

استخدام التخثير الكهربائي في منظومة تحلية مياه البحر*

م. شيرين قبرطاي**

د. نورّت النبغلي****

أ.د. عبد الحكيم بنود***

الملخص

تعدّ مشكلة سُحّ المياه العذبة من أهمّ العقبات التي تواجه استراتيجيات التطوير الزراعي والصناعي عربياً وعالمياً، حيث يمتدّ وطننا العربي على مساحات واسعة جافة وشبه جافة، ويفتقر في معظمه إلى مصادر المياه العذبة، لذلك فقد أصبح اللجوء إلى خيار إزالة ملوحة مياه البحر (التحلية) أمراً حتمياً لسدّ العجز المائي، خاصةً بوجود الشريط الساحلي الممتد على طول معظم البلدان العربية، فمياه البحر المُحلّاة تعدّ مصدراً متجدداً للمياه العذبة.

إلا أن آليّة إزالة الملوحة (التحلية) تتطلب إجراء معالجة تمهيدية للمياه بهدف خفض قيمة العسارة الكلية والـ pH، للحيلولة دون تشكّل الترسّبات الملحية المُعيقة للتقانات الحرارية والغشائية.

درُسَتْ في هذا البحث إمكانيّة استخدام التخثير الكهربائي كمعالجة تمهيدية كهركيميائية لخفض كل من العسارة الكلية والـ pH، وقد بيّنت النتائج أن استخدام 8 صفائح ستانلس ستيل مع نظام ثنائي القطبية بشدّة تيار 5 أمبير، وزمن مكوث في مفاعل التخثير 15 دقيقة، وزمن ترسيب لاحق 3 ساعة، قد خفّض العسارة الكلية بنسبة 41.6%، والـ pH من 8.10 إلى 6.22 دون الحاجة لأي إضافة حمضية.

الكلمات المفتاحية: إزالة ملوحة مياه البحر، التخثير الكهربائي، خفض الـ pH، إزالة العسارة الكلية.

* أعد هذا البحث في سياق رسالة الدكتوراه للمهندسة م. شيرين قبرطاي بإشراف أ.د. عبد الحكيم بنود ومشاركة . نورّت النبغلي

** قسم الهندسة البيئية - كلية الهندسة المدنية - جامعة حلب

*** قسم الهندسة البيئية - كلية الهندسة المدنية - جامعة حلب

**** قسم الهندسة البيئية - كلية الهندسة المدنية - جامعة حلب

1. المقدمة:

تفصل عملية إزالة الملوحة (التحلية) مياه البحر إلى تيارين: عذب ومالح، وتتطلب بعض أشكال الطاقة، حيث تستعمل تقانات مختلفة لهذا الفصل، أهمها وأكثرها رواجاً التقانات الحرارية والغشائية خاصة التناضح العكسي RO، وخلال العقدين المنصرمين كان هناك تطور كبير في عمليات إزالة الملوحة (التحلية)، مما أدى إلى خفض الكلفة بشكل ملحوظ، ونمو هذه الصناعة حول العالم، ولاسيما المناطق الجافة [1].

ويعتمد تصميم محطات إزالة ملوحة مياه البحر وتشغيلها بالتناضح العكسي (SWRO) اعتماداً كبيراً على نوعية مياه البحر الخام ومواصفاتها، مما يجعل عمليات المعالجة التمهيدية العالية المستوى من القضايا الحساسة والمهمة في تحسين أداء منظومة الـ SWRO، ويعدّ منع حدوث التقشر وضبط الـ pH وتنظيمه لقيم ملائمة لأغشية الـ RO من أهم مفاتيح هذه المعالجة، فمشكلات الانسداد و/أو التقشر هي من أهم العوامل المؤثرة في هذه التقانة؛ لأنها تؤدي إلى خفض الجريان في ظروف التشغيل الثابتة، وكلفة تشغيلية أكبر.

ويمكن أن يحدث التقشر نتيجة ترسبات ملحية على سطح الغشاء، (غالباً كربونات الكالسيوم، كبريتات الكالسيوم، مركبات السيليكا، وماءات الحديد)، مما يتطلب معالجة بالكيماويات [2].

إلا أن مانعات التقشر يمكن أن تكون هي نفسها مسببات للانسداد، إذا استخدمت بتركيز مفرط، فقد أظهرت البحوث أن النمو البيولوجي (ومن ثمّ الانسداد البيولوجي) يتنوع ويختلف مع نمط مضادّ التقشر، وأن بعض مضادات التقشر يمكن أن تزيد النمو البيولوجي حتى 4 إلى 10 مرات على المعدل الطبيعي العادي، كما أن المواد الكيماوية التي تستخدم في المعالجة التمهيدية

بالتخثير الكيماوي كالكشبة، كلوريد الحديد، الكلس، ومكونات أخرى كالسيليك، يمكن أن تسبب انسداد غشاء الـ RO. ويُخفّضُ pH مياه التغذية في المعالجة التمهيدية التقليدية بإضافة حمض (حيث يمتد الـ pH النموذجي بين 5 - 7)، مما يزيد انحلالية كربونات الكالسيوم التي هي مفتاح الترسيب المحتمل في كثير من مياه التغذية، وأكثر الحموض المستخدمة لخفض pH المياه شيوياً هو حمض الكبريت H_2SO_4 ، ويستخدم حمض كلور الماء HCl عندما يكون لإضافة حمض الكبريت إمكانية التسبب برواسب كبريتية [3].

