجل بزيادة درجة الحرارة حيث يتضاعف عند ارتفاع درجة الحرارة بمقدار 15°م ولغاية 65°م بعدها لا يُنصح باستخدام الغلونة لكون الخارصين عند حدود هذه الدرجة وبعدها يصبح أدائه كاثودياً مقابل الفولاذ [16-18]، هذه الظاهرة تفسر أن تآكل الأنابيب المستخدمة في الماء الحار يحصل بمعدل أسرع من المستخدمة في الماء البارد ، كذلك فإن ارتفاع درجة الحرارة يؤدي إلى ترسيب كربونات الكالسيوم على السطح وإن استمرار ترسبها يؤدي إلى انحسار مقطع الجريان. في هذا البحث سوف يُعتمد معدل لدرجة حرارة الماء 35°م لأغراض تجربة فحص نماذج من أنبوب الفولاذ المغلون بغية الوقوف على تغير معدل التآكل بدلالة نوع الماء وطبيعته التآكلية إذ أن هذه الدرجة تمثل المعدل على مدار فصول السنة .

تركيز الأوكسجين المذاب: تتم عملية التآكل في الأنابيب المغلونة الناقلة للماء بتفاعلين ، الأول أنودي وخلالها تتم عملية أكسدة ذرات الحديد وتحرير الإلكترونات والتفاعل الثاني الكاثودي وخلالها تستهلك الألكترونات المتحررة من التفاعل الأول لاختزال ذرات الأوكسجين المذاب في الماء وتكون جذر الهيدروكسيد وبذلك لا تتكامل عملية التآكل إلا بوصول الأوكسجين المذاب إلى سطح الأنبوب، ففي حالة تآكل الفولاذ المغلون يتكامل التفاعلين كالاتي [19]:

$O_2 + H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ Free oxygen+ water +electron→ hydroxide ions
التفاعل الكاثودي
$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ metallic iron → ferrous iron + electrons
التفاعل الانودي
$4Fe^{2+} + 3O_2 + 6H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3$ ferrous iron + Free oxygen → ferric hydroxide (insoluble)
نواتج التآكل

انتقالها بعيداً" عن السطح كنتاج لهذا التفاعل Equimolecular counter diffusion وبالتالي سيصبح تركيز الأوكسجين على السطح $C_{O_2S} = 0$ ، ففي هذه الحالة لم تعد حاجة لوجود المعدل اللوغاريتمي (C_{Bm} / C_T) حسب شرط جلتن وكولبيرن ، فعند التعويض في المعادلة (2) عن دلالة عدد ستانتون بالعلاقة رقم (3) تستحصل معادلة تغيّر معامل الانتقال الكتلي للأوكسجين المذاب K_{O_2} بدلالة عددي رينولد Re وشميت Sc وسرعة الجريان V وكالاتي:

$$K_{O_2} = 0.046 Re^{-0.325} Sc^{-0.67} V \quad \dots(4)$$

ولغرض إيجاد علاقة تربط تغيّر معدل التآكل بدلالة معامل الانتقال الكتلي للأوكسجين المذاب K_{O_2} المستحصل من العلاقة (4) ، يوضع اتجاهين لهذا الغرض توضح كالاتي:

الاتجاه الأول: كهروكيميائي لاحتساب معدل التآكل من خلال معرفة قيمة كثافة التيار الأنودي I_a المتمثل بأكسدة ذرات الحديد إلى أيونات الحديدوز ثم الحديدك حيث ستكون هذه القيمة مساوية لقيمة كثافة التيار الكاثودي I_c المتمثل باختزال الأوكسجين المذاب إلى أيونات الهيدروكساييد وهي ذاتها تمثل كثافة تيار التآكل I_{corr} والذي تم تعريفه بالمحدود لاتبعا" لمحدودية انتقال كتلة الأوكسجين المذاب إلى سطح الأنبوب حيث عنده تتم تفاعلات عملية التآكل أي إن:

$$I_a = I_c = I_{corr} = iL \quad \dots(5)$$

وبذلك يمكن الاعتماد على العلاقة التقليدية لقانون فردي Faraday's law [27] في احتساب معدل التآكل بدلالة كثافة التيار الكاثودي المحدود وفق العلاقة الآتية:

$$CR = A_{wtFe} i / Z_{Fe} \rho_{Fe} F \quad \dots(6)$$

إذ إن CR معدل التآكل ، A_{wtFe} الوزن الذري للحديد ، Z_{Fe} عدد الألكترونات المشتركة في التفاعل الأنودي ، ρ_{Fe} كثافة الفولاذ ، i كثافة التيار الكاثودي المحدود و F ثابت فردي.

الاتجاه الثاني: مبني على أسس انتقال الكتلة وفق مبدأ الانتشار Diffusion process ويعمل خلاله على احتساب قيمة تيار التآكل المحدود وفق قانون فك الأول Flick's first law [27] وبدلالة معامل انتقال كتلة الأوكسجين المذاب باعتبار إن معدل التآكل ، وكما مبين أنفاً ، محكوم بانتقال كتلة الأوكسجين المذاب من خلال انتشارها بمسار يبدأ من مركز الجريان وانتهاءً بسطح الأنبوب وهذا هو ذات مفهوم الاستقطاب التركيزي أحد آليات التآكل المعروفة في عملية التآكل Concentration polarization والذي يرتكز أساسه على تطبيقات عملية انتقال الكتلة بمبدأ الانتشار Diffusion

$$CR = \Delta W / \rho \cdot t \cdot A \quad \dots(1)$$

إذ أن ΔW الفقدان في وزن النموذج نتيجة التآكل (mg) ، A المساحة السطحية للنموذج ، t زمن التعرض ، ρ كثافة المعدن ، ولكون الأوكسجين المذاب في الماء الركن الأساس في عملية التآكل كونه يؤدي التفاعل الكاثودي في مجمل عملية التآكل ، فإن فيض انتقال كتلته Oxygen mass transfer flux من التركيز العالي في مركز الجريان باتجاه التركيز الواطئ على سطح الأنبوب الخطوة المحددة لسرعة عملية التآكل Rate determining step ولأجل ربط هذه الخصائص في انتقال كتلة الأوكسجين المذاب بالآلية الانتشار Diffusion mass transfer مع خصائص حركية جريان الماء في الأنبوب Hydrodynamics والتي تؤثر في عملية انتقال الكتلة ، تُستخدم مجاميع الأعداد اللابعدية Dimensionless groups في علاقة جلتن وكولبيرن للانتقال الكتلي Chilton&Colburn equation for mass transfer لتمثيل ذلك وكالاتي [25] :

$$j_d = (St) (C_{Bm} / C_T) Sc^{0.67} = 0.023 Re^{-0.2} \quad \dots(2)$$

إذ إن j_d معامل جلتن وكولبيرن لانتقال الكتلة ، Sc عدد شميت $(Sc = \mu / \rho D)$ ، Re عدد رينولد $(Re = d v \rho / \mu)$ ، St عدد ستانتون $(St = K_{O_2} / V_b)$ ، وأن ρ ، μ كثافة ولزوج الماء على التوالي ، d قطر الأنبوب ، D معامل الانتشار ، V_b سرعة الجريان الخطية في مركز الجريان والمنطقة المتاخمة لسطح الأنبوب على التوالي ، K_{O_2} معامل الانتقال الكتلي للأوكسجين المذاب ، ولكون منطقة الجريان المتاخم لجدار الأنبوب Boundary layer أكثر أهمية من الجريان خارجها باعتبارها محدده لانتقال كتلة الذرات والأيونات المشتركة في تفاعلات عملية التآكل ، فأن السرعة الخطية عند حدود هذه المنطقة تكون الحاكمة في احتساب عدد ستانتون ويمكن احتساب قيمتها بدلالة سرعة الجريان في مركز الجريان بتطبيق العلاقة التالية [26]:

$$V_b = 2V Re^{-0.125} \quad \dots(3)$$

أما العامل (C_{Bm} / C_T) فيعرف بالمعدل اللوغارتمي لتركيز المكون B والذي يمثل الأوكسجين المذاب في الماء ، إذ عند محدودية انتقال كتلة الأوكسجين باتجاه السطح سيحدد معدل التآكل بهذا المقدار من كتلة الفيض المنتقلة Limiting Oxygen mass transfer flux ، وأن هذا الفيض من جزيئات الأوكسجين سوف يُستهلك مباشرة على سطح الأنبوب في التفاعل الكاثودي بعدها تعكس هذه الكتلة

mass transfer في تحديد سرعة التفاعل وكالاتي:

$$i_1 = Z_{O_2} F K_{O_2} (C_{O_2b} - C_{O_2s}) / A_{wtO_2} \quad \dots(7)$$

إذ إن Z_{O_2} عدد الألكترونات المشتركة في التفاعل الكاثودي، K_{O_2} معامل انتقال كتلة الأوكسجين المذاب والذي يكافئ النسبة بين معامل الانتشار للأوكسجين المذاب D إلى سمك أو طول مسار الانتشار δ في قانون فك، C_{O_2b} تركيز الأوكسجين في مركز الجريان، C_{O_2s} تركيز الأوكسجين على سطح الأنبوب ($C_{O_2s}=0$)، A_{wtO_2} الوزن الذري للأوكسجين، وبتعويض العلاقة (7) في (6) نستحصل دالة لاحتساب معدل التآكل مبنية على الأسس في الاتجاهين أعلاه الكهروكيميائي وانتقال الكتلة وكالاتي:

$$CR = K_{O_2} C_{O_2b} (Z_{O_2} / Z_{Fe}) (A_{wtFe} / A_{wtO_2}) / \rho_{Fe} \quad \dots(8)$$

وبتعويض العلاقة (4) في (8) نحصل على علاقة شاملة لتغير قيم معدل التآكل بدلالة متغيرات التفاعلات الكهروكيميائية وانتقال الكتلة والهيدروداينميكية وكالاتي:

$$CR = 0.046 Re^{-0.325} Sc^{-0.67} V C_{O_2b} (Z_{O_2} / Z_{Fe}) (A_{wtFe} / A_{wtO_2}) / \rho_{Fe} \quad \dots(9)$$

ولغرض تبسيط حدود العلاقة في الدالة رقم (9) يتطلب تحديد أحد الخيارين التالية:

الأول: يعتمد نواتج للتآكل دائبة أي تكوّن هيدروكسيد الحديدوز والثاني: تكوّن هيدروكسيد الحديد غير القابل للذوبان في الماء إذ يعتمد ذلك بدرجة أكبر من الخيار الأول على وفرة الأوكسجين في الماء [17] وفيض الأوكسجين المنقل لسطح الأنبوب من مركز الجريان ذو التركيز العالي إلى سطح الأنبوب نو التركيز الواطئ، هذا الخيار سوف يعتمد باعتباره الحالة السائدة لعملية التآكل، عندها ستكون عدد مولات الحديد والأوكسجين المشتركة في التفاعلين الأنودي والكاثودي 4 و3 مول على التوالي وتبعاً لذلك تكون عدد الألكترونات المكافئة عند هذا التوازن 8 و12) راجع تفاعلات عملية التآكل في فقرة تركيز الأوكسجين المذاب)، كما إن قيم A_{wtO_2} ، A_{wtFe} تؤخذ 55.85 و16 على التوالي وكثافة الحديد 7880 كغم/م³ عندها ستقرأ الدالة في المعادلة (9) بعد تعويض هذه القيم كالاتي:

$$CR = 9.639 * 10^5 Re^{-0.325} Sc^{-0.67} V C_{O_2b} \quad \dots(10)$$

إذ أن CR و V و C_{O_2b} تكون بالوحدات ملم/سنة و م³/ثا و كغم/م³ على التوالي، فعند اعتماد قيمة واحدة لكل من درجة حرارة الماء وقطر الأنبوب، سيتغير معدل التآكل في العلاقة (10) بدلالة سرعة الجريان وفق دالة التغير الآتية:

$$CR \propto V^{0.675}$$

.....(11)

الجانب العملي

الشكل رقم (2) يبين مخطط توضيحي لمنظومة الفحص التي تعتمد مبدأ تدوير الماء خلال نماذج الفحص بواسطة مضخة سعة 35 لتر/دقيقة مرتبطه بخزان بلاستيكي مفتوح سعته 40 لتر، هذه المنظومة استخدمت في مبحث سابق لدراسة تأثير تكوّن طبقة الأوكسيد وسرعة الجريان على معدلات تآكل أنابيب النحاس [28]، إذ يتم تنظيم معدل الجريان خلال النماذج عبر صمام يوضع بعد كل نموذج وتحسب السرعة الخطية لجريان الماء خلال كل نموذج من العلاقة التالية:

السرعة الخطية = معدل الجريان / مساحة مقطع النموذج

وضعت نتائج الاحتساب في الجدول رقم (1) مقابل قيم عدد رينولد، حيث تشير إلى حدود الجريان المضطرب *Turbulent flow*، وبعد إجراء متطلبات تنظيف النماذج بغسلها بالصابون السائل وتجفيفها، يتم قياس أبعادها لاحتساب المساحة السطحية الداخلية ثم تثبيت وزن كل نموذج قبل التجربة ليقارن مع وزنه بعد التجربة مستخدمين ميزان الكتروني مايكروني حساسية قياسه 0.1mg (100 ميكروغرام)، ولأزلة نواتج التآكل بعد انتهاء التجربة يتطلب تنظيف النماذج كيميائياً "بمحلول هيدروكسيد الأمونيوم وفق حدود المواصفة القياسية ASTM G-1 / البند 1-5-7 وإيجاد مقدار الوزن المفقود جراء التآكل ثم احتساب معدله وفق البند X2 من نفس المواصفة [24] ولأجل توخي الدقة في النتائج تم إجراء الخطوات التالية:

◀ إدخال كل نموذج داخل أنبوب بلاستيكي قطره الداخلي مكافئ لقطر النموذج الخارجي وطوله ثلاث أضعاف طول النموذج الذي يبلغ 10-11 سم حتى لا يُسمح للماء بالتسرب على السطح الخارجي للنموذج.
◀ تحفيف السمك القياسي للنماذج بمقدار 5%± 2 ملم ليصبح 0.768 ملم للتخفيف من وزنه.

◀ استخدام دافعة صغيرة للهواء ربطت بموزع وضع داخل الخزان يتم تشغيلها قبل بدء التجربة بحدود الساعة لغرض تهوية الماء وتشبيعه بالأوكسجين.

