

## دراسة مركبات التآكل على سطح انبوب نقل النفط السوري المغمور في التربة

فراس صالح\*

(تاريخ الإيداع 29 / 3 / 2016. قُبِلَ للنشر في 31 / 5 / 2016)

### □ ملخص □

عادة ما تحمي أنابيب النفط والغاز المغمورة بالتربة، بواسطة طبقة ثخينة من مواد عضوية بوليميرية، ويكتمل هذا الأجراء بحمايتها بنظام الحماية المهبطية. تسمح هذه الحميات المضاعفة بحماية انابيب النفط والغاز من التآكل. ولكن بالرغم من كل هذا، فإن وجود انابيب النفط والغاز القريبة من مصدر الحقول الكهرومغناطيسية، مثل خطوط التوتر العالي فإن عملية التآكل تحصل في الشقوق والثقوب الناشئة على طبقة العزل، تدعى هذه العملية التآكل بالتآكل المتناوب (AC Corrosion). يتأثر هذا النوع من التآكل ببعض البارامترات مثل مطال التيار المتناوب المحرض على سطح المعدن، بالإضافة الى شدة تيار الحماية المهبطية المطبق، وكذلك دور التربة ونوعها. تمت دراسة هذا النوع من التآكل نظريا وعمليا باستخدام قطع من الفولاذ الكربوني المستخدم في الصناعة النفطية. واستخدم محلول يحاكي التربة التي يطمر بها هذا الانبوب، ودرست هذه الظاهرة من خلال تجارب عدة. تم تحليل مركبات التآكل الظاهرة على سطح المعدن، وأظهرت ان تواتر 50Hz يمكن ان يكون سريعا جدا بالمقارنة مع زمن حدوث التآكل لطور الموجب و السالب بالنسبة للتيار المتناوب و أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها وجود تأثير هام لمطال التيار المتناوب المحرض ومقاومة التربة

**الكلمات المفتاحية:** التآكل، التيار المتناوب، تيار فاراداي، أنابيب مدفونة.

## A Study of the Corrosion Compounds on the Syrian Oil Pipelines Buried in Soil

Feras Saleh \*

(Received 29 / 3 / 2016. Accepted 31 / 5 / 2016)

### □ ABSTRACT □

Oil and gas buried pipeline are usually protected by a thick organic coating and supported by a cathodic protection system. The protection process allows the pipe line protection against corrosion; however, corrosion is taken place in the cracks and holes of insulation coating due to pipelines adjacency to electromagnetic fields. The

process is called AC corrosion affected by some parameters such as AC induced amplitude, cathodic current protection and soil type. This corrosion was theoretically and practically studied by using carbon steel pieces. In addition, a solution stimulating the soil where the pipelines are buried was used. This phenomenon was studied through several experiments. Corrosion compounds were also analyzed. The results revealed a significant effect of AC induced amplitude and soil resistance. It has been also shown that 50 Hz frequency can be very quick in comparison with corrosion occurrence time at each positive or negative AC current phase.

**Keywords:** AC corrosion, FaradayCurrent, buried pipelines.

---

\*Master- Physic Department- Faculty Science- Tishreen University- Syria

## مقدمة:

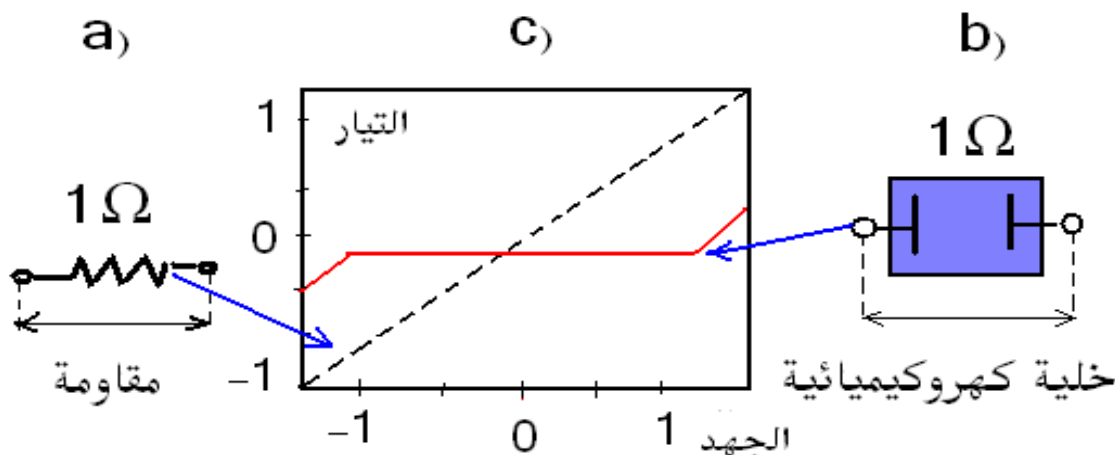
يعد تآكل المنشآت المعدنية المدفونة في التربة، من أكبر المشاكل الهندسية والاقتصادية وأكثرها انتشاراً في العالم، و يظهر ذلك جلياً من خلال التأثير الكبير لهذه المشكلة على تلك المنشأة، إن هذه المشاريع المعرضة للتآكل تشمل الآلاف الكيلومترات من خطوط أنابيب نقل الغاز الطبيعي ، وإل نفط الخام ، والمنتجات البتروكيميائية، وكذلك خطوط أنابيب نقل المياه المحلاة، بالإضافة إلى منشأة أخرى تحت سطح الأرض كالخزانات الأرضية المعدة لأغراض التخزين وخطوط نقل الاتصالات المحلية والدولية بالإضافة إلى شبكات توزيع مياه الشرب[1].

إن مشاكل التآكل هي التي تظهر في أنابيب النفط والغاز المغمورة، لهذا فإن شركات النفط أولت أهمية بالغة لدراسة التآكل وكيفية الوقاية منه، فأنابيب النفط والغاز تُحمى عادةً عن طريق تغليفها بطبقة عازلة (بولوميرية) من جهة، وعن طريق تطبيق حماية مهبطية من جهة أخرى، يتلخص دور طبقة الحماية بإنشاء حاجز فيزيائي يمنع وصول الإلكتروليت إلى معدن الأنبوب، بالإضافة إلى عزل الأنبوب كهربائياً. لكن وبسبب عمليات التركيب والإجهادات التي تصيب هذه الأنابيب نتيجة الظروف الأرضية ومع الزمن، فقد يحدث أن تتواجد على سطوح هذه الطبقة تشققات وثقوب تؤدي إلى نفاذ الإلكتروليت إلى معدن الأنبوب، وبالتالي إلى تآكل هذا المعدن في مناطق التماس المباشر مع الوسط المحيط. لهذا لا بد من إجراء مكمل لحماية هذه الأنابيب، ويتجسد هذا الإجراء بتطبيق تقنية الحماية المهبطية[2].

ولكن وعلى الرغم من هذين الإجراءين (الطبقة العازلة، الحماية المهبطية )، فإن وجود هذه الأنابيب مغمورة بقرب شبكات التوتر العالي، يجعلها عرضة لتأثير الحقول الكهروستاتيكية المنبعثة من هذه الأسلاك والتي تحرض نشوء تيار متناوب على سطح الأنبوب في منطقة التماس المباشر بين معدن الأنبوب والتربة، وهي منطقة تشققات أو عيوب في طبقة الحماية لهذا الأنبوب، إن هذا التيار المتناوب يسرع التآكل على سطح هذا الأنبوب مما يؤدي إلى تخريبه مع مرور الزمن، وهذا التهديم التآكلي يمكن أن يتحقق خلال زمن قليل. إن هذا النوع من التآكل يُسمى التآكل بالتيار المتناوب (AC CORROSION) [3].

1 ± - جهد فاراداي: تعتبر الجملة المؤلفة من انبوب نقل النفط أو الغاز المغمور في التربة والوسط

المحيط به من طبقة عازلة وتربة متنوعة جملة لاخطية، يوضح الشكل (1) علاقة الجهد والتيار لجملة خطية وجملة لاخطية[4].



الشكل (1): الاختلاف في العلاقة بين الجهد و التيار : (a) جملة خطية (مقاومة صرفة)، (c)

جملة لاخطية ، (b) خلية كهروكيميائية

أي عندما نطبق جهد دخل متناوب  $V_{in}=V_0\cos\omega t$  على جملة لا خطية نحصل على جهد خرج لا خطي  $V_{out}$  يمكن الحصول على حدوده بواسطة نشر سلسلة تايلور لجهد الدخل:

$$V_{out} = a_0 + a_1V_{in} + a_2V_{in}^2 + a_3V_{in}^3 + \dots \quad (1)$$

حيث تعطى معاملات تايلور  $a$  كما يلي:

$$a_0 = V_{out}|_{V_{in}=0} ; \text{ DC output} \dots \dots \dots (2)$$

$$a_1 = \left. \frac{dV_{out}}{dV_{in}} \right|_{V_{in}=0} ; \text{ linear output} \dots \dots \dots (3)$$

$$a_2 = \left. \frac{d^2V_{out}}{dV_{in}^2} \right|_{V_{in}=0} ; \text{ squared output} \dots \dots \dots (4)$$

يعبر الحد الثابت  $a_0$  عن التقويم، أي تحويل إشارة الجهد المتناوب إلى جهد مستمر DC. ويلعب الحد الخطي مع العامل  $a_1$  دور المخذم أو دور المضخم حسب إشارة المشتق: ( $a_1 > 1$ ) amplifier ; ( $a_1 < 1$ ) attenuator.

ويعبر الحد التربيعي عن مساهمة المزج، وذلك حسب اتجاه تقعر المشتق الثاني للإشارة [5].

عندما نبدل صيغة جهد الدخل في حدود سلسلة تايلور نحصل على الحدود التالية لجهد إشارة الخرج:

$$V_{out} = (a_0 + \frac{1}{2}a_2V_0^2) + (a_1V_0 + \frac{3}{4}a_3V_0^3) \cos\omega t + \frac{1}{2}a_2V_0^2 \cos 2\omega t + \frac{1}{4}a_3V_0^3 \cos 3\omega t + \dots (5)$$

يدعى الحد الثابت في هذه النتيجة بجهد فاراداي، وتلعب إشارة المعامل  $a_2$  دوراً مهماً في ازاحة قيمة هذا الجهد إيجاباً وسلباً. ومن هنا يأتي تأثيره على جهد الحماية المهبطية لأنبوب نقل النفط، أي يمكن أن ينقله باتجاه الإيجابية أو السلبية حسب قيمة المعامل  $a_2$  [6].

**2-1- الدارة المكافئة للجملة اللاخطية:** عند تعرّض الجملة (انبوب - تربة) إلى الحقل الكهربي المتولد عن

خطوط التوتر العالي بالقرب منها، فإن معادلة مكسويل لدوار الحقل المغناطيسي  $H$  ترتبط مع الحقل الكهربي  $E$  بواسطة بارامترات الجملة ( السماحية الكهربائية  $\epsilon$ ، والنفاذية المغناطيسية  $\mu$ ، والناقلية الكهربائية  $\sigma$ ، والمسامحة  $Y$ ) [7]:

$$\nabla \times \bar{H} = [(\sigma + \omega\epsilon'') + i\omega\epsilon'] \bar{E} ; i^2 = -1 \dots \dots \dots (6)$$

$$Y = (\sigma + \omega\epsilon'') \cdot \Delta L + i\omega\epsilon' \cdot \Delta L ; \Omega^{-1} \dots \dots \dots (7)$$

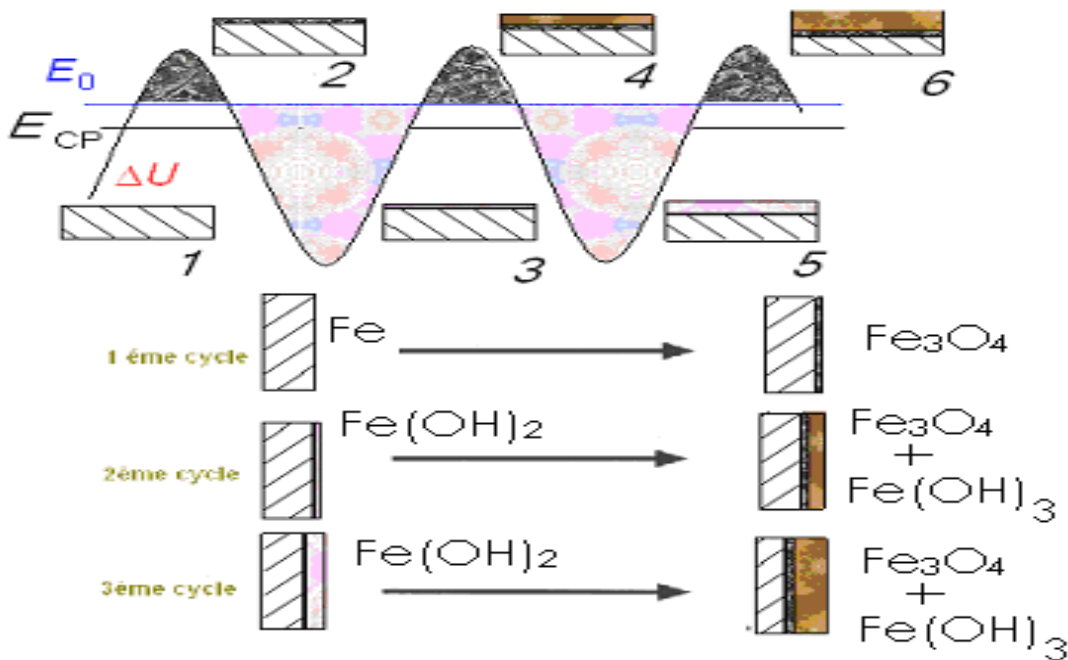
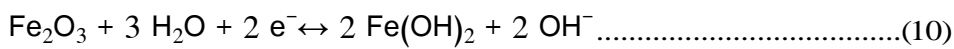
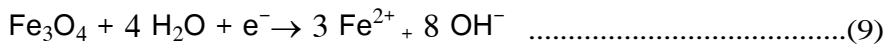
ويمكن النظر إلى الكميات داخل القوسين المتوسطين على أنها مكوّنات الدارة المكافئة التفرعية لوحدة طول من الوسط  $\Delta L$ . تكتب السماحية الكهربائية في الاوساط الفاقدة بشكل عقدي [7]:

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon'' \dots \dots \dots (8)$$

يمثل القسم الحقيقي في معادلة الدوار السابقة مجموع توصيلية الجملة (Conductance) التي تعكس الفقد الناتج، والفقد الناتج عن الوسط العازل للجملة على الترتيب، بينما يعبر القسم التخيليين تفاعلية الجملة (Reactance) أي مقدرة الجملة على تخزين الطاقة الكهربائية.

### 1-3-آلية التآكل بواسطة المرور المتكرر للتيار المتناوب بين المنطقة الانودية والكاثودية[8]:

إن هذه الآلية مقترحة بواسطة Büchler والتي تحاول شرح آلية هذا التآكل ، و تعتمد على مبدأ الانتقال المتناوب بين أكسدة المعدن في (نصف طور التيار الموجب) و بين إرجاع مركبات التآكل في (نصف طور التيار السالب). فعندما تكون سعة كميون التيار المتناوب المحرض على سطح معدن الأنابيب  $E_{AC}$  أكبر من قيمة كميون الحماية المهيبة  $E_{CP}$ ، فإن التيار المتناوب المار على سطح المعدن يمر بطورين طور موجب و طور سالب. ففي الطور الموجب للتيار فإن الحديد يتأكسد وتتشكل بوجود الأوكسجين و في وسط معتدل أو خفيف القلوية، طبقة من مركبات التآكل الخاملة  $Fe_2O_3, Fe_3O_4$ ، التي تغطي سطح المعدن، بالمقابل وفي طور الموجة السالبة تُرجع هذه المركبات لتشكيل هيدروكسيد الحديد.



الشكل(2): شرح التآكل بالتيار المتناوب حسب Büchler

في الطور الموجب الثاني تتشكل مركبات جديدة للتآكل  $Fe_3O_4$  في الطبقة الداخلية و تتأكسد طبقة  $Fe(OH)_2$  إلى  $Fe(OH)_3$  لا تلبث أن تُرجع حسب المعادلة السابقة، وهكذا فإن طبقة من هيدروكسيد الحديد تزداد مع الزمن، و حيث أن هذا المركب هو مسامي و منحل في الماء ، وبالتالي عملية تآكل المعدن مستمرة مع الزمن. إن التأكد من هذه الآلية يتطلب تحليلاً لمركبات التآكل أثناء تطبيق تيار متناوب على سطح المعدن باستخدام تقنيات قادرة على إعطاء نتائج سريعة مثل (Raman Spectroscopy) .

**أهمية البحث وأهدافه:**

أن أهمية البحث تكمن بالمساهمة فيما يمكن أن تواجهه الصناعات النفطية، من مشاكل ناتجة عن التآكل بالتيار المتناوب، والاهتراء الذي يلحق بمنشآتها والمعدات المستخدمة فيها، نتيجة لظروف العمل والظروف المحيطة فيها، وقربها من مصادر التوتر العالي. لذلك فإن هدف هذه الدراسة هو تسليط الضوء على إحدى النظريات المعتمدة على نظرية Büchler والتي تحاول شرح آلية هذا التآكل، والتي تعتمد على مبدأ الانتقال المتناوب بين أكسدة المعدن في (نصف طور التيار الموجب) وبين إرجاع مركبات التآكل في (نصف طور التيار السالب).

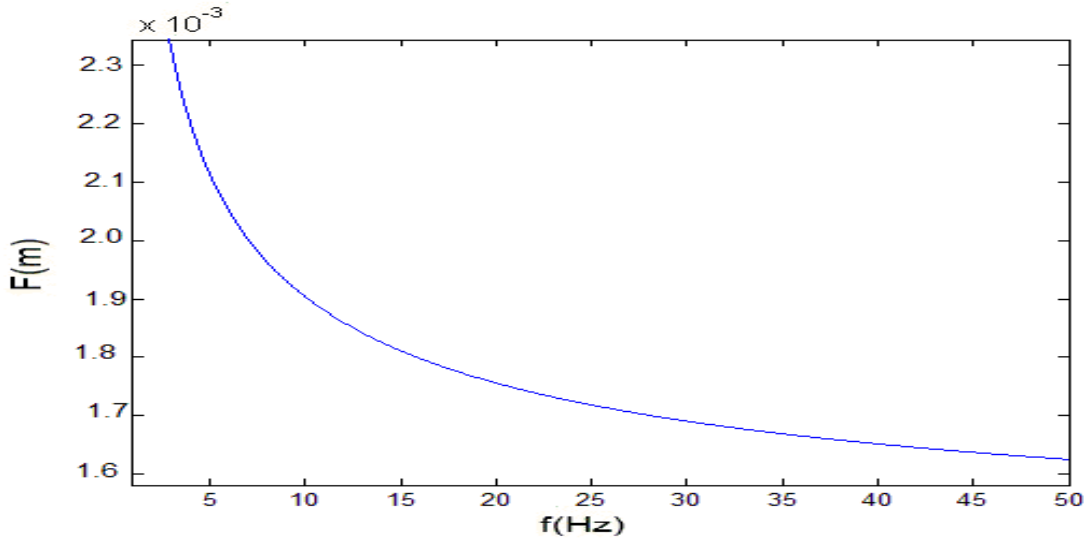
**طرائق البحث ومواده:**

في هذا البحث استخدمنا محاكاة مخبرية، باختيار عينة محضرة من أنبوب فولاذ الكربوني محاط بمحلول الكبريتي يشبه محلول التربة المحيط بالأنبوب في المنطقة الواقعة تحت خط التوتر العالي. علاوة على ذلك، طبقنا على الجملة جهداً متناوباً تردده من مرتبة التردد المستخدم في خطوط التوتر العالي. تم اختبار سطح العينات المحضرة باستخدام تقانة المجهر الإلكتروني الماسح SEM من إنتاج شركة كوانتا الأمريكية الذي يتميز بقوة تكبير عالية جداً تصل إلى أكثر من نصف مليون مرة، ويرجع السبب في ذلك إلى استخدام أشعاع إلكتروني عبارة عن حزمة من الإلكترونات عالية الطاقة ذات طول موجي قصير جداً في حدود  $0.0068\text{nm}$ . وتم أيضاً استخدام تقانة مطيافية رامان لدراسة مركبات التآكل على سطح العينة. يستخدم في هذه التقنية ضوء ليزر هليوم نيون ذي الطول الموجي  $632.8\text{nm}$  باستطاعة قدرها  $25\text{ mW}$ ، وتم تخفيض استطاعة الليزر المستخدم إلى  $0.24\text{mW}$  لحماية سطح العينة [9].

**النتائج والمناقشة:****1- عمق التوغل في سطح الأنبوب ضمن المجال الترددي (1 - 50) Hz:**

قبل البدء في دراسة تأثيرات الحقول الكهربائية سنسلط الضوء على تأثير عمق تفاعل الحقل الكهربائي على سطح الأنبوب. تعطى العلاقة التي تصف عمق التوغل، والمقاومة النوعية للأنبوب المستخدم بالعلاقة الرياضية التالية [10].

يوضح الشكل (2) مقدار التوغل F على سطح أنبوب النفط للترددات الواقعة بين [9] Hz (1 - 50).



الشكل(2):مقدار التوغل ضمن انبوب النفط للترددات الواقعة بين (1 - 50) Hz

يوضح الشكل 2 عمق التوغل ضمن الانبوب وعلاقته بالتردد المطبق تبين من خلال المخطط أن هنالك علاقة تناسب عكسي بين التردد المطبق وبين وعمق الاختراق بمعنى أنه كلما ازداد التردد كلما كانت قدرة التيار على اختراق الأنابيب الفولاذ أقل، و بما أن خطوط النقل تُمد في الجو فوق سطح الأرض، وبالتالي لا بد لنا من عرض ميزات الهواء، والأرض والأنبوب للإشارات الكهرومغناطيسية: السماحية  $\epsilon$  والناقلية  $\sigma$  الكهريائيتين والنفاذية المغناطيسية  $\mu$ ، جدول 1:

جدول 1: يتضمن الناقلية الكهربائية والسماحية الكهريائية والنفاذية المغناطيسية للهواء والأرض وأنبوب النقل.

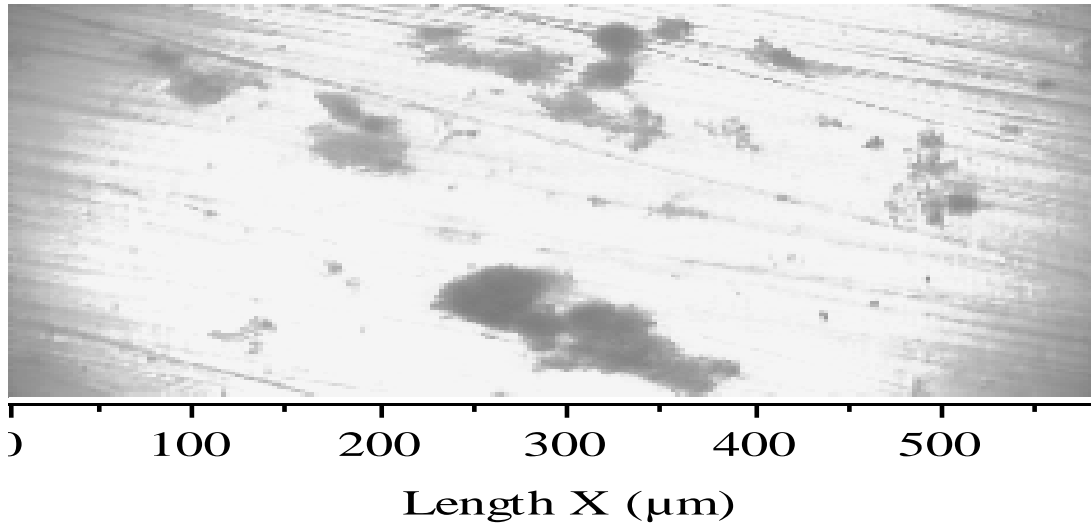
media	Air	Earth	Pipeline
$\epsilon$ [F/m]	$8.845 \times 10^{-12}$	$\epsilon$	$\epsilon$
$\mu$ [H/m]	$4\pi \times 10^{-7}$	$\mu$	$\mu$
$\sigma$ [S/m]	0	0.4	$7.69 \times 10^7$

اضحى السؤال المهم، هل نظرية التآكل بالتيار المتناوب صحيحة عند قيم التردد العالي للتيار المتناوب؟ للإجابة على هذا السؤال قمنا بإجراء عدة تجارب مكملة على قطع الفولاذ الكربوني المستخدم والمغمور في محلول ذي ناقلية تحاكي ناقلية التربة الرطبة، قمنا بإجراء التجربة باستخدام منبع للترددات يعطي تردد بين (1Hz-400Hz). طبقنا تردد مقداره 1Hz، فوجدنا أن هذه النظرية صحيحة حيث يتأكسد المعدن في نصف الموجة الموجب، ويرجع في نصفها السالب، وهذا ما يدل أن تردد 50 Hz هو سريع جداً من الناحية الحركية (Kinetic state) ليقوم بفعل واضح في كل نصف موجه سالب أو موجب.

لتقييم هذه النظرية استخدمنا تقنية RAMAN لاكتشاف مركبات التآكل الناتجة على سطح المعدن. في الحقيقة كل التجارب التي أجريت أشارت إلى النتائج التالية:

عند وجود التآكل فإن أول مركب للتآكل هو الصدأ الأخضر (green rust) [12,11] المعروف بأنه مركب من هيدروكسيد الحديد الثنائي غير منحل في الماء، وهو حساس تجاه الهواء والرطوبة، حيث يتأكسد أولاً إلى مزيج من

هيدروكسيد الحديد الثنائي، وهيدروكسيد الحديد الثلاثي، ويكون هذا المزيج ذو لون متدرج من اللون الرمادي المخضر إلى الأخضر الداكن حتى تصل إلى تمام الأكسدة وإلى الشكل الثابت من أكسيد الحديد ذي اللون البني المحمروله الصيغة الكيميائية  $[Fe^{2+}_{1-x}Fe^{3+}_x(OH)_2]^{x+} \left[ \frac{x}{n} A^{n-} \cdot \frac{m}{n} H_2O \right]^{x-}$  وتتشكل قمتين موافقتين لتشكل مركبات الصدأ الأخضر، وهذا يعني، أن كمية الكهراء الموجبة في البداية تستخدم لأكسدة الحديد إلى الصدأ الأخضر، وكمية الكهراء في الاطوار اللاحقة تستخدم لأكسدة وإرجاع الحديد الثنائي من وإلى الحديد الثلاثي. ويكون الصدأ الأخضر على شكل بقع صغيرة موزعة على أرجاء سطح المعدن، وليس بشكل طبقة متجانسة كما تقول نظرية Büchler، كما تظهره الصور المأخوذة بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح الشكل (3)، وعند التحليل بمطيافية رامان، أظهر الطيف تشكل قمتين موافقتين لتشكل مركبات الصدأ الأخضر الشكل (4).



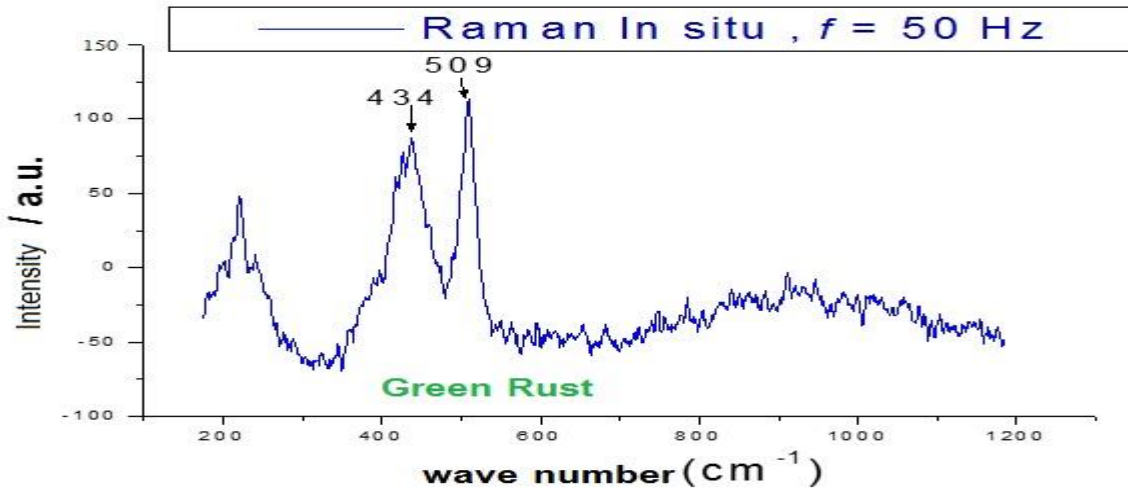
الشكل (3): صورة المجهر الماسح الإلكتروني SEM لسطح عينة الفولاذ

