

دراسة طريقة التخثير الكهربائي (EC) لإزالة النترات من المياه باستخدام التيار المتناوب (AC)

م. الحسن علي^١ أ.د.م. بسام العجي^٢

^١مهندس - قسم الهندسة الصحية والبيئية - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق.

^٢أستاذ - قسم الهندسة الصحية والبيئية - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق.

الملخص

تتناول هذه الدراسة اختبار إمكانية إزالة النترات من المياه الملوثة باستخدام تقنية التخثير الكهربائي ذات التيار المتناوب. تمت دراسة خواص هذه التقنية باستخدام أقطاب الألمنيوم أحادية القطب وكثافة تيار مختلفة لتحديد الكثافة الأمثل، وذلك لتحسين كفاءة تنقية مياه الشرب الملوثة. كذلك تمّ تحديد تأثير التركيز الأولي للنترات على كفاءة الإزالة واستهلاك الطاقة لهذه الطريقة. أظهرت نتائج التقنية أنّ زيادة كثافة التيار أدت إلى تحسين معدّل الإزالة للنترات، وإلى انخفاض واضح في زمن المعالجة. كما أظهرت زيادة معدّل الإزالة مع انخفاض التركيز الأولي للنترات، حيث وصل معدّل الإزالة إلى ما يقارب 74.4% عند تركيز أولي للنترات 800 ملغ/ليتر، و97.75% عند تركيز أولي للنترات 200 ملغ/ليتر، وبالتالي تم الوصول إلى درجة التنقية المطلوبة بعد 30 دقيقة فقط من زمن المعالجة عند هذا التركيز، وباستهلاك طاقة 57 كيلو واط ساعي/م³. يمكن اعتبار طريقة التخثير الكهربائي باستخدام التيار المتناوب طريقة جيدة وفعالة لإزالة النترات من المياه، وذلك بالنظر إلى كفاءة الإزالة العالية، سرعة المعالجة، والتكلفة المنخفضة.



حقوق النشر: جامعة دمشق -

سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق

النشر بموجب الترخيص

CC BY-NC-SA 04

الكلمات المفتاحية: التخثير الكهربائي، تيار متناوب، إزالة النترات، تركيز أولي، مجموعة أحادية القطب، أقطاب الألمنيوم، داعم إلكتروني، تنقية مياه.

Study of Electrocoagulation (EC) Process for Nitrate Removal from Water Using Alternating Current (AC)

Alhasan Ali¹

Bassam Al Aji²

¹Engineer in the Department of Sanitary and Environmental Engineering of Civil Engineering Faculty- Damascus University.

²Professor in the Department of Sanitary and Environmental Engineering of Civil Engineering Faculty- Damascus University.

Abstract

This work studies the possibility of removing nitrate ions from polluted water by using alternating current (AC) with electrocoagulation (EC) technique. The properties of this process have been studied by using monopolar Aluminum electrodes and different current densities to determine the optimal density, to improve the purification efficiency of polluted drinking water. Also, the initial concentration effect of nitrate has been studied for the removal efficiency and energy consumption of this process. The results showed that the current density increasing leads to improve the rate of nitrate removal from water and a clear decrease in treatment time. Also showed that nitrate removal increases when the initial nitrate concentration decreases. Where the removal rate reached to approximately 74.4% with an initial nitrate concentration 800 mg/l, and 97.75% with an initial concentration 200 mg/l. Therefore, the required purification limit has been reached at only 30 minutes of treatment at this concentration, with a total energy consumption 57 kw.h/m³. Electrocoagulation using alternating current can be considered a good and effective method for removing nitrate from water because of its high removal efficiency, processing speed and low-cost.



Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

Keywords: Electrocoagulation, Alternating current, Nitrate removal, Initial concentration, Monopolar electrodes, Aluminum electrodes, Supporting Electrolyte, Water purification.

١. المقدمة

يمثل الحفاظ على جودة موارد مياه الشرب أحد التحديات الرئيسية في القرن الحادي والعشرين [1]. تعتبر النترات ومركباتها من الملوثات الرئيسية في المحاليل المائية [2].

حيث يتزايد تلوث النترات باستمرار في السنوات الأخيرة، بسبب الاستخدام المفرط للأسمدة، وتصريف مياه الصرف الصحي البلدية والصناعية، والنفايات الحيوانية وأنظمة الصرف الصحي [3].

كما تشكل التراكيز العالية من النترات تهديداً خطيراً لنوعية المياه والصحة العامة في الموارد المائية. حيث تم الإبلاغ عن التأثيرات البيئية والسامة لمركبات النترات في العديد من الدراسات [4-5].

أهم الآثار الضارة للنترات ومركباتها هي ظاهرة الاثراء الغذائي (Eutrophication) للمساحات المائية، والآثار الصحية الضارة على الرضع والأطفال والحوامل، وسمية النظم الإيكولوجية المائية [6-7-8].

النترات أيون ثابت وقابل للذوبان، وقدرته على الامتصاص أو الترسيب المشترك منخفضة، لذلك فإن إزالته من المحاليل المائية معقدة للغاية ومكلفة [2-5-9].

طرق المعالجة الحالية لإزالة الملوثات مثل النترات هي التبادل الأيوني والترسيب والمعالجة البيولوجية والتناضح العكسي (Reverse Osmosis) والعمليات الكهروكيميائية. يعتبر التحكم في بعض هذه الطرق وفعاليتها محدود [10].

من ناحية أخرى، تم استخدام عملية التخثير الكهربائي بنجاح لإزالة أنواع مختلفة من الملوثات، بما في ذلك المواد العضوية وغير العضوية [11-12-13]، والمعادن الثقيلة والأيونات المختلفة مثل الزرنيخ [14]، والفلوريد [15]، والزنك والنحاس والنيكل والفضة والكروم [16].

يتم عادةً استخدام التيار الكهربائي المستمر (DC) في عملية التخثير الكهربائي، إلا أن استخدام هذا التيار يعمل على أكسدة الأنود (القطب الموجب) وزيادة استهلاكه، وتشكل طبقة أكسيد غير نفوذة على الكاثود (القطب السالب) وهو ما يعرف باسم تخميل الكاثود (Cathode Passivation). مما يؤدي إلى ارتفاع استهلاك الطاقة وانخفاض تدفق التيار بين القطبين، وانخفاض كفاءة عملية التخثير الكهربائي [17].

يمكن التقليل من سلبية الأقطاب الكهربائية (passivity of electrodes) باستخدام وضع التيار المتناوب (AC) الذي يتم فيه تبديل الكاثود والأنود بشكل دوري. وبالتالي، فإن التأخير في تخميل الكاثود وتآكل الأنود يضمن عمر مقبول للأقطاب [18].

تم اختبار وضع التيار المتناوب (AC) كبديل مناسب لأنواع مختلفة من الملوثات. مثل المياه الزيتية [19-20]، والفلوريد [15]، والنحاس [21]، والزرنيخ [14]، والكاديوم [18].

حيث حقق استخدام التيار المتناوب (AC) في عملية التخثير الكهربائي لإزالة هذه الملوثات درجة كفاءة أعلى من استخدام التيار المستمر (DC) لإزالتها.

٢. الطريقة والمواد المستخدمة

تم استخدام نترات البوتاسيوم (HIMEDIA Extra pure) لتحضير المحاليل الحاوية على تراكيز معلومة من النترات. تم تحضير محاليل بسعة 1 لتر تحتوي تركيزين معلومين من النترات (200-800) ملغ/لتر باستخدام كمية محددة من نترات البوتاسيوم والماء المقطر.

تم إجراء تجارب إزالة النترات في مخبر البيئة- كلية الهندسة المدنية- جامعة دمشق، باستخدام خلية اسطوانية زجاجية سعة 1 لتر، خلاط مغناطيسي (Nuova II stir plate, USA) ست صفائح من الألمنيوم مثبتة بشكل



الشكل رقم (2) محطة العمل المستخدمة لإجراء التجارب

العينات المأخوذة من المفاعل تكون بسعة 2 مل، تمدد إلى 50 مل باستخدام الماء المقطر. يتم قياس تركيز النترات المتبقي باستخدام جهاز قياس الطيف الضوئي (DR-890 Colorimeter Hach, USA). جميع التجارب أجريت بدرجة حرارة المخبر، وسرعة دوران 400 دورة / الدقيقة.

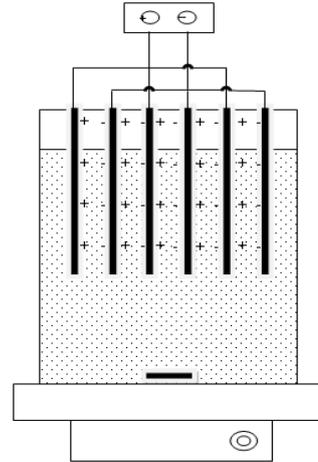
٢.١. تصنيع جهاز التغذية بالتيار المتناوب

(AC Power Supply):

نظراً للحاجة إلى تأمين تيار كهربائي متناوب يمكن التحكم بشدته وتوتره من أجل القيام بالتجارب، تم تصنيع جهاز قادر على تأمين مواصفات خاصة للتيار الكهربائي المتناوب. كما هو موضح في الشكل رقم (3). يتألف الجهاز المذكور من محول ذاتي (Auto Transformer) ذو ملف نحاسي، يمكنه تغيير توتر تيار المدينة من 220 فولت إلى التوتر المطلوب من 0 إلى 220 فولت، أو ضبط شدة التيار إلى القيمة المطلوبة بين 0.1 و 12 أمبير. مثبت داخل غلاف خارجي متين مصنوع من الستانلس ستيل المقاوم للصدأ (عيار 304) وواجهة من الألمنيوم.

عامودي باستخدام مثبت لضمان مسافة غمر ثابتة في المحلول بعمق 4 سم، لإعطاء مساحة سطح فعال 100 سم²، من خلال ترتيب الأقطاب بالترتيب أحادي القطب الموازي (MonoPolar Parallel)، كما هو موضح في الشكل رقم (1). التباعد الداخلي بين الأقطاب 0.3 سم. تم توفير طاقة تيار متناوب ثابتة ومنتظمة باستخدام جهاز محلي الصنع (0-220 فولت، 0-12 أمبير)، يمكنه إعطاء كثافات مختلفة للتيار.

تمت دراسة تأثير كثافة التيار وتأثير التركيز الأولي للنترات من خلال إجراء مجموعة من التجارب على محلول ذو تركيز أولي للنترات 800 ملغ/ليتر، وكثافة تيار (10, 30, 50) ميلي أمبير/سم². بحيث يتم تطبيق كثافة تيار ثابتة لمدة ساعة على المحلول، وأخذ عينات خلال أزمدة محددة من التجربة (0, 20, 40, 60) دقيقة، لدراسة تغيرات إزالة النترات مع الزمن.



الشكل رقم (1) مفاعل التخثير الكهربائي (EC) يعمل بالتيار المتناوب (AC) باستخدام مجموعة أقطاب ألمنيوم موصولة بالترتيب أحادي القطب الموازي

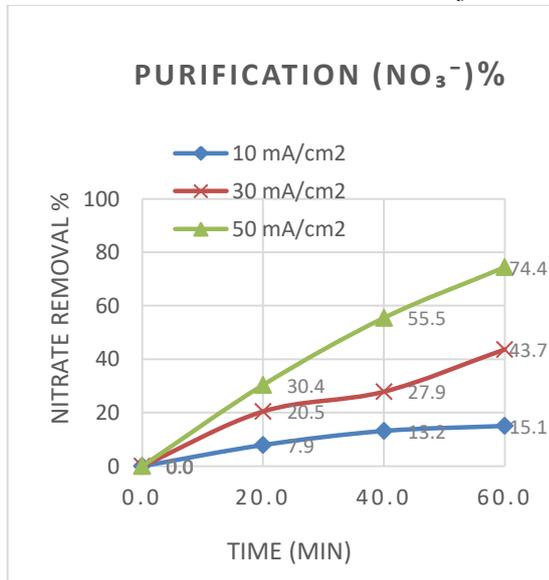
كما تم إجراء مجموعة أخرى من التجارب على محلول ذو تركيز أولي للنترات 200 ملغ/ليتر، بكثافة تيار (10, 30) ميلي أمبير/سم²، لمدة ساعة، وأخذ عينات في الأزمنة المحددة كما في التجارب السابقة. محطة العمل المستخدمة لإجراء التجارب موضحة في الشكل رقم (2).

٣. النتائج والمناقشة

٣.١. تأثير كثافة التيار:

من المعروف أن كثافة التيار تؤثر على معدل إنتاج المخثرات وحجمها وتوزيعها [22]، لذا تعتبر عاملاً مهماً يتحكم بقوة في معدل التفاعل. وهي تعبر عن التيار على مساحة سطح التماس بين الأقطاب والمحلول [18]. تمت دراسة تأثير كثافة التيار على معدل التنقية وإظهار النتائج في الشكلين رقم (4 و5).

تفيد النتائج أن زيادة كثافة التيار كان له تأثير كبير على زيادة معدل إزالة النترات. من أجل التركيز الأولي 800 ملغ/ليتر، كان معدل كفاءة إزالة النترات 15.1% و 43.7% و 74.4% على التوالي، عند كثافة تيار 10 و 30 و 50 ميلي أمبير/سم². من أجل تركيز أولي 200 ملغ/ليتر، كانت كفاءة الإزالة 67.9% و 97.75% على التوالي، عند كثافة تيار 10 و 30 ميلي أمبير/سم².



الشكل رقم (4) تأثير كثافة التيار على إزالة النترات، عند تركيز أولي للنترات (800 ملغ/ليتر)

تم تزويد الجهاز بمقياس أمبير رقمي دقيق قادر على قراءة تغيرات شدة التيار المتناوب بدقة جزء من الأمبير (50.0_0.0 أمبير)، متوضع في الواجهة الأمامية للجهاز.

كما تم تزويده من الأعلى بمقياس فولت رقمي دقيق قادر على قراءة تغيرات توتر التيار المتناوب من 0 إلى 230 فولت.

يتم توصيل الجهاز بالصفائح المراد تغذيتها من خلال سلكين كهربائيين معزولين يخرجان من الجهة الخلفية للجهاز، ينتهي كل منهما بملقط معزول من الخارج. ويتم تشغيل الجهاز من خلال مفتاح تشغيل متوضع على الجانب الأيمن للجهاز. كما تم تزويد الجهاز من الخلف بفاصمة منصهرة تقطع التيار عند بلوغ شدة 12 أمبير، من أجل ضمان سلامة الجهاز والمستخدم.

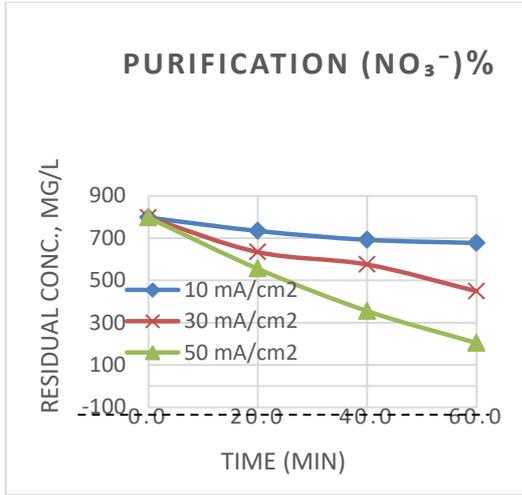
يتم التحكم بتغيرات شدة التيار أو توتره من خلال مفتاح دوار سهل الحركة متوضع في الواجهة الأمامية للجهاز.

من الجدير بالذكر أن هذا الجهاز مصنع بشكل جيد ويؤمن متطلبات السلامة وكفاءة التشغيل العالية، وقد أثبت ذلك أثناء القيام بالتجارب.

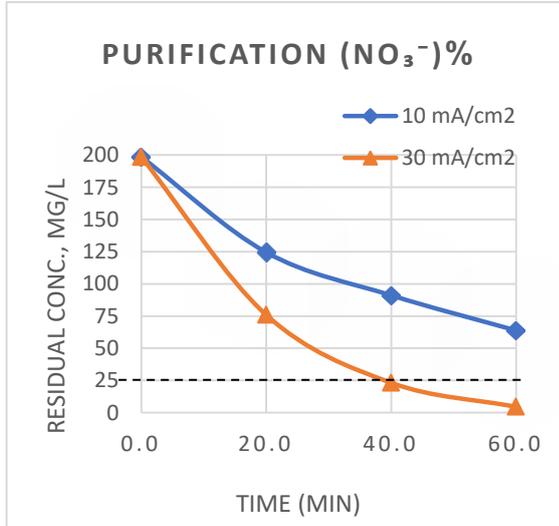


الشكل رقم (3) مراحل تصنيع جهاز التغذية بالتيار المتناوب (AC Power Supply)

أمبير/سم² أصبح التركيز المتبقي للنترات في المحلول أقل من ٥٠ ملغ/ليتر، وبالتالي تصبح المياه ضمن الحد المسموح للنترات لمواصفات مياه الشرب.

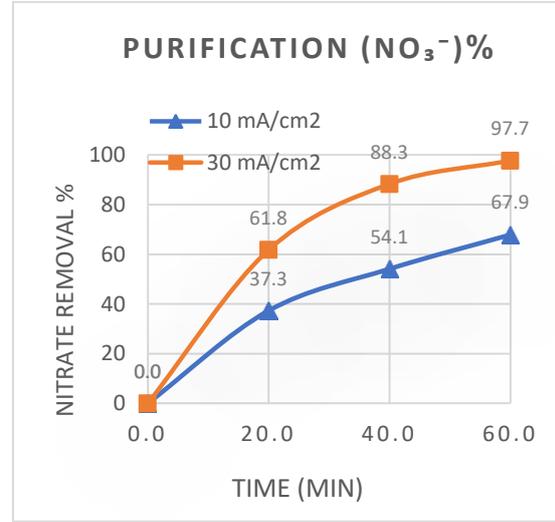


الشكل رقم (6) انخفاض تركيز النترات خلال زمن المعالجة 60 دقيقة، عند تركيز أولي للنترات 800 ملغ/ليتر



الشكل رقم (7) انخفاض تركيز النترات خلال زمن المعالجة 60 دقيقة، عند التركيز الأولي للنترات 200 ملغ/ليتر

من جانب آخر، يرتبط استهلاك الطاقة بشكل مباشر بكثافة التيار. وبالتالي، من أجل تركيز أولي للنترات 200 ملغ/ليتر، كان استهلاك الطاقة 105 كيلو واط ساعي/م³ للحصول على معدل تنقية 97.7% عند كثافة تيار 30

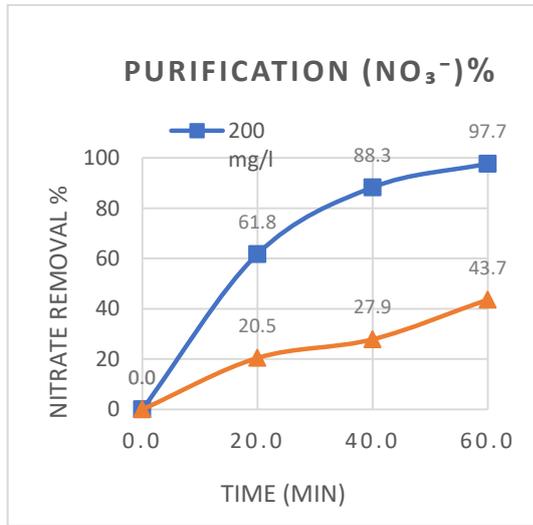


الشكل رقم (5) تأثير كثافة التيار على إزالة النترات، عند تركيز أولي للنترات (200 ملغ/ليتر)

يمكن شرح النتائج بأن زيادة كثافة التيار ستعمل على زيادة أيونات الألمنيوم Al^{+3} المنطلقة من الأنود بحسب قانون فاراداي، مما يزيد من تشكيل المخثرات $Al(OH)_3$. يظهر الشكلان (4) و(5) أيضاً، أن زيادة زمن التماس يعمل على زيادة معدل إزالة النترات، ويمكن تفسير ذلك بحسب قانون فاراداي، بازدياد أيونات الألمنيوم Al^{+3} المنطلقة من الأنود، وبالتالي ازدياد تشكيل المخثرات $Al(OH)_3$. وبالاعتماد على نتائج التجارب السابقة، يظهر الشكلان (6) و(7) انخفاض تركيز النترات بعد ساعة من المعالجة عند كثافات مختلفة للتيار.

حيث يظهر الشكل رقم (6) انخفاض تركيز النترات في المحلول من 800 ملغ/ليتر إلى 449، 677، 204 ملغ/ليتر بعد ساعة واحدة من المعالجة عند كثافات تيار 10 و30 و50 ميلي أمبير/سم² على التوالي.

كما يظهر الشكل رقم (7) انخفاض تركيز النترات في المحلول من 200 ملغ/ليتر إلى 63.8، 4.5 ملغ/ليتر بعد ساعة واحدة من المعالجة عند كثافة تيار 10 و30 ميلي أمبير على التوالي. ويظهر الشكل أيضاً أنه بعد 30 دقيقة فقط من عملية المعالجة عند كثافة تيار 30 ميلي



الشكل رقم (9) تأثير التركيز الأولي للنترات على كفاءة إزالة النترات، عند كثافة تيار (30 ميلي أمبير/سم²)

يمكن شرح ذلك أيضاً بحقيقة أن زيادة التركيز الأولي للنترات يتطلب زيادة في الوقت لإزالة أيونات النترات، لأن أيونات Al المتشكلة لا تكون كافية.

3.3. تأثير الداعم الإلكتروليتي (Supporting Electrolyte):

يستخدم الداعم الإلكتروليتي عادةً للتقليل من سلبية الأقطاب من خلال إزالة طبقة الأكسيد المتشكلة على سطح القطب ومن أجل زيادة ناقلية المحلول واستهلاك الطاقة [22]، حيث تعتبر الناقلية الكهربائية عاملاً مهماً يؤثر على كفاءة إزالة الملوثات واستهلاك الطاقة.

يمكن أن يكون الداعم الإلكتروليتي عبارة عن ملح مثل كلوريد الصوديوم، حيث وجد أيضاً أن تواجد أيونات الكلور يساهم بشكل فعال في تطهير المياه [23-24].

إلا أنه عندما يكون تركيز الملح المضاف مرتفعاً بدرجة كافية، يؤدي ذلك إلى ترسب الأملاح على الأقطاب الكهربائية. وتشكل المادة المترسبة طبقة عازلة تقلل من كفاءة التيار من خلال زيادة الجهد الكهربائي بين الأقطاب الكهربائية [25-26].

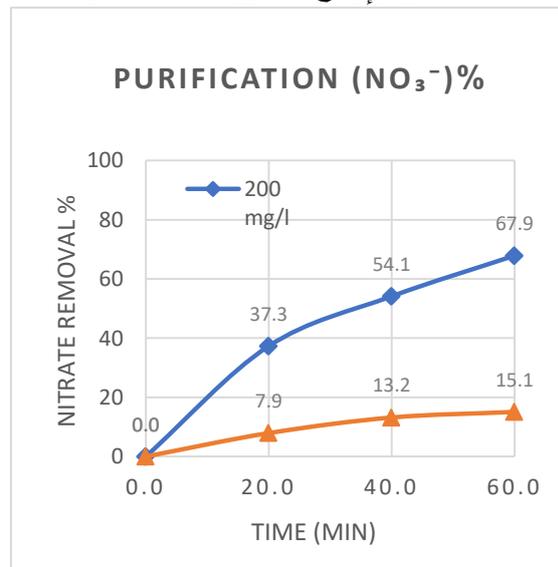
ميلي أمبير/سم². أما من أجل الحصول على مياه بالمواصفة المطلوبة للشرب بتركيز نترات أقل من الحد المسموح، يكون استهلاك الطاقة 57 كيلو واط ساعي/م³، وباعتبار سعر الكيلو واط الساعي 40 ل.س، يكون سعر تنقية المتر المكعب الواحد 2280 ل.س.

3.2. تأثير التركيز الأولي للنترات NO₃⁻:

بمقارنة التجارب المجراة عند التركيزين الأوليين للنترات 800 و 200 ملغ/ليتر، تظهر النتائج ارتفاع كفاءة إزالة النترات من 15.1% إلى 67.9% عند انخفاض التركيز الأولي للنترات من 800 ملغ/ليتر إلى 200 ملغ/ليتر، عند كثافة تيار ثابتة 10 ميلي أمبير/سم².

وكذلك ارتفاعها من 43.7% إلى 97.7% عند كثافة ثابتة للتيار 30 ميلي أمبير/سم². كما هو موضح في الشكلين (8 و 9).

يرجع ذلك إلى أن ازدياد التركيز الأولي للنترات سيعمل على زيادة تنشيط الاستقطاب عبر الامتزاز على الأنود والكاثود، مع ما يترتب على ذلك من انخفاض معدل المنحل عند الأنود وإرجاع الهيدروجين عند الكاثود [22].



الشكل رقم (8) تأثير التركيز الأولي للنترات على كفاءة إزالة النترات، عند كثافة تيار (10 ميلي أمبير/سم²)

٤. الخاتمة

تم اختبار كفاءة عملية التخثير الكهربائي باستخدام التيار المتناوب لإزالة النترات من المياه، وذلك باستعمال أقطاب من الألمنيوم أحادية الوصل.

أظهرت النتائج ازدياد كفاءة إزالة النترات من 15.1% إلى 74.4% بازدياد كثافة التيار المطبق من 10 إلى 50 ميلي أمبير/سم². عند تركيز أولي للنترات 800 ملغ/ليتر. ومن 67.9% إلى 97.7% بازدياد كثافة التيار من 10 إلى 30 ميلي أمبير/سم². عند تركيز أولي للنترات 200 ملغ/ليتر. وبالتالي تم الحصول على مياه بالمواصفة الصالحة للشرب لاحتوائها على تركيز نترات أدنى من الحد المسموح 50 ملغ/ليتر، خلال 30 دقيقة فقط.

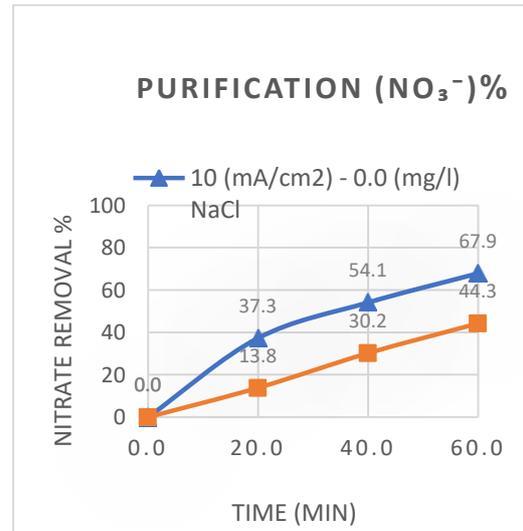
كما أظهرت النتائج ارتفاع كفاءة إزالة النترات بانخفاض التركيز الأولي لها في المياه. وذلك عند كثافة تيار ثابتة. أظهرت النتائج أيضاً أن إضافة داعم إلكتروني من كلوريد الصوديوم يعمل على انخفاض استهلاك الطاقة، إلا أنه قلل من معدل التنقية في هذه التجربة، وقد يُعزى السبب بذلك إلى أن الكمية المضافة كانت كبيرة.

وفقاً لهذه النتائج، يمكن اعتبار عملية التخثير الكهربائي باستخدام التيار المتناوب (AC) عملية مجدية وذات كفاءة عالية في إزالة النترات من المياه، كما تتصف بسرعة المعالجة، والتكلفة المنخفضة.

لم تؤخذ في هذه الدراسة العوامل الأخرى في عين الاعتبار، مثل الرقم الهيدروجيني وتأثير ملوثات المياه الأخرى على كفاءة إزالة النترات. كما أنه لم يتم تحديد الكمية المناسبة للداعم الإلكتروني المضاف.

تم اختبار تأثير إضافة ملح كلوريد الصوديوم NaCl بتركيز 0.8 غ/ليتر على سلسلة واحدة من التجارب عند كثافة تيار 10 ميلي أمبير/سم²، وتركيز أولي للنترات 200 ملغ/ليتر. كما هو موضح في الشكل رقم (10).

أظهرت النتائج انخفاض معدل التنقية عند التركيز المختار من الداعم، ومن ناحية أخرى لوحظ انخفاض في استهلاك الطاقة. يمكن أن يعزى ذلك إلى أن الكمية المختارة من الداعم كانت كبيرة، وإلى حقيقة أن إضافة كمية كبيرة من كلوريد الصوديوم إلى المحلول يزيد من محتوياته من أيونات الصوديوم والكلور، وهذه الزيادة تعزز الناقلية الكهربائية للمحلول، الأمر الذي يزيد كمية المخثرات، مما يتسبب في وجود طبقة عازلة للتيار بين المصاعد والمهابط تعمل على انخفاض قيمة التيار وانخفاض معدل التنقية.



الشكل رقم (10) معدل تنقية النترات بعد 60 دقيقة من المعالجة بإضافة 0.8 غ/ليتر كلوريد الصوديوم

Reference المراجع . ٥

1. Pulkka, S., Martikainen, M., Bhatnagar, A., Sillanpaa, M., Electrochemical methods for the removal of anionic contaminants from water - a review. *Separ. Purif. Technol.*, 2014. 132, 252–271.
2. Koizumi, M., et al., Reduction of nitrate ion using hydrogen permeating Pd foil electrodes. *Res. Chem. Intermed.*, 2006. 32(5), 585–594.
3. Azadeghan, M.M., Alavi Moghaddam, M.R., Maknoon, R., Public awareness and performance regarding nitrate pollution in nitrate-polluted area of Tehran, Iran. *Environ. Eng. Manag. J. (EEMJ)*, 2014. 13 (3), 611–617.
4. Rezaee, A., Godini, H., Dehestani, S., Yazdanbakhsh, A. R., Mosavi, G., and Kazemnejad, A., Biological denitrification by *Pseudomonas stutzeri* immobilized on microbial cellulose. *World J. Microbiol. Biotechnol.*, 2008. 24(11), 2397–2402.
5. Schoeman, J., Steyn, A., Nitrate removal with reverse osmosis in a rural area in South Africa. *Desalination*, 2003. 155(1), 15–26.
6. Rezaee, A., Godini, H., Jorfi, S., Nitrate removal from aqueous solution using MgCl₂ impregnated carbon, *Environ. Eng. Manag. J.*, 2010. Vol. 9, pp.449-452.
7. Gafari, S., Hasan, M., Aroua, M.K., Bio-electrochemical removal of nitrate from water and wastewater—A review. *Bioresour. Technol.*, 2008. 99(10), 3965–3974.
8. Camargo, J. A., Alonso, Á., Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment. *Environ. Int.*, 2006. 32(6), 831–849.
9. Li, M., Feng, C., Zhang, Z., Yang, S., and Sugiura, N., Treatment of nitrate contaminated water using an electrochemical method. *Bioresour. Technol.*, 2010. 101(16), 6553–6557.
10. Koparal, A.S., Ogutveren, U.B., Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation, *Journal of Hazardous Materials* 89 (1) (2002) 83– 94.
11. Essadki, A.H., Gourich, B., Azzi, M., Vial, C., Delmas, H., Kinetic study of defluoridation of drinking water by electrocoagulation/ electroflotation in a stirred tank reactor and in an external-loop airlift reactor. *Chem. Eng. J.*, 2010. 164(1), 106–114.
12. Chorawala, K., Vyas, M., Mehta, M., Feasibility study of electro-coagulation as a treatment method for textile industry wastewater. *IJESRT*, 2014. 3(2), 847–852.
13. Kalyani, K. P., Balasubramanian, N., Srinivasakannan, C., Decolorization and COD reduction of paper industrial effluent using electro-coagulation." *Chem. Eng. J.*, 2009. 151(1), 97–104.
14. Vasudevan, S., Lakshmi, J., Sozhan, G., "Studies on the removal of arsenate from water through electrocoagulation using direct and alternating current". *Desalination and Water Treatment*, 2012. (48) 163–173.
15. Vasudevan, S., Kannan, B.S., Lakshmi, J., Mohanraj, S., Sozhan, G., Effects of alternating and direct current in electrocoagulation process on the removal of fluoride from water. *J Chem Technol Biotechnol*, 2011. 86: 428–436.
16. Heidmann, I., and Calmano, W., Removal of Zn (II), Cu (II), Ni (II), Ag (I) and Cr (VI) present in aqueous solutions by aluminum electrocoagulation. *J. Hazard. Mater.*, 2008. 152(3), 934–941.
17. Yang, Z.-h., Xu, H.-y., Zeng, G.-m., Luo, Y.-l., Yang, X., Huang, J., Wang, L.-k., Song, P.- p., The behavior of dissolution/passivation and the transformation of passive films during electrocoagulation: influences of initial pH, Cr(VI) concentration, and alternating pulsed current. *Electrochimica Acta*, 2015. 153, 149e158.
18. Vasudevan, S., Lakshmi, J., Effects of alternating and direct current in electrocoagulation process on the removal of cadmium from water: a novel approach. *Separ. Purif. Technol*, 2011. 80 (3), 643–651.

19. Cerqueira, A.A., Souza, P.S.A., Marques, M.R.C., Effects of direct and alternating current on the treatment of oily water in an electroflocculation process. *Braz. J. Chem. Eng.*, 2014. 31 (3), 693–701.
20. Biana, Y., Geb, Z., Albanob, C., Lobob, F.L., Ren, Z.J., Oily Bilge Water Treatment Using DC/AC Powered Electrocoagulation. *Environmental Science: Water Research & Technology*. EW-ART-06-2019-000497.R1.
21. Kamaraj, R., Ganesan, P., Lakshmi, J., Vasudevan, S., Removal of copper from water by electrocoagulation process-effect of alternating current (AC) and direct current (DC). *Environ. Sci. Pollut. Control Ser.*, 2013. 20 (1), 399–412.
22. Al Aji, B., Nitrate removal from synthetic industrial wastewater by using electrocoagulation with monopolar Fe-Fe electrodes. *Damascus University Journal For The Engineering Sciences*, 2017. 33 (1) 11-13.
23. Khandegar, V., Saroha, A.K., 2013. Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent e a review. *J. Environ. Manag.* 128, 949-963.
24. Chen, G., 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Sep. Purif. Technol.* 38 (1), 11-41.
25. Hu, C.Y., Lo, S.L., Kuan, W.H., 2003. Effects of co-existing anions on fluoride removal in electrocoagulation (EC) process using aluminum electrodes. *Water Res.* 37 (18), 4513-4523.
26. Trompette, J.L., Vergnes, H., 2009. On the crucial influence of some supportingelectrolytes during electrocoagulation in the presence of aluminum electrodes. *J. Hazard. Mater.* 163 (2-3), 1282-1288.