وتنتج المعالجة الكيماوية حمأة إضافية؛ لذا فقد أصبح من الضروري البحث عن سبل معالجة أخرى بديلة، وصديقة للبيئة تخفف من وطأة هذه المشكلات بكلفة معقولة، وبأقل قدر ممكن من التلوث الثانوي.

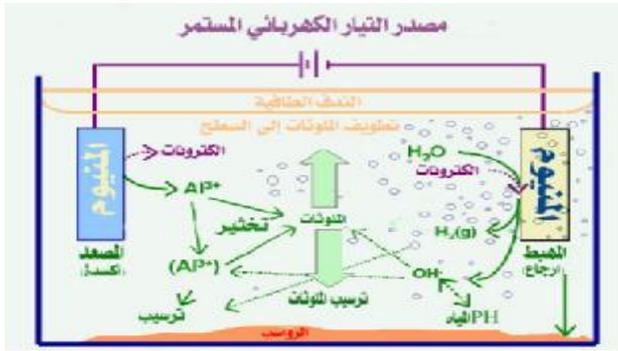
2. أهمية البحث وأهدافه:

هدفَ هذا البحث إلى دراسة أثر التخثير الكهربائي في خفض عسارة و pH مياه البحر تمهيداً لإزالة ملوحتها (تحليتها)، ودور تغيير بعض العوامل التشغيلية للتخثير الكهربائي (عدد الصفائح، نظام التشغيل، وزمن الترسيب) في ذلك، على اعتبار أن للعسارة والـ pH أهمية قصوى فيما يتعلق بالمشكلات التشغيلية المتوقعة في وحدة إزالة الملوحة (حرارية كانت أم غشائية)، ودراسة إمكانية استبدال المعالجة التمهيدية الكيماوية بأخرى كهركيماوية.

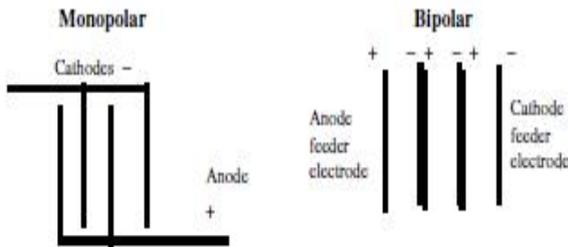
3. طريقة البحث:**1.3. آلية التخثير الكهربائي Electrocoagulation:**

تعتمد هذه الطريقة على تمرير تيار كهربائي (مستمر بشكل عام؛ وفي بعض الحالات متناوب) عبر صفائح معدنية ناقلة للكهرباء مغمورة في المياه المراد معالجتها.

وللتخثير الكهربائي نظاماً تشغيل: أحادي القطبية monopolar، تُوصَلُ فيه الصفائح جميعها مع الأقطاب الكهربائية (قطب موجب وآخر سالب بالتناوب)، وتعمل كل صفيحة بوجهيها كقطب واحد إيجابياً وإمّ سالباً، وثنائي القطبية bipolar حيث تُوصَلُ الصفيحتان الطرفيتان فقط إلى الأقطاب الكهربائية إحداهما للموجب (مصعد)، والأخرى للسالب (مهبط)، وتعمل كل صفيحة داخلية بالتحريض كقطبين (أحد وجهيها موجب والآخر سالب)، كما في الشكل (2) [8].



شكل (1) أهم التفاعلات المتبادلة المُمكنة الحدوث في مفاعل التخثير الكهربائي

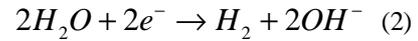
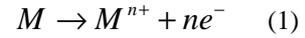


شكل (2) نظاماً التشغيل أحادي (monopolar) وثنائي القطبية (bipolar)

2.3. تطبيقات التخثير الكهربائي:

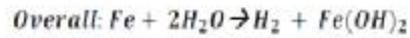
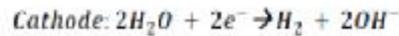
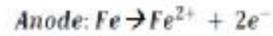
استُخدمت طريقة التخثير الكهربائي في معالجة أنواع مختلفة من المياه، كالمياه الطبيعية لأغراض الشرب، وكذلك المياه الصناعية ومياه الصرف.

فعند تمرير التيار الكهربائي عبر الالكترود المعدني، يتأكسد المعدن مُحرراً الشاردة الموجبة عند المصعد (Anode)، وبشكل متوافق، يتم إرجاع الماء إلى غاز الهيدروجين وشاردة الهيدروكسيل عند المهبط (Cathode) كما يأتي:

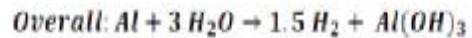
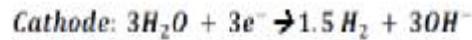
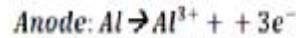


تتحد الشاردة المعدنية مع شاردة الهيدروكسيل مُشكّلةً مركّبات هيدروكسيلية تملك خواص امتزاز عالية فتعمل على تحطيم استقرار الجسيمات الغروية، وتشكّل تجمعات مع الملوثات، كما يساعد انطلاق غاز الهيدروجين على عملية المزج وتعزيز تطويف الملوثات، فعند تشكّل الندف، تقوم فقاعات الغاز بتطويفها فتُزال الملوثات مُشكّلةً طبقةً طافية على سطح الماء [4-5-6-7].

ففي حال استخدام إلكترودات حديد تكون صيغة التفاعلات الحاصلة كالآتي:



أمّ في حال استخدام إلكترودات ألومنيوم فنكون الصيغة كالآتي [7]:



ويظهر الشكل (1) أهم التفاعلات المتبادلة المُمكنة الحدوث في مفاعل التخثير الكهربائي مع إلكترودات ألومنيوم [4].

خلائط النحاس والفضة، كذلك حققت في إزالة بكتريا E.coli كفاءة متميزة [4].

- وفي مجال إزالة الملوحة وتحلية المياه، حققت المعالجة التمهيدية للمياه المالحة باستخدام التخثير الكهربائي نسب إزالة للـ SO_4^{2-} و Cl^- بـ 50 % و 3% على التسلسل [9].

3.3. تحديد كمية الطاقة الكهربائية المستهلكة ومن ثمَّ كلفة المعالجة:

تُحدَّد كمية الطاقة الكهربائية المستهلكة من العلاقة:

$$E = (I \times U \times T) / V \quad (1)$$

إذ:

E: كمية الطاقة الكهربائية المستهلكة وتحسب لمعالجة 1

م³ من المياه (واط ساعي / م³) (w.h/m³)

I: شدة التيار الكهربائي المطبقة (أمبير)

U: فرق الكمون المطبق (فولط)

T: زمن المكوث ضمن مفاعل التخثير الكهربائي بالساعة

(h)

V: حجم المياه المعالجة (م³) [6]

4.3. الأجهزة والمواد المستخدمة:

المفاعل المستخدم شكل (3) هو عبارة عن خلية زجاجية (حوض) محمولة على منصّب معدني ومزودة بصمام تصريف سفلي، يوضع في الحوض عدد من الصفائح المعدنية الناقلة للتيار الكهربائي، أبعاد كل صفيحة (20 × 16) سم وسماكتها 1 مم، أمّا الأبعاد الفعّالة كهربائياً فهي (10 × 16) سم، والتباعد بين الصفائح 2 سم، فضلاً عن محوّل تيار كهربائي صُمِّمَت تبعاً لنقلية المياه المدروسة صورة (1) وهي تحوّل التيار من متناوب إلى مستمر، ومزودة بنظام تحكم بشدة التيار الكهربائي لتثبيتته ضمن مجال (0-15) أمبير، بكمون متغيّر حيث الـ input

ونستعرض فيما يأتي بعض الأمثلة عن المجالات التي حققت فيها هذه التقنية كفاءة عالية:

- أجريت دراسة لبحث إمكانية إزالة المواد الغروية من المياه الجوفية في الإقليم الشرقي للملكة العربية السعودية بطريقة التخثير الكهربائي وباستخدام إلكترونيات ستانلس ستيل، وبلغت فعالية إزالة العكارة 95 % عند زمن مكوث 5 دقائق، وشدة تيار 1 أمبير.

- استخدمت طريقة التخثير الكهربائي من قبل شركة (Seattle Tectonics) لمعالجة مياه العواصف المطرية الجارية على سطح الأرض، وحققت نتائج مذهلة في إزالة العكارة، كذلك بلغت نسبة إزالة الفوسفور 90 %، وبلغت القيمة 90 %، أو أكثر في إزالة المعادن ومبيدات الحشرات الموجودة في مياه الأمطار الجارية على سطح الأرض.

- استخدمت الطريقة أيضاً لإزالة الفلور من مياه (Septentrional Sahara) في شمال أفريقية، جنوب الجزائر، باستخدام أسلوب الدفقات في المعالجة وإلكترونيات ألومنيوم ثنائية القطبية، ووصلت نسبة الإزالة إلى القيمة 90 %.

- معالجة مياه الفضلات الناجمة عن حقل للنفط حيث جُمعت المياه الملوثة في بركة تخزين في موقع لويسيانا واحتوت تلك البركة على 27 متراً مكعباً من المياه الملوثة بشكل رئيسي بالباريوم والمواد الصلبة المعلقة بتراكيز عالية، وحققت المعالجة بهذه الطريقة معايير التصريف المطلوبة كلّها، وكان معدل إزالة المواد الصلبة المعلقة 84.2 %، وإزالة الباريوم 56.5 %.

- حققت نتائج فعالة جداً، في تعقيم (إزالة جراثيم) مياه أحواض السباحة باستخدام إلكترونيات اسطوانية من

وقد قيسَت العسارة باستخدام جهاز SpectroDirect/pc وspectroII_5b المُصنَّع من قبل شركة Tintometer (ألمانيا).

4. نتائج وحسابات:

المياه المدروسة هي مياه بحر طبيعية مأخوذة من شاطئ مدينة اللاذقية على عمق (13-14) م، وهو العمق التقليدي الموافق لمآخذ محطات تحلية المياه، بقيم pH ضمن مجال (7.91-8.10) وعسارة كلية mg/lCaCO_3 (8210-8660)، وبعد كل تجربة تخثير تُترك المياه المُخترَة الخارجة من المفاعل لتترسب لاحقاً في حوض ترسيب دائري.

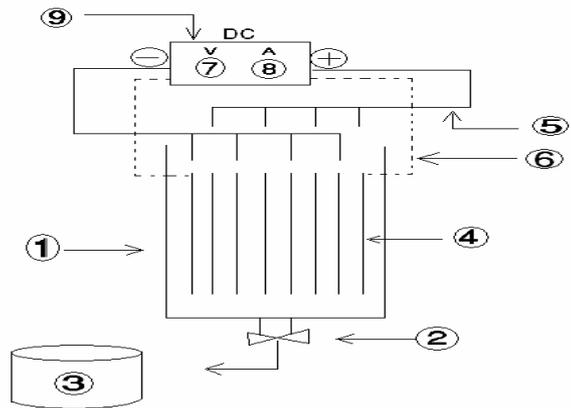
1.4 تأثير نوعية معدن الصفائح المستخدمة مع نظام التشغيل:

اخْتَبِرَت 4 أنواع للصفائح وهي: ألومنيوم، كروم 304، ستانلس ستيل، وحديد، بزمن تخثير كهربائي 15 دقيقة، وشدة تيار 5 أمبير، وزمن ترسيب لاحق 3 ساعات، مع نظامين أحادي وثنائي القطبية بأربع صفائح، وحجم مياه معالجة 3.6 ليترًا، فكانت النتائج كما هو مبين في الجدولين (1)،(2) والشكلين (4)،(5).

الجدول (1) تغير الـ pH وكفاءة إزالة العسارة الكلية بتغير معدن الصفائح (نظام أحادي القطبية)

pH	كفاءة إزالة العسارة %	العسارة الكلية mg/lCaCO_3	الكمون (فولط)	العينة (نوع الصفائح)
7.91	0	8210	0	خام دون معالجة
4.80	5.5	7760	3	ألومنيوم
6.25	3.3	7940	4	كروم 304
6.21	14.5	7020	3.75	ستانلس ستيل
6.88	15.2	6960	3	حديد

output-DC أمًا الـ 220V-AC فهو متغير ابتداءً من الصفر ويرتفع تبعاً للشدة التي نثبت عليها التيار الكهربائي، ولناقلية (أو مقاومة) المياه، وعدد الصفائح، وتضمّ المحوِّلة مقياسيَّ شدة تيار وكمون (أمبير، فولط) رقمية دقيقة، ومقاس معدنية تصل قطبيَّ المحوِّلة بالصفائح، بنظامين أحادي وثنائي القطبية.



الشكل (3) مفاعل التخثير الكهربائي EC المستخدم في البحث:

1- حوض زجاجي 2- سكر تصريف سفلي 3- حوض ترسيب اسطواني 4- صفائح معدنية 5- مقاس وصل المساري الموجبة (مساعد) والمساري السالبة (مهابط) مع منبع التيار الكهربائي المستمر بنظام أحادي القطبية 6- وصل الصفائح بنظام ثنائي القطبية 7- مقياس فولط 8- مقياس أمبير 9- منبع التيار الكهربائي المستمر.



صورة (1) محوِّلة التيار الكهربائي المستخدمة

أمّا بالنسبة إلى pH فهناك انخفاض واضح عن القيمة في المياه الخام مع الصفائح كلّها ونظامي التشغيل، إلا أن صفائح الألمنيوم سجلت انخفاضاً أكبر عن باقي الصفائح وهو دون القيم المُفضّلة لعملية إزالة الملوحة (التحلية).

2.4. تأثير عدد الصفائح مع نظام التشغيل:

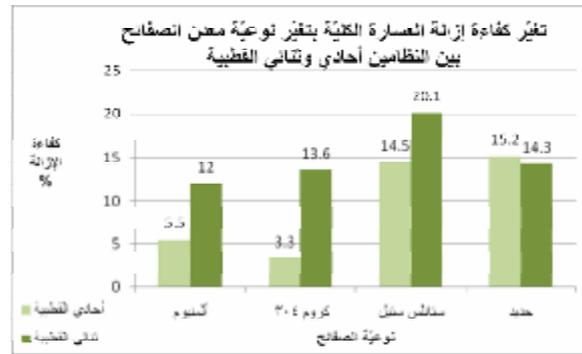
نظراً إلى أن أفضل النتائج تحققت مع صفائح ستانلس ستيل فقد جرى التركيز عليها لدراسة أثر عدد الصفائح (ومن ثمّ التباعد بين الصفائح)، إذ كانت المقارنة في النظام أحادي القطبية بين (2,4,8) صفائح، وفي النظام ثنائي القطبية بين (4,8) صفائح، وقد اقتصر استخدام الصفيحتين على النظام أحادي القطبية فقط لأن كليهما موصولة بقطب إماماً موجب أو سالب فالصفيحة تمثل قطباً واحداً بوجهيها، حيث طُبّقنا تياراً كهربائياً بشدّة 5 أمبير، وزمن مكوث في مفاعل التخثير الكهربائي 15 دقيقة، وزمن ترسيب لاحق 3 ساعة، بحجم مياه معالجة 3.6 ليترًا، ويوضّح الجدول (3) والشكل (6) نتائج هذه المرحلة:

الجدول (3) تغيير الـ pH وكفاءة إزالة العسارة الكلية بتغيير عدد الصفائح ونظام التشغيل

العينة (نوع الصفائح)	نظام التشغيل	عدد الصفائح	الكمون (فولط)	العسارة الكلية mg/ICaCO ₃	كفاءة إزالة العسارة %	pH
خام	-	-	-	8220	0	8.10
1	أحادي	2	10	8080	1.7	6.87
2	أحادي	4	3.75	6620	19.5	6.06
3	أحادي	8	3	6440	21.7	5.67
4	ثنائي	4	11	5810	29.3	5.98
5	ثنائي	8	16.25	4800	41.6	6.22

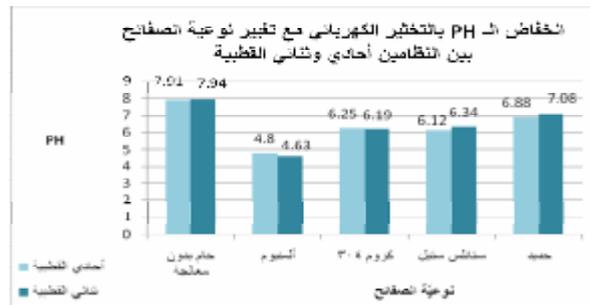
الجدول (2) تغيير الـ pH وكفاءة إزالة العسارة الكلية بتغيير معدن الصفائح (نظام ثنائي القطبية)

العينة (نوع الصفائح)	الكمون (فولط)	العسارة الكلية mg/ICaCO ₃	كفاءة إزالة العسارة %	pH
خام دون معالجة	0	8660	0	7.94
ألمنيوم	10.25	7620	12	4.63
كروم 304	13	7480	13.6	6.19
ستانلس ستيل	11.5	6920	20.1	6.34
حديد	10.5	7420	14.3	7.08



الشكل (4) تغيير كفاءة إزالة العسارة الكلية بتغيير معدن الصفائح بين النظامين أحادي وثنائي القطبية

نلاحظ أن أفضل النتائج تحققت مع صفائح ستانلس ستيل ونظام ثنائي القطبية، (مع ملاحظة أن لون المياه أصبح مائلاً للبرتقالي، نظراً إلى التركيز المرتفع لشوارد الحديد فيها، وقد أمكن التخلص من اللون بإجراء ترسيب إضافي للمياه المعالجة).



الشكل (5) تغيير الـ pH بتغيير معدن الصفائح بين النظامين أحادي وثنائي القطبية

نتائج الجدولين (5)،(4) والشكلين (8)،(7)، علماً أن تطبيق أزمنة ترسيب كبيرة (24 ساعة مثلاً) أظهر جنوح الـ pH للانخفاض، سواءً كان منحاه الأولي باتجاه الزيادة أو النقصان في بداية الترسيب، ولكننا لم ندرج نتائج أزمنة الترسيب الكبيرة لأن تطبيقها غير وارد على أرض الواقع من الناحية العملية.

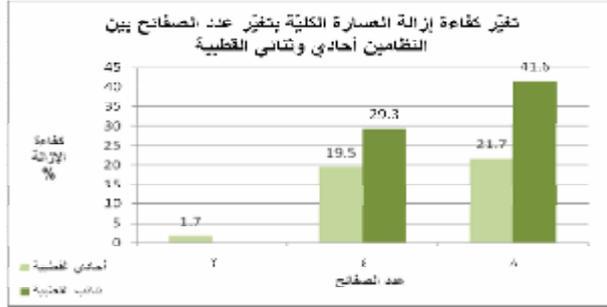
مع ملاحظة أن زمن الترسيب 3 ساعة هو زمن الاعتيان المعتمد الذي تتبع له نتائج الفقرة (1.4).

الجدول (4) تغير الـ pH بتغير زمن الترسيب (لأنواع مختلفة من الصفائح) مع نظام أحادي القطبية

نوعية معدن الصفائح				زمن الترسيب (ساعة)
حديد	ستانلس ستيل	كروم 304	ألنيوم	
pH (نظام أحادي القطبية)				
7.13	6.18	6.21	4.74	1
6.88	6.21	6.25	4.80	3 (زمن الإعتيان)
6.67	6.27	6.31	4.84	5
6.35	6.33	6.35	4.79	10

الجدول (5) تغير الـ pH بتغير زمن الترسيب (لأنواع مختلفة من الصفائح) مع نظام ثنائي القطبية

نوعية معدن الصفائح				زمن الترسيب (ساعة)
حديد	ستانلس ستيل	كروم 304	ألنيوم	
pH (نظام ثنائي القطبية)				
7.63	6.55	6.15	4.51	1
7.08	6.34	6.19	4.63	3 (زمن الإعتيان)
6.84	6.20	6.21	4.63	5
6.44	6.06	6.23	4.63	8



الشكل (6) تغير كفاءة إزالة العسارة الكلية بتغير عدد الصفائح ونظام التشغيل

زيادة عدد الصفائح تحسنت كفاءة إزالة العسارة الكلية، مع النظامين أحادي وثنائي القطبية، وبمراقبة قيم فرق الكمون (فولط) نلاحظ انخفاض الكمون مع زيادة عدد الصفائح في النظام الأحادي، وازدياده مع زيادة عدد الصفائح في النظام الثنائي.