◀ استخدمت منظومة للسيطرة على درجة الحرارة مؤلفة من مسخن بقدر 100 واط مع مسيطر للمحافظة على درجة الحرارة 35°م يعمل خلال فترة التجربة ذاتياً.

◀ استبدال مامجموعه 75% من الماء في الخزان أسبوعياً" لاحتمال تأثير تراكم تركيز لنواتج التآكل في الماء على دقة النتائج المستحصلة من التجربة، كذلك المحافظة على دالة حموضة الماء pH بمقدار يتراوح بين القيمتين 7 و8.

النتائج والمناقشة

$$CR_C = 4.351 \times 10^4 Re^{-0.325} Sc^{-0.67} V C_{O_2b} e^{0.0045H} CaCO_3 \quad \dots(13)$$

إذ أن CR_C معدل التآكل الحقيقي بالوحدات القياسية (ملم/سنة) وبذلك أصبح من الممكن احتساب معدل تآكل الفولاذ المغلون في الماء المنزلي بدلالة درجة الحرارة وسرعة الجريان وتركيز الأوكسجين المذاب ومقدار عسرة الكالسيوم وبالتالي تحديد عمر الخدمة وتفاوته لشبكات توزيع وتغذية الماء ، فبالمقارنة مع المتداول من دوال تآكل الفولاذ المغلون في الماء والتي تعتبر مؤشرات استدلالية كمؤشر لانكليير Langelier Index ومؤشر تاكلية الماء Water Corrosivity Index ومؤشر احتمالية التآكل Index Probability of Corrosion وغيرها التي لا ينتج عن مجملها إلا تصنيف لدرجة تاكلية الماء ووفق مقياس موضوع من قبل المصنف لهذه المؤشرات [24,30] ، فان العلاقة في المعادلة (13) تعتبر دالة تصميمية شاملة لعملية التآكل .

الاستنتاجات

- عسرة الكالسيوم في الماء مسؤولة تبعاً لتركيزها عن أظهار طبقة واقية تثبط عملية تآكل الفولاذ المغلون لأكثر من خمسة أضعاف في الماء العسر مقارنة لما عليها في الماء اليسر وبالتالي تزيد من عمر الخدمة للسطح المغلون خمسة أضعاف على الأقل.
- تركيز عسرة الكالسيوم H_{CaCO_3} وتركيز الأوكسجين C_{O_2b} المذاب وسرعة الجريان V ودرجة الحرارة عوامل تؤثر مباشرة على معدل تآكل الفولاذ المغلون في الماء المنزلي CR_C ، إذ إن دالة التغيير بين هذه العوامل تكون كالآتي :

$$CR_C \propto V^{0.675} \alpha C_{O_2b} \alpha e^{0.0045H} CaCO_3$$

- معرفة مقدار معدل التآكل في ظروف تشغيلية معينة CR_{C1} يؤدي إلى معرفتها في ظروف تشغيلية أخرى CR_{C2} من خلال توظيف دالة التغيير الموضحة في الفقرة السابقة وكما يلي:

$$(CR_{C1}/CR_{C2}) = (V_1/V_2)^{0.675} (C_{O_2b1}/C_{O_2b2})$$

$$\left(\frac{e^{0.0045H_1} CaCO_3}{e^{0.0045H_2} CaCO_3} \right)$$

- يزداد معدل التآكل لأكثر من ثلاث أضعاف عند زيادة سرعة الجريان بين القيمة 0.18 م/ثا ($Re=29666$) و 1.21 م/ثا ($Re=4413$) بغض النظر عن مقدار تركيز عسرة الكالسيوم في الماء .

الجدول رقم (2) و(3) و(4) تبين قيم معدل التآكل المستحصلة عملياً CR_{Exp} وفق حدود المواصفة القياسية ASTM G-1 عند كل سرعة جريان ولكل نوع من انواع الماء المستخدم في الفحص، العسر ومعتدل العسرة واليسر، إذ يلاحظ ازدياد المعدل بزيادة سرعة الجريان وانخفاضه بازدياد تركيز العسرة ، كما تعرض هذه الجداول أيضاً معدل التآكل المحسوب CR_{Cal} من خلال تطبيق العلاقة المشتقة رقم (10) مقابل كل سرعة جريان أيضاً، هذه القيم المحسوبة ، لا تعتمد على نوع الماء المستخدم في التجربة إذ أن هذه العلاقة المشتقة لا تحوي على متغير يُدخل تأثير نوع الماء إن كان عسر أو معتدل العسرة أو يسر كدالة لمعدل التآكل وإنما تعتمد هذه العلاقة على قيمة فيض انتقال كتلة الأوكسجين المذاب من التركيز العالي في منطقة الجريان الحر باتجاه سطح الأنابيب الداخلي عبر منطقة الجريان المتاخمة للسطح وعلى هذا الأساس فإن قيم معدل التآكل المحسوبة تكون أعلى من القيم العملية والتي ظهرت مثبتة نتيجة الحماية التي وفرتها الطبقة الكربوناتيية والأوكسيدية المتكونة على السطح المغلون بفعل وجود العسرة حسب تركيزها ونواتج التآكل والتي غالباً تتكون من هيدروكسي كلوريد الخارصين وهيدروكسيد الخارصين ، هذه النتيجة تتفق مع أحدث الاستنتاجات ذات الصلة بألية تآكل الفولاذ المغلون [29]، ولغرض تحديد مقدار هذا التثبيت ، تم احتساب المعدل الحسابي للنسبة بين القيمة النظرية والعملية المستحصلة لمعدل التآكل (CR_{Cal} / CR_{Exp}) المبينة في الجداول (2) و(3) و(4)، إذ بلغت قيمة المعدل الحسابي 129.8 و51 و25 لتجربة الماء العسر ومعتدل العسرة واليسر على التوالي وبنسبة حيود تقل عن $10 \pm$ وعند ربط تغير هذه القيم بدلالة مقدار تركيز عسرة الكالسيوم في الماء ، نحصل على دالة أسية التوافق وكما بينها الشكل رقم (3) ووفق العلاقة التالية والتي تكون عاملة فقط عند تركيز عسرة بمقدار أكبر من 33 ملغم/لتر ($H_{CaCO_3} > 33$):

$$(CR_{Cal}/CR_{Exp}) = 22.15 e^{-0.0045H} CaCO_3 \quad \dots(12)$$

إذ إن CR_{Cal} و CR_{Exp} معدل التآكل المستحصل عملياً والمحسوب عملياً على التوالي (ملم/سنة) وان H_{CaCO_3} تركيز عسرة الكالسيوم ($CaCO_3$) (ملغم/لتر) ، هذه النتيجة توضح الحاجة الى تصحيح العلاقة (10) حيث يزداد الحيود بين القيمة النظرية المستحصلة من هذه العلاقة والقيمة العملية بزيادة مقدار العسرة ، ويتعويض العلاقة في المعادلة رقم (12) في المعادلة (10) أعلاه تستحصل العلاقة الآتية :

- "Case Study: Preference Trade-Offs toward Home Plumbing Attributes and Materials, J. Water Resour. Plann. Manage, Vol.135, pp.237-243, 2009.
- [11] Lytle, D.A.; and Schock, M. R.; "Pitting corrosion of Copper in Waters with High pH and Low Alkalinity "; J Am Water Works Assoc, Vol.100, pp.115-129, 2008.
- [12] "حكايات أول إسالة ماء في بغداد", جريدة المدى العراقية، الاثنين ١-٢-٢٠١٠
- [13] Porter, F.;"Zinc Handbook - Properties, Processing and Use in Design"; Marcel Dekker, Inc; New York, 1991.
- [14] Grigg, N.; "Secondary Impacts of Corrosion Control on Distribution System and Treatment Plant Equipment"; Project 4029; Water Research Foundation, USA, 2010.
- [15] Carbucicchio, M.; Ciprian, R.; Ospitali, F.; Palombarini, G.;"Morphology and Phase Composition of Corrosion Products Formed at the Zinc-Iron Interface of a Galvanized Steel"; Corr. Sci., Vol. 50, pp.2605-2613, 2008.
- [16] Revie, R.W.; and Uhlg, H.H.; "Corrosion and Corrosion Control"; John Wiley & sons; New York, 2008.
- [17] Singly, J.E.; Beudet, B.A.; and Markey, P.H.;"Corrosion Manual for Internal Corrosion of Water Distribution Systems"; Prepared for, US. Environmental Protection Agency EPA, Report No. EPA 570/9-84-001, Washington, DC, 1984.
- [18] Hot Dip Galvanizers Association ;" Corrosion Control by Hot Dip Galvanized Steel in Water"; Hot Dip Galvanized Information, Not dated, Sheet No.6, South Africa.
- [19] Reid, R.C.; and Sherwood, T.K.; "The Properties of Gases and Liquids"; McGraw-Hill, New York, 3rd ed., pp.578, 1966.
- [20] Toshihiro, Y.;"Galvanic corrosion protective effect of the galvanized steel pipe by the film deaeration"; Technical Papers of Annual Meeting the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan, Vol.2, Pp.717-720, 2005.
- [21] Sarin, P.; Snoeyink, V.L.; Bebee, J.; Jim, K.K.; Beckett, M.A.; Kriven, J.A., and Clement, W.M.; "Iron Release From Corroded Iron Pipes in Drinking Water distribution Systems: Effect of Dissolved Oxygen"; Wat..Res., Vol.38, pp.1259-1269, 2004.
- [22] Keating, A.; and Nesic, S.; "Numerical Prediction of Erosion-Corrosion in Bends"; NACE International; Corr., Paper No.51, March 26-31, Orlando, FL, USA, 2000.
- [23] Fontana, M.G.; and Greene, N.D.; "Corrosion Engineering", McGraw-Hill, New York, 3rd ed., pp.8, 1986.
- [24] ASTM International; "Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test specimens", Standard G-1, 2003.

- تركيز الأوكسجين المذاب دالة لدرجة الحرارة في نظام التجهيز والتوزيع المفتوح للماء المعمول به في الدور والمباني السكنية في مدن العراق ، إذ يتناقص التركيز مع ارتفاع درجة الحرارة وفق الدالة في الشكل رقم (1) وبالتالي 'يُحجم مقدار معدل التآكل باعتبار أن $CR_C \propto \alpha$ وعالية فإن التصميم الصحيح والصيانة المستمرة لأنابيب التنفيس المنصوبة على السخانات المنزلية يضمن طرح الأوكسجين المتحرر من الماء بفعل ارتفاع درجة الحرارة خلالها إلى الخارج بما لا يتعدى 55°م وبالتالي سيدد ذلك من عملية التآكل .

المصادر

- [1] Not mentioned author's;"Pipe Corrosion in Domestic Service"; J Franklin Inst, Vol.185, pp.419, 1918.
- [2] Delaunois, F.; "Corrosion and Biocorrosion of Galvanized Steel Tubes Used in Water Distribution System"; 2nd International Conference of Corrosion and Material Protection, 19th - 22th, Prague, April 2010.
- [3] Ramírez, E.; Rios, J. F. ;Calderón, J. A.; Echeverría, F.; Penuela, G.;"Altration of the Drinking Water Quality by Different Metallic Materials Used in Distribution System"; Suppl. Latin Am. J. of Metal. Mater.; S1, pp.1443-1450, 2009.
- [4] NACE Study ;"Corrosion Costs and Preventive in the United state";Report by CC Technologies Laboratories Inc.; Prepard for ,Federal Highway Administration (FHWA); Report FHWA-RD-01-15b,2001.
- [5] Schock, M.R.; Hyland, R.N.; and Welch, M.M.;"Occurrence of Contaminant Accumulation in Lead Pipe Scales from Domestic Drinking-Water Distribution Systems"; Env. Sci. Tech., Vol.42, pp.4285-4291, 2008.
- [6] Broo A.E, Berghult B, Hedberg T.," Copper corrosion in drinking water distribution systems , the influence of water quality",Corrosion science,Vol.39, pp.1119-1132, 1997.
- [7] Taxén C, Letelier M.V., Lagos G.," Model for estimation of copper release to drinking from copper pipes", Corrosion,Vol.58,pp.267-277,2012.
- [8] "Guidance on Controlling Corrosion in Drinking Water Distribution System"; Environmental & Workplace Health; Health Canada Report, 2009.
- [9] Lee, J.; Kleczyk, E.; Bosch, D.; Tanellari, E.; Dwyer, S., and Dietrich, A.; "Case Study:Homeowner's Preference Trade-Offs towards Plumbing Systems in Pipe Failure Prone Area"; Proc.Water Res. Cong.Great Rivers,USA,2009.
- [10] Lee, J.; Kleczyk, E.; Bosch, D.; Tanellari, E.; Dwyer, S.; and Dietrich, A.;

[29] Hernandez-Alvarado L. A., Hernandez L. S., and Rodriguez-Reyna S. L.; "Evaluation of Corrosion Behavior of Galvanized Steel Treated with Conventional Conversion Coatings and a Chromate-Free Organic Inhibitor", International Journal of Corrosion, Vol.2012, Article ID 368130. 8, In press.

[30] Laurie, S. McNeill; "Water Quality Factors Influencing Iron and Lead Corrosion in Drinking Water"; PhD Thesis; Civil and Environmental Engineering; Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, USA, 2000.

[31] Defiance, J.N.; "Zinc and Zinc Lead alloys in Domestic Water"; Br. Corr.J. , Vol.17, pp.130, 1982.

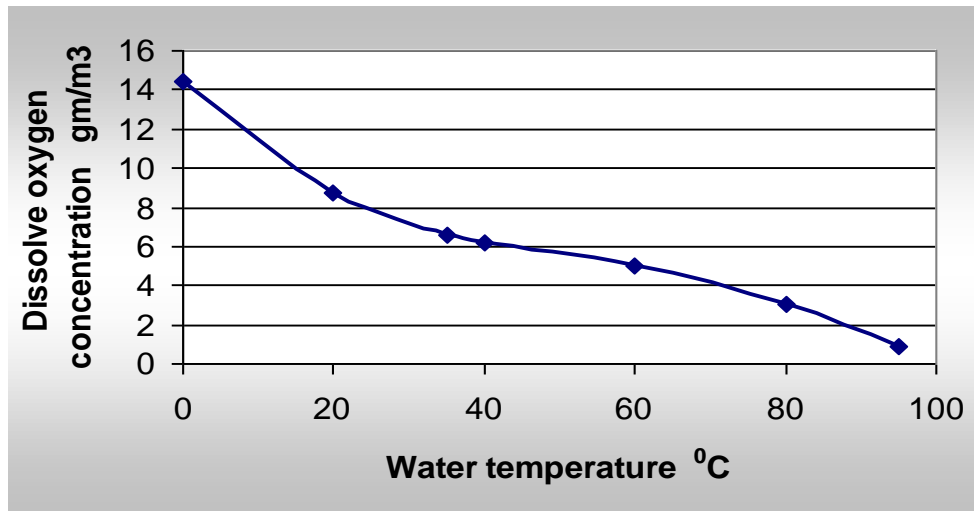
[32] Slunder, C.J.; and Boyd, W.K.; "Zinc: It's Corrosion Resistance"; Lead Zinc Research Organization, Inc, 2nd ed, New York., 1986.

[25] Coulson, J.; Richardson, J.; Backhurst, J.R.; and Harker, J.H.; "Chemical Engineering: Fluid flow, Heat transfer, and Mass transfer"; Elsevier Butterworth-Heinemann, London, 6th ed. pp.648, 1999.

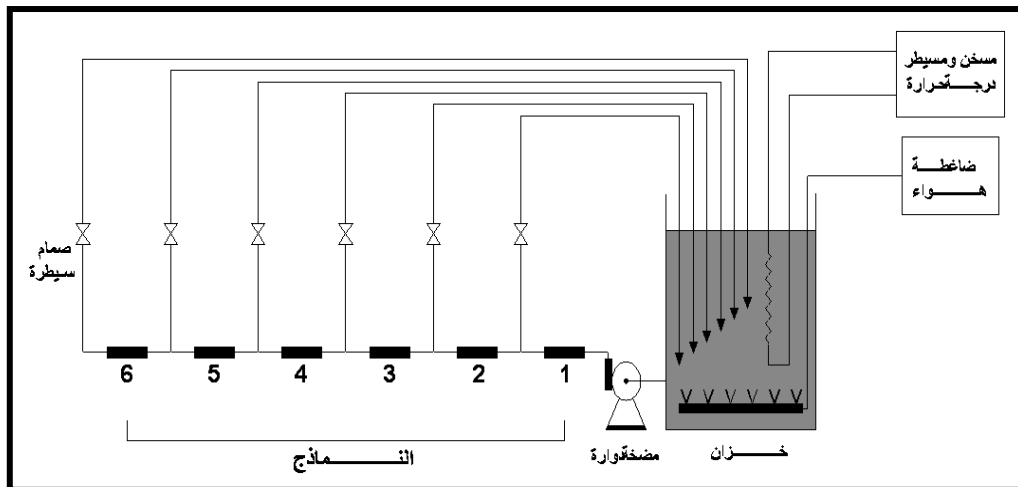
[26] Coulson, J.; and Richardson, J.; "Chemical Engineering"; Pergamon Textbook, London, Vol.1, 3rd ed., pp.321, 1984.

[27] Shreir, L. L.; "Corrosion"; Butterworth-Heinemann, London, Vol.2, 2nd ed., pp.2:8&21:63, 1979.

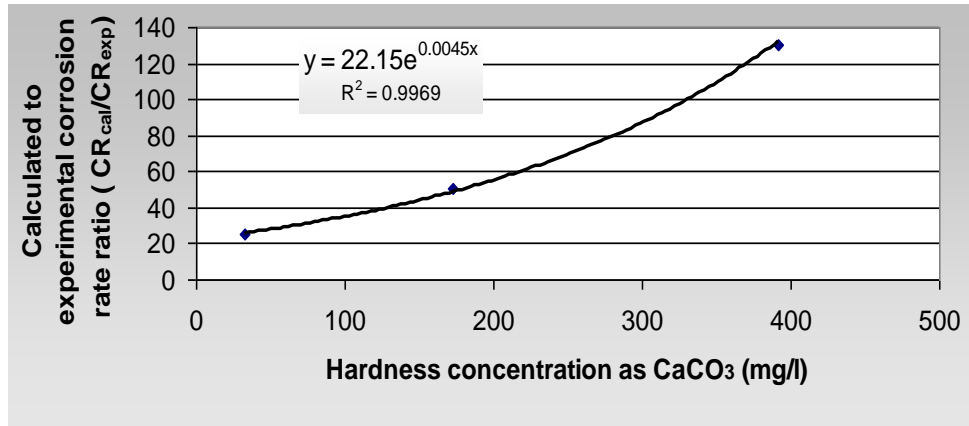
[28] Al-Atia, Mohammed Hussein J. , Kipikian Sarkes H.S., "Water flow velocity and oxide film formation effect on copper pipe corrosion", Journal of Baghdad for Science, Vol.9 (3), pp.431- 437, 2012.



الشكل رقم (1): تغيير تركيز الأوكسجين المذاب في الماء بدلالة درجة الحرارة [17].



الشكل رقم (2): يبين مخطط توضيحي لمنظومة الفحص المختبرية [28].



الشكل رقم (3): يبين دالة تغير القيم النظرية والعملية لمعدل التآكل بدلالة تركيز عسرة الكالسيوم في الماء.

الجدول رقم (1) : عدد رينولد مقابل سرعة الجريان عند درجة حرارة الماء 35⁰ م .

1.21	0.91	0.67	0.42	0.29	0.18	سرعة الجريان الخطية V (م/ثا)
994						كثافة الماء ρ (كغم/م ³)
0.750*10 ⁻³						اللزوجة μ (كغم.م/ثا)
0.0185						القطر الداخلي للنماذج d (م)
2.92*10 ⁻⁹						معامل انتشار الأوكسجين في الماء D (م ^٢ /ثا)
258.39						عدد شميت Sc
29666	22311	16427	10297	7110	4413	عدد رينولد Re

الجدول رقم (2) : تفاصيل احتساب النسبة (CR_{Cal} / CR_{Exp}) للماء العسر Hard water .

النسبة (CR _{Cal} / CR _{Exp})	معدل التآكل المحسوب من الدالة النظرية CR _{Cal} (10) (ملم/سنة)	معدل التآكل من التجربة العملية CR _{Exp} (ملم/سنة)	الزمن التراكمي للتجربة (ساعة)	مقدار الفقدان في وزن النموذج (غم)	المساحة السطحية للنموذج (سم ^٢)	سرعة الجريان (ملم/ثا)	ت
129.3	1.811	0.014	1548	0.120	59.88	0.18	1
131.5	2.499	0.019		0.168	61.63	0.29	2
139.5	3.210	0.023		0.191	58.14	0.42	3
122.1	4.399	0.036		0.341	66.54	0.67	4
122.9	5.409	0.044		0.382	62.27	0.91	5
133.7	6.556	0.049		0.422	61.63	1.21	6

الجدول رقم (3): تفاصيل احتساب النسبة (CR_{Cal} / CR_{Exp}) للماء معتدل العسرة Moderate Hardness

النسبة (CR _{Cal} / CR _{Exp})	معدل التآكل المحسوب من الدالة النظرية CR _{Cal} (10) (ملم/سنة)	معدل التآكل من التجربة العملية CR _{Exp} (ملم/سنة)	الزمن التراكمي للتجربة (ساعة)	مقدار الفقدان في وزن النموذج (غم)	المساحة السطحية للنموذج (سم ^٢)	سرعة الجريان (ملم/ثا)	ت
47.6	1.811	0.038	600	0.125	61.05	0.18	1
54.3	2.499	0.046		0.143	57.56	0.29	2
52.6	3.210	0.061		0.206	62.27	0.42	3
51.1	4.399	0.086		0.287	61.63	0.67	4
49.1	5.409	0.111		0.396	66.54	0.91	5
51.6	6.556	0.127		0.413	59.88	1.21	6

الجدول رقم (4) : تفاصيل احتساب النسبة (CR_{Cal} / CR_{Exp}) للماء اليسر Soft water .

النسبة (CR_{Cal} / CR_{Exp})	معدل التآكل المحسوب من الدالة النظرية (10) CR_{Cal} (ملم/سنة)	معدل التآكل من التجربة العملية CR_{Exp} (ملم/سنة)	الزمن التراكمي للتجربة (ساعة)	مقدار الفقدان في وزن النموذج (غم)	المساحة السطحية للمنموذج (سم ²)	سرعة الجريان (ملم/ثا)	ت
26.2	1.811	0.069	290	0.106	58.14	0.18	1
24.2	2.499	0.103		0.167	61.63	0.29	2
23.9	3.210	0.134		0.200	56.98	0.42	3
26.0	4.399	0.169		0.278	62.79	0.67	4
24.8	5.409	0.218		0.342	59.88	0.91	5

Effect of Calcium Hardness on Corrosion Rate of Domestic Water Galvanized Steel Pipes

Mohammed Hussein J. Al –Atia

Directorate of materials researches

Ministry of science and technology

E-mail: mohammed57online@yahoo.com

Abstract

Galvanized steel pipes are the main material in the implementation of domestic water distribution networks throughout Iraq. To study the variables affecting their corrosion, mathematical relationship for the calculation of corrosion rate was derived in terms of dissolved oxygen concentration, flow velocity and temperature based on the principles of mass transfer and electrochemistry , to add the effect of the calcium hardness to this relationship, experiments were conducted for measuring the corrosion rate in a straight 18.5 mm ID pipe flow of water at velocities ranged between 0.18 and 1.21 m/sec for three types of water (hard , moderate and soft). The results Shows the importance of calcium hardness on inhibiting corrosion process for more than five times in hard water compared to that in soft water also an exponential relationship between calculated to experimentally corrosion rate and calcium hardness concentration was obtained. Introducing this relationship as a correction factor for derived relationship sounded the accuracy of calculated corrosion rate results up to more than 90%.This relationship could expect and explain the disparity in the service life of these networks.

Key words: Corrosion, Galvanized steel pipe, Water velocity, Mass transfer coefficient, Calcium hardness, Domestic water.