وهذا يتفق مع بعض الدراسات حول اطوار تآكل الحديد، جدول 2:

جدول 2: أطوار تآكل الحديد.

iron phases	Ledicrocite $\gamma$ - FeOOH	; Geothite $\alpha$ - FeOOH	Akaganeite $\beta$ - FeOOH
Bands in cm <sup>-1</sup>	225	434	509





الشكل(4): طيف Raman لعينة الفولاذ الكربوني المحضرة

### الاستنتاجات والتوصيات :

نستنتج من هذه الدراسة النقاط التالية :

1. إن المعامل الزمني للإشارات ذات التردد 50Hz اللازمة لدراسة التآكل بالتيار المتناوب هو 0.02sec عبارة عن زمن سريع بالمقارنة مع تردد الإشارات المنخفضة مثل 1Hz أو 2Hz.
2. بيّن العالم Büchler أن التآكل موجود عند التردد 50Hz وأن التآكل يتم عبر تشكل طبقة متجانسة على عكس النتائج التي توصلنا إليها عند تطبيق إشارات بتردد 1Hz. لم نلاحظ تشكل طبقات متجانسة وإنما تشكل بقع صغيرة وموزعة على سطح العينة باستخدام SEM.
3. تعود الحزم الموجودة في الطيف حسب المراجع إلى اطوار الحديد التالية: (  $\gamma$ -FeOOH Leducrocity  $225 \text{ cm}^{-1}$  ) ;  $\alpha$ -FeOOH Geothite  $434 \text{ cm}^{-1}$  ) ;  $\beta$ -FeOOH Akaganeite  $509 \text{ cm}^{-1}$  )

### المراجع

- [1] قحطان خلف الخزرجي، عبدالجواد محمد الشريف-التآكل أسبابه-أنواعه-طرق الحماية. دار دجلة 2010.500.
- [2]. كاظم عباس الموسوي - التآكل- منشورات ELGA 2000. 467.
- [3]. ADEL, A, *Corrosion and its Protection Methods*, 2010.651.
- [4]. IBRAHIM, I., BERNARD, T., HISASU, T., MICHEL, M. *AC-Induced Corrosion of Underground Steel Pipelines. Faradaic Rectification under Cathodic Protection*, 2015.
- [5]. I. IBRAHIM, M. MEYER, B. TRIBOLLET, H. TAKENOUTI, S. JOIRET, S. FONTAINE AND H.-G. SCHÖNEICH, *On the Mechanism of AC Assisted Corrosion of Buried Pipelines and Its CP Mitigation*, 2008.
- [6] IBRAHIM, I, TAKENOUTI, H., TRIBOLLET, B., FONTAINE, S., FRANCE, P., SCHÖNEICH, H.-G., *Harmonic Analysis Study of the AC Corrosion of Buried Pipelines Under Cathodic Protection*, NACE Conference, 2007.

[7].د. محمد كامل عبد العزيز، د. مجيد عبد الرحمن الكنهل، *الكهرومغناطيسية الهندسية*، جامعة الملك

سعود 2005.716.

[8].M. BÜCHLER, H.-G. SCHÖNEICH, F. STALDER, "*Discussion of Criteria to Assess the Alternating Current Corrosion Risk of Cathodically Protected Pipelines*", Joint technical meeting on pipeline research, USA (2005).

[9] DAVID M. POZAR, *Microwave Engineering*, Fourth Edition, John Wiley&Sons, Inc.,2011

[10].TADEUSZ MICHALOWSKI, *Applications of MATLAB in Science and Engineering, InTech* , 2011.

[11].SIMON, L., FRANCOIS, M., REFAIT, P., RENAUDIN, G., LELAURAIN, M. AND GENIN, J.-M.R. *Structure of the Fe(II-III) layered double hydroxysulphate green rust two from rietveld analysis*. Solid State Sciences, 2003.

[12].ZEGEYE, A., RUBY, C. AND JORAND, F.*Kinetic and thermodynamic analysis during dissimilatory  $\alpha$ - FeOOH reduction: Formation of green rust 1 and magnetite*. 2007 .