وهناك دائماً انخفاض للـ pH عن القيمة الخام في الحالات كلها.

3.4. تأثير زمن الترسيب في الـ pH:

نظراً إلى أن مياه البحر المعالجة أولاً بالتخثير الكهربائي يمكن أن تخضع لمدة تخزين في خزانات تجميعية، قبل دخولها وحدات إزالة الملوحة الرئيسية، فإن لزمن التخزين والترسيب أهمية خاصة فيما يتعلق بقيمة الـ pH، حيث تحدث خلال مدة الترسيب تفاعلات عديدة (نظراً إلى غنى مياه البحر بالشوارد كما ونوعاً) من شأنها التأثير في الـ pH زيادةً أو نقصاناً، تبعاً لنوع المعدن المستخدم في التخثير، ونظام التخثير، وزمن الترسيب، فيجب الحرص على إبقاء قيمة الـ pH ضمن الحدود المفضلة لعملية إزالة الملوحة لاحقاً (5.5-6.5).

وبمراقبة قيم الـ pH لأنواع الصفائح المستخدمة في الفقرة (1.4) خلال أزمنة ترسيب مختلفة وصلنا إلى

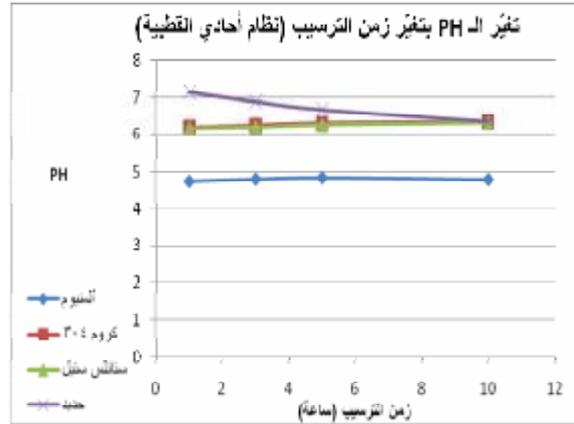
بينما هناك انخفاض واضح للـ pH مع الحديد، ويُعزى هذا الانخفاض إلى التراكيز المرتفعة لشوارد الحديد المتحررة من الصفائح التي ترتبط بجذور المئات الناتجة عن تشرّد الماء، مُشكلةً راسب ماء الحديد، ممّا يؤدي إلى خفض جذور الـ OH^- وانخفاض الـ pH بالمحصلة.

أمّا تغيّرات الـ pH مع الستانلس ستيل فهي تتبع نمط نظام التشغيل أيضاً، حيث يسلك الستانلس ستيل سلوكين مختلفين بين النظامين أحادي وثنائي القطبية، فمع النظام الأحادي تزداد قيم الـ pH مع زيادة زمن الترسيب (كما الكروم)، في حين تنخفض بزيادة زمن الترسيب (كما الحديد) لدى تطبيق النظام الثنائي، ويمكن تفسير ذلك بأن الستانلس ستيل بتركيبته يملك بعض خواص الكروم والحديد معاً، فهما من أهم العناصر الداخلة في تركيب خلائطه بنسب متفاوتة، ولذلك فإن سلوكه من حيث تغيّرات الـ pH كان بين المعدنين.

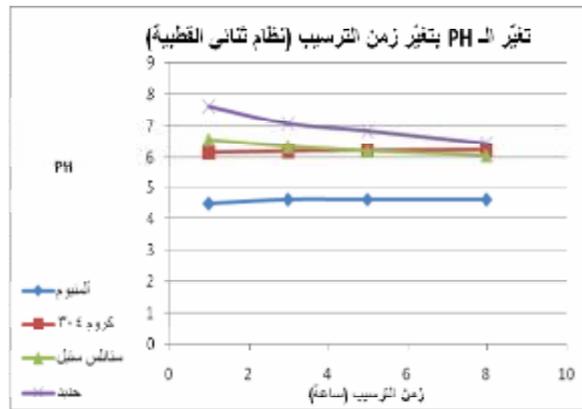
4.4. حساب كمية الطاقة الكهربائية المستهلكة وكلفة المعالجة:

بتطبيق العلاقة (1) الواردة في الفقرة (3.3)، على معطيات الفقرة (2.4)، لمقارنة استهلاك الطاقة الكهربائية ومن ثمّ الكلفة التشغيلية تبعاً لعدد الصفائح ونظام التشغيل، نتوصّل إلى النتائج الموضحة في الشكل (9).

إذ يُلاحظ أن استهلاك الطاقة الكهربائية أكبر دائماً مع النظام ثنائي القطبية، وهذا عائد إلى قيم الكيون المرتفعة التابعة له، ومن أجل نظام التشغيل نفسه يزداد استهلاك الطاقة الكهربائية بزيادة عدد الصفائح في النظام الثنائي، في حين ينخفض مع زيادة عدد الصفائح في النظام الأحادي.



الشكل (7) تغيّر الـ pH بتغيّر زمن الترسيب (لأنواع مختلفة من الصفائح) مع نظام أحادي القطبية



الشكل (8) تغيّر الـ pH بتغيّر زمن الترسيب (لأنواع مختلفة من الصفائح) مع نظام ثنائي القطبية

من الملاحظ أن منحى تغيّر قيمة الـ pH خلال مدة الترسيب، يتبع لنوعية المعدن المستخدم في التخثير، فمع زيادة زمن الترسيب (بنظامي التشغيل)، هناك ارتفاع طفيف أو ثبات للـ pH مع الألمنيوم، وارتفاع واضح مع الكروم 304، لأن بعض الرواسب التي كانت قد تشكلت خلال التخثير ومع بداية الترسيب، يمكن أن تعود لتتفكك مُحررةً جذور الـ OH^- ثانيةً إلى المياه.

ومن ثمَّ يوفرُّ الكلفة المتعلقة بها وبمنشآت وتجهيزات التحضير والتجريع لمحاليلها الكيميائية من جهة، ويغنينا أيضاً عن إضافة الحموض الهادفة إلى خفض قيمة الـ pH.

فضلاً عن أن التلوث الثانوي أقل، وهو أمر لا يقل أهمية عن الناحية الاقتصادية.

5. المناقشة والاستنتاجات:

1.5. كفاءة إزالة العسارة:

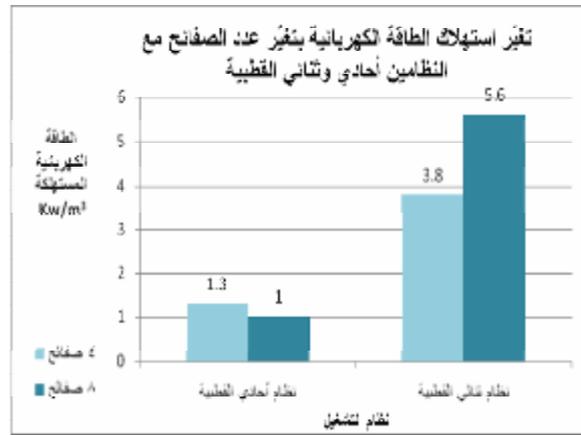
بيّنت النتائج أن صفائح الستانلس ستيل حققت أفضل كفاءة إزالة للعسارة الكلية، وأن نظام التشغيل ثنائي القطبية هو في الغالب أفضل من الأحادي، (باستثناء صفائح الحديد إذ كان هناك تقارب بين نتائج النظامين)، ومع زيادة عدد الصفائح وثبات باقي ظروف التشغيل، ارتفعت كفاءة الإزالة، خاصةً مع النظام الثنائي، ويمكن أن يُعزى هذا الارتفاع إلى زيادة تركيز الشوارد المتحررة من الصفائح مع زيادة عددها (تبعاً لقانون فارداي)، ومن ثمَّ تفعيل عملية التخثير وتحريضها بشكل أكبر.

2.5. الـ pH:

فضلاً عن التخفيض الأولي للعسارة الكلية في مياه البحر، تُمكننا آلية التخثير الكهربائي من الاستغناء عن عملية التحميض المُدرجة دائماً في منظومات إزالة الملوحة كلّها على اختلاف أنماطها، ومن ثمَّ ليس هناك حاجة لاستخدام حموض إضافية، فمع التخثير الكهربائي دائماً هناك انخفاض (بقيم متفاوتة) للـ pH.

وإن لزم الترسيب أثراً كبيراً في أداء عملية المعالجة، وفي تحديد مدة التخزين الأولية للمياه قبل دخولها وحدة إزالة الملوحة الرئيسية، حيث تخضع قيم الـ pH

إن الهدف من المقارنة بين النظامين أحادي وثنائي القطبية هو توضيح أن أفضلية النظام ثنائي القطبية على الأحادي من حيث فعالية المعالجة تترافق مع ارتفاع الكلفة التشغيلية أيضاً، وترتفع هذه الكلفة مع زيادة عدد الصفائح في النظام الثنائي. وهي أمور يجب أخذها بالحسبان لدى تصميم نظام التخثير الكهربائي، واعتماد ما هو مناسب منها وفقاً للدراسة الاقتصادية المُقررة.



الشكل (9) تغير استهلاك الطاقة الكهربائية بتغير عدد الصفائح ونظام التشغيل

وبحساب كلفة المعالجة الفضلى 41.6% (إزالة عسارة) نجد:

$$E = (I \times U \times T) / V$$

$$E = (5 \times 16.25 \times 15 / 60) / 0.0036$$

$$E = 5642.4 \text{ Wh/m}^3 = 5.6 \text{ Kw/m}^3$$

وباعتبار سعر تقريبي وسطي للكيلو واط الساعي 3 ل.س تكون كلفة المعالجة للمتر المكعب الواحد 16.8 ل.س.

ومقارنةً بطرائق المعالجة التمهيدية الكيميائية التقليدية فإن استخدام التخثير الكهربائي هنا، يُغنينا عن الإضافة المُفرطة للمواد الكيميائية (المروّبات) اللازمة لترسيب مركبات العسارة وإزالتها كالكشبة أو الكلس أو الكوبراس

6. كلمة شكر:

الشكر كلّه لجامعة حلب لما قدمته من دعم مادّي وتقني لهذا البحث، وللمعهد العالي للبحوث البحرية في محافظة اللاذقية لتعاونه الكبير.

لتغيّرات بعد عملية التخثير الكهربائي، نتيجة استمرار حدوث تفاعلات كيميائية لاحقة نظراً إلى غنى مياه البحر بالشوارد المختلفة كماً ونوعاً وارتفاع ناقليتها الكهربائية، وعليه يجب الانتباه إلى ضرورة تحديد زمن الترسيب المثالي، للحيلولة دون عودة ارتفاع الـ pH أو استمرار انخفاضه خلال عملية الترسيب لقيم لا تتوافق مع المجال الأمثل المطلوب تحقيقه.

وقد توصلنا في هذا البحث إلى:

خفض العسارة الكلية لمياه البحر من 8220 إلى 4800 mg/1CaCO₃ بنسبة إزالة 41.6%، وخفض الـ pH بما يقارب الدرجتين دون أي إضافة حمضية، باستخدام صفائح ستانلس ستيل، وبكلفة طاقة كهربائية 16.8 ل.س فقط للمتر المكعب الواحد.

مما يترتب عليه إطالة عمر أغشية الـ RO، وخفض تواتر صيانتها واستبدالها، وحذف كلفة المروّبات والحموض وتجهيزاتها في المعالجة الكيميائية التقليدية، وتقنين التلوث الثانوي الناجم عنها، الأمر الذي ينعكس إيجاباً على إجمالي كلفة التشغيل والصيانة لمحطة إزالة الملوحة (التحلية).

وبشكل عام فإن إمكانية استخدام تقنية التخثير الكهربائي كمعالجة تمهيدية تسبق وحدات إزالة الملوحة الرئيسية، مازال قيد الدراسة، وقد دخل حيّز التوظيف الفعلي على نطاق تجريبي، إلا أن آلية المعالجة الكهركيميائية بوصفها صديقة للبيئة وأنظف من المعالجة الكيميائية البحتة، وذات تلوث ثانوي أخف وطأة، هي مرشحة للرواج مستقبلاً، خاصة مع تطور علم الطاقات المتجددة، وتبني تقانات الطاقة الكهربائية الناتجة عن الطاقة الشمسية كمفتاح للإنتاج الأنظف، والأقل كلفة.

المراجع:

- الهوائية لمياه صرف معاصر الزيتون - رسالة ماجستير مُجازة في الهندسة البيئية - كلية الهندسة المدنية - جامعة حلب - سورية.
7. WALAA HIRZALLAH , 2011- **Effectiveness of Electrochemical Treatment of Municipal Sewage** - A Thesis in The Department of Building, Civil and Environmental Engineering - Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Applied Science (Civil Engineering) at Concordia University Montreal, Quebec, Canada.
8. Mohammad. M. Emamjomeh, Muttucumar. Sivakumar - **Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes** - *Journal of Environmental Management* **90** (2009) 1663-1679.
9. DANESHVAR.; NEZAMEDDIN.; ASHASSI.; HABIB.; RAKHSHAEI.; ROHAN., 2002- **Pretreatment Of Brackish Water Using DC-Electrocoagulation Method And Optimization** - *Iran J.Chem & Chem.Eng, Vol 21, No.1*, 13-20.
1. AKILI D. KHAWAJI.; IBRAHIM K. KUTUBKHANAH.; JONG-MIHN WIE., 2008- **Advances in seawater desalination technologies** - *Desalination*, **221**,47 - 69.
2. YOUNG M. KIM.; SEUNG J. KIM.; YONG S. KIM.; SANGHO LEE.; In S. KIM.; JOON HA KIM., 2009- **Overview of systems engineering approaches for a large-scale seawater desalination plant with a reverse osmosis network** - *Desalination*, **238**,312-332.
3. LAUREN F. GREENLEE, DESMOND F. LAWLER, BENNY D. FREEMAN, BENOIT MARROT, PHILIPPE MOULIN - 2009 - **Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges** - *water research* - **43** - 2317 - 2348.
4. يونس سليمان تغريد، 2005 - استخدام طريقة التخثير الكهربائي في تنقية المياه السطحية - دراسة حالة سد بلوران - رسالة ماجستير مُجازة في الهندسة البيئية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - سورية.
5. بنود عبد الحكيم، قبرطاي شيرين، 2008- إزالة الفينولات من مياه صرف معاصر الزيتون باستخدام التخثير الكهربائي - مجلة بحوث جامعة حلب، سلسلة العلوم الهندسية، العدد 64، 265 - 281.
6. قبرطاي شيرين، 2008 - دراسة المعالجة التمهيدية بالتخثير الكهربائي والمعالجة الحيوية