

تقدير افضل دالة حامضية لازالة النيكل من التربة الملوثة باستخدام الطريقة الكهروحرارية

* احمد علاء حسين¹, محمد جعفر علي²

(1) مدرس مساعد, قسم الهندسة البيئية, الجامعة المستنصرية, بغداد, العراق

(2) مدرس, قسم الهندسة البيئية, الجامعة المستنصرية, بغداد, العراق

الخلاصة: تهدف هذه الدراسة المختبرية لتقدير افضل قيمة ابتدائية للدالة الحامضية المستخدمة في محلول غسل التربة الملوثة صناعيا بالنيكل باستخدام الطريقة الكهروحرارية. تم استخدام ظروف تحسين للطريقة تمثلت بالسيطرة على قيمة الدالة الحامضية وأبار حقن لمحلول الغسل. تم اجراء سبعة تجارب مع السيطرة على قيمة الدالة الحامضية في الانود والكاثود وأبار الحقن بقيم مختلفة تبدأ من 2 الى 8. تم استخدام تربة ملوثة بالنيكل بتركيز 2000 ملغم/كغم ونسبة رطوبة ابتدائية 30 % وفترة معالجة 7 ايام بفرق جهد 1.2 فولت اسم. اظهرت النتائج المختبرية ان افضل كفاءة ازالة كانت 64.7 % عندما تكون قيمة الدالة الحامضية مساوية الى 3.

الكلمات الدالة: تلوث التربة, ازالة النيكل, الطريقة الكهروحرارية, pH, معالجة التربة.

Estimation of Optimum pH For Nickel Removal From Contaminated Soil Using Electro-Kinetic Remediation

Abstract: The aim of this laboratory study is to estimate the best initial pH of purging solution for Nickel clean-up from artificially contaminated soil using electro-kinetic cell. An efficiency enhancement method was employed involving pH control and injection wells as part of the investigative program. Seven tests were performed at different pH controlled in anode; cathode and injection wells start from 2 to 8. Sandy loam soil was contaminated with Nickel concentration equal to 2000 mg/kg and initial moisture content equal to 30%. The duration of remediation was seven days with potential gradient of 1.2 V/cm. The experimental results showed that the best removal efficiency is 64.7% were achieved in pH equal to 3.

1. المقدمة

تلوث التربة بالمعادن الثقيلة المستمدة من مصادر مختلفة بما في ذلك نفايات مناجم التعدين المهجورة والمعالجة غير السليمة للنفايات الصناعية والجمع غير الكامل للبطاريات المستعملة وتسرب المياه الملوثة بالمعادن الثقيلة في اماكن الطمر الصحي، وحوادث نقل المواد الصناعية المشبعة بالمعادن الثقيلة وانسكابها، والأنشطة العسكرية. التلوث غالبا ما يؤثر على مساحة كبيرة من التربة قد تصل الى بعض الكيلو مترات المربعة من مساحة السطح. وهناك أيضا أنواع مختلفة من الأراضي الملوثة مثل حقول الأرز والمزارع ومواقع المصانع وحقول الألبان والمناطق السكنية. وتهدد الملوثات التي تنتقل من هذه المصادر صحة الإنسان في المنطقة المجاورة وإمدادات المياه السطحية والجوفية [1]. تتواجد أيونات المعادن الثقيلة في مياه الفضلات الخارجة من الأنشطة الصناعية المختلفة مثل عمليات التعدين والمداغ وصناعة الالكترونيات والطلاء الكهربائي ومصافي البترول والصناعات البتروكيماوية [2، 3]. يمكن أن تكون المعادن الثقيلة في التربة موجودة كمركبات مذابة مثل الأيونات

والمعادن المعدنية أو في صيغ يمكن ان تكون سهلة التحول. وعادة ما تكون هذه المعادن ثابتة وغير متحركة وذلك لارتباطها مع أجزاء التربة المختلفة والمجاميع المختلفة مثل الكربونات والأكاسيد والهيدروكسيدات والمواد العضوية والمواد المتبقية الأخرى [4]. تصنف سمية المعادن الثقيلة حسب انخفاض السمية كالتالي الزئبق < الكاديوم < النحاس < الزنك < النيكل < الرصاص < الكروم < الألمنيوم < الكوبالت على الرغم من أن هذا التصنيف تقريبي يعتمد على كون المعدن بحالته المفردة أو بصيغة مركب ذلك المعدن. وتختلف السمية أيضا وفقا للظروف البيئية التي تتحكم في الاختلاف الكيميائي للمعادن [5]. تلوث البيئة بعنصر النيكل يؤثر بشكل كبير على النباتات. عنصر النيكل من الملوثات الممكن انتقالها بالرياح ومن المرجح ان تتواجد على اوراق النباتات ويمكن ان يغسل من سطح الاوراق ويصل الى التربة بواسطة الامطار. المواد الصلبة الحيوية هي كذلك مصدر من مصادر النيكل في التربة وكذلك يوجد النيكل في الحمأة الناتجة من محطات معالجة الفضلات ويتواجد فيها بأشكال مخيلية العضوية متاحة بسهولة للنباتات وبالتالي قد تكون سامة للنباتات ويمكن ان ينتقل النيكل في اجزاء النباتات. وتفيد التقارير العلمية ان التوت والحبوب ممكن ان تحتوي على تراكيز مرتفعة من النيكل في حالة زراعتها في تربة ملوثة بالنيكل [6]. واحدة من التقنيات الناشئة لتنظيف التربة الملوثة بالمعادن الثقيلة هي تقنية المعالجة الكهروحرارية (Electro-Kinetic Remediation Technique) والتي ثبت أنها أداة فعالة جدا لمعالجة الملوثات في التربة ذات الحبيبات الدقيقة والنفاذية المنخفضة [7-13]. تتلخص المعالجة الكهروحرارية بتطبيق مجال كهربائي عبر حجم من التربة لنقل الملوثات إلى منطقة معينة حيث يمكن استخلاصها واستخراجها بشكل فعال [14-19]. تتولد من تفاعل التحليل الكهربائي أيونات الهيدروجين الموجبة H^+ وغاز الأوكسجين O_2 عند قطب الأنود وأيونات الهيدروكسيد OH^- السالبة وغاز الهيدروجين H_2 عند قطب الكاثود. قد يسمح للغازات بالهروب إلى الجو في حين أن أيونات الهيدروجين الموجبة H^+ تهاجر نحو قطب الكاثود وتهاجر أيونات الهيدروكسيد السالبة نحو قطب الأنود. اعتمادا على مدى سرعة انتقال أيونات الهيدروجين الموجبة H^+ وأيونات الهيدروكسيد السالبة OH^- تحدث تغيرات في قيمة الدالة الحامضية (pH) في التربة. عموما، تنخفض قيمة الدالة الحامضية (pH) بالقرب من قطب الأنود وترتفع قيمة الدالة الحامضية (pH) بالقرب من قطب الكاثود. وتؤثر التغيرات في قيمة الدالة الحامضية في التربة على العمليات الجيوكيميائية، وهي الامتصاص والامتزاز، والترسيب والتحلل والأكسدة والاختزال [20].

2. التجارب المخبرية

1.1. المواد المستخدمة

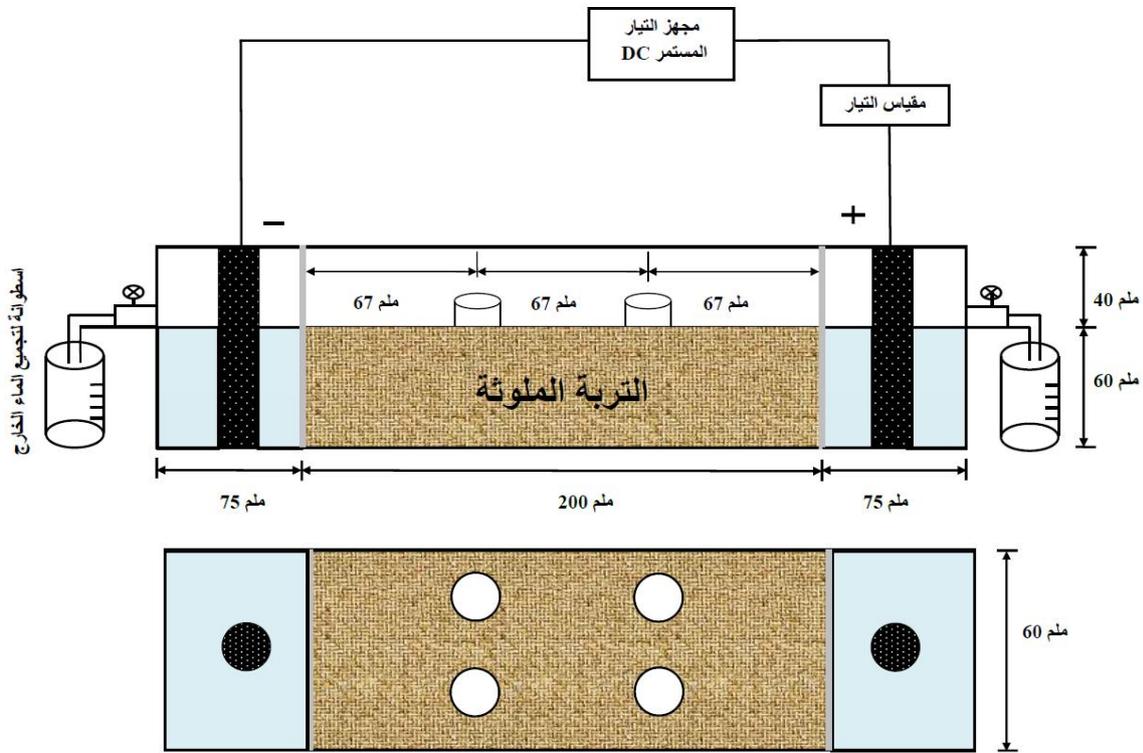
تم اختيار النيكل كملوث ليمثل احد ملوثات المعادن الثقيلة. تم استخدام النيكل بصيغة نترات النيكل المائية $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$. حضرت نماذج من التربة ملوثة بالنيكل بتركيز يساوي 2000 ملغم / كغم و بمحتوى رطوبة ابتدائي يساوي 30%. تم وزن 33.02 غرام من نترات النيكل $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ وتمت اذابتها في لتر واحد من الماء المقطر وتم اضافة 300 مل من هذا المحلول إلى 1 كغم من التربة الجافة. الجدول رقم 1 ملخص لفحص التربة ويمثل مكونات وخصائص التربة التي استعملت في التجربة وتم اختيار نوعية التربة بسبب انتشارها في مواقع زراعية كثيرة. تم تنظيف التربة ونخلها لازالة الجسام الغريبة عنها.

2.2. المنظومة المستخدمة

تتكون الخلية الكهربائية المستخدمة في هذه الدراسة والموضحة في شكل رقم 1 من مكانين لوضع الاقطاب الكهربائية واربعه ابار حقن ومصدر للتيار المستمر DC ومقياس للتيار. الخلية عبارة عن حوض زجاجي بابعاد، الطول 350 ملم × العرض 60 ملم × الارتفاع 100 ملم. الطول الفعلي لعينة التربة في هذه الخلية يساوي 200 ملم، كل طرف من مكان الاقطاب الكهربائية يحتوي على صمام للسيطرة على الجريان في الخلية. تم استخدام صفيحة بلاستيكية مثقبة وورق ترشيح لفصل التربة عند طرفي خلية التربة. قطب الأنود وقطب الكاثود مصنوعان من قضيب الكرافيت بقطر 20 ملم؛ القطر الداخلي لكل بئر من ابار الحقن 12.7 ملم. تم استخدام مصدر الطاقة ثابت الفولتية لتجهيز تيار كهربائي ثابت إلى الأقطاب لإزالة النيكل من التربة الملوثة اصطناعيا. استخدم جهاز قياس الفولتية والتيار الكهربائي لقياس فرق الجهد الكهربائي والتيار المار خلال عينة التربة أثناء عملية الاختبار.

الجدول (1): مواصفات التربة المستخدمة.

الموصفة	القيمة
التوزيع الحبيبي (ASTM D 422)	
رمل (%)	57
غرين (%)	30
طين (%)	13
نسجة التربة	طينية رملية
التوصيلية المائية (cm s^{-1})	2.7×10^{-4}
السعة الكاتونية (meq /100 g)	6.25
pH الدالة الحامضية	7.5
المادة العضوية (%)	0.17
التوصيلية الكهربائية ($\mu\text{S/cm}$)	1380
المسامية (n)	0.42



الشكل (1): رسم توضيحي لمنظومة معالجة التربة.

3.2 التجارب المختبرية

أجريت سبعة تجارب للتحقيق من تأثير قيمة الدالة الحامضية (pH). استخدم حامض النتريك HNO_3 المخفف بالماء المقطر عند قيم مختلفة للدالة الحامضية (2، 3، 4، 5، 6، 7، 8) كمحلول غسل في الأنود والكاثود وأبار الحقن مع تعديل مستمر لقيم الدالة الحامضية. تم تحقيق ذلك بإضافة حامض النتريك HNO_3 وهيدروكسيد الصوديوم NaOH. يوجز الجدول رقم 2 التجارب التي أجريت وظروفها التشغيلية بالتفصيل. استخدم مصدر للطاقة بفولتية 24 فولت في خلية المعالجة الكهروحرارية، وكانت مدة المعالجة لكل نموذج سبعة أيام.

الجدول (2): الظروف التشغيلية للتجارب.

رقم التجربة	الفولتية المستخدمة (فولت)	فترة المعالجة (ايام)	محتوى الرطوبة الابتدائي %	الدالة الحامضية (pH)
1	24	7	30%	2
2	24	7	30%	3
3	24	7	30%	4
4	24	7	30%	5
5	24	7	30%	6
6	24	7	30%	7
7	24	7	30%	8

4.2. طريقة العمل

استخدمت نماذج من التربة ملوثة اصطناعيا بأيونات النيكل في جميع التجارب على المعالجة الكهروحرركية. وزنت الكمية المطلوبة من نترات النيكل ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) التي من شأنها أن تعطي التركيز المطلوب ثم تذوب بشكل تدريجي في الماء المقطر. أضيف المحلول الملوث إلى 1 كغم من التربة الجافة وخط جيدا بمعلقة بلاستيكية في حاوية من البولي إيثيلين. تم إضافة 300 مل من الماء المقطر (30 % محتوى الرطوبة) لتحقيق ظروف الرطوبة الحقلية النموذجية. توضع التربة الملوثة في خلية المعالجة الكهروحرركية على شكل طبقات ، تضغط بشكل جيد باستخدام قضيب خشبي. تترك التربة لمدة 24 ساعة لتحقيق توزيع متوازن للملوث في التربة. تم وضع أوراق الترشيح في جوانب التربة. وبعد ذلك يتم ملئ أماكن الأقطاب في الخلية بمحلول الغسل. يحافظ على ارتفاع مستوى المياه في أماكن الأقطاب باستمرار لمنع حدوث فرق انحدار هيدروليكي في محلول الغسل بين الأقطاب. وبعد ذلك تم توصيل خلية المعالجة الكهروحرركية إلى مصدر الطاقة وتثبيت التيار الكهربائي للخلية لغرض المحافظة استمرار التجهيز. تثبيت قيمة الدالة الحامضية في قطب الأنود ، وقطب الكاثود وآبار الحقن إلى القيمة المطلوبة طوال مدة التجربة. يقاس التيار الكهربائي عبر عينة التربة بمقياس التيار وجريان المياه في فترات زمنية مختلفة طوال مدة التجربة. في نهاية كل تجربة ، عينة التربة تستخرج من داخل الخلية على خمسة أجزاء. ويتم وزن كل جزء ثم يحفظ في وعاء زجاجي. من كل قسم من أجزاء التربة يؤخذ 5 غرام من التربة الجافة وتخلط مع 12.5 مل من الماء المقطر. يرج الخليط جيدا باليد لعدة دقائق ، يترك النموذج لمدة ساعة واحدة لتترسب المواد الصلبة بعدها تقاس الدالة الحامضية pH للتربة [21].

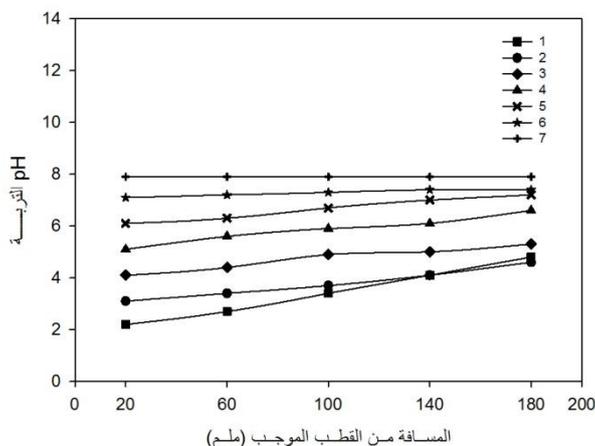
5.2. التحليل الكيميائي للتربة

يستخلص النيكل في أقسام التربة المختلفة بواسطة عملية الهضم الحامضية وفقا للمواصفات الدنماركية (DS 259:2003) (30 دقيقة في 200 كيلو باسكال (120 درجة مئوية) بإضافة 20 مل HNO_3 1:1 إلى 1غم من المادة الجافة ومعاملة العينة في الأوتوكلاف. يفصل السائل من الجسيمات الصلبة عن طريق ضغط تقريغ من خلال مرشح 0.45 ميكرون ويخفف إلى 100 مل. يقاس تركيز النيكل بواسطة مقياس الامتصاص الذري (AAS) [21].

3. النتائج والمناقشة

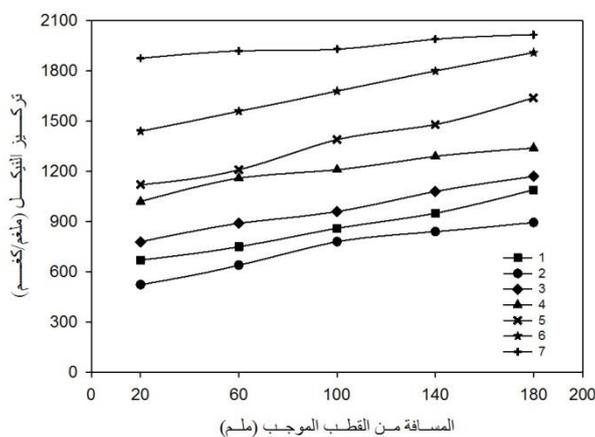
يوضح الشكل رقم 2 العلاقة بين الدالة الحامضية للتربة مقابل المسافة من قطب الأنود بعد نهاية كل تجربة. وكانت قيمة الدالة الحامضية الابتدائية للتربة الطينية الرملية قبل التجربة 7.5. تغيرت قيمة الدالة الحامضية للتربة بسبب هجرة أيونات الهيدروجين الموجبة H^+ من قطب الأنود نحو قطب الكاثود أثناء التحليل الكهربائي للمياه في خلية المعالجة الكهروحرركية [7]. تم إجراء التعديل المستمر للمحافظة على قيمة ثابتة للدالة الحامضية في قطبي الأنود والكاثود وآبار الحقن من التجربة (رقم-1) إلى التجربة (رقم-6) ، وذلك لمنع ترسب الهيدروكسيدات بالقرب من قطب الكاثود بسبب توليد أيون الهيدروكسيد عن طريق التحليل الكهربائي للماء في قطب الكاثود. وأشارت قيمة الدالة الحامضية العالية للتربة (رقم-7) إلى أن بعض أيونات الهيدروكسيد كانت تصل إلى التربة وربما تتدخل في حركة أيونات النيكل. قيمة الدالة الحامضية العالية تسبب تكون راسب من هيدروكسيد النيكل $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ، والذي

يترسب بالقرب من قطب الكاثود وبذلك يقل التوصيل الكهربائي للتربة. وطبقا لهذه النتيجة ، وجدت تراكيز عالية من النيكل بالقرب من قطب الكاثود [22].



الشكل (2): الدالة الحامضية في التربة بعد المعالجة.

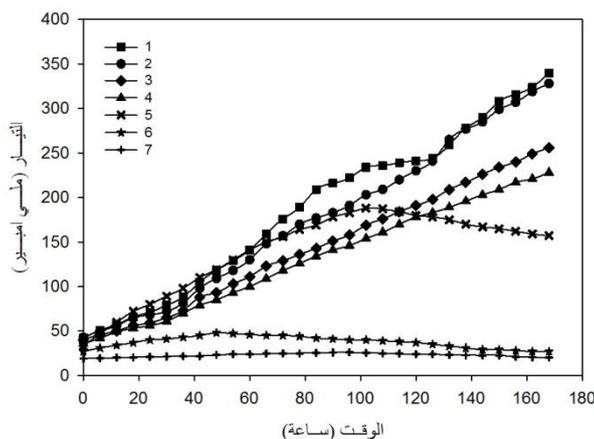
يوضح الشكل رقم 3 العلاقة بين تركيز النيكل والمسافة من قطب الأنود بعد نهاية كل تجربة. كما هو موضح تم انتقال ايونات النيكل من قطب الأنود وتراكمها باتجاه قطب الكاثود. التركيز الابتدائي للنيكل في التربة 2000 ملغم/كغم. التركيز النهائي للنيكل قل وتراوح من 1867-523 ملغم / كغم بالقرب من قطب الأنود إلى 2020-895 ملغم/كغم بالقرب من قطب الكاثود. التغيير في تركيز النيكل في الشكل رقم 3 يشير إلى إزالة النيكل من التربة المستعملة في التجارب من تجربة (رقم-1) إلى تجربة (رقم-7) حيث أنه يلاحظ قيمة التركيز الابتدائي تقل في جميع هذه التجارب ، في حين يلاحظ زيادة في تراكيز النيكل بالقرب من قطب الكاثود.



الشكل (3): تركيز النيكل في التربة بعد المعالجة.

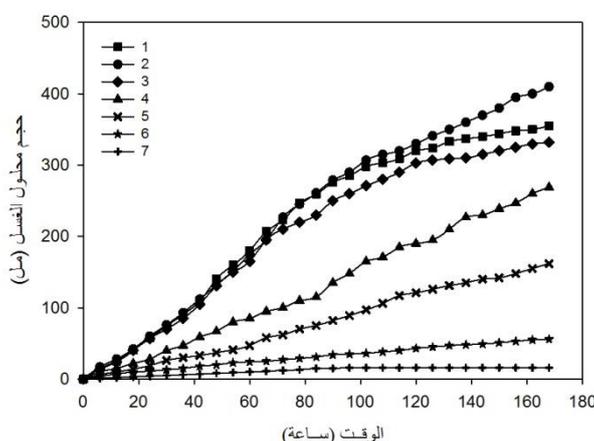
يوضح الشكل رقم 4 تغير قيم التيار الكهربائي خلال التجارب ، حيث تراوحت هذه القيم في بداية التجربة من 42.8-19.2 ملي أمبير والى ان تصل 343-21 ملي أمبير. كما هو مبين في التجربة (رقم-1) إلى التجربة (رقم-4) فان التيار يزداد باستمرار وهذا يشير إلى أن الوقت مهم لزيادة كفاءة الإزالة. وبعبارة أخرى تزداد كفاءة الإزالة عند زيادة وقت المعالجة. بينما في التجربة (رقم-5) نلاحظ زيادة التيار إلى 185 ملي أمبير بعد 103 ساعة، وانخفض التيار واستقر أخيرا إلى 156 ملي أمبير. هذا يشير إلى أن كفاءة الإزالة تنخفض مع مرور الوقت، وكذلك يلاحظ من الشكل رقم 4 ان التجربة (رقم-6) والتجربة (رقم-7) تسلك نفس سلوك التجربة (رقم-5) . ويمكن ان يعزى السبب في ذلك الى إنخفاض الدالة الحامضية في التجربة (رقم-1) إلى التجربة (رقم-4) ساهم بشكل كبير في

تحرير الأيونات الموجبة الموجودة في التربة كأيون الصوديوم مما زاد في التوصيلية الكهربائية للتربة وإنخفاض التيار من الممكن ان يفسر بهجرة هذه الايونات الى قطب الكاثود وهذا التفسير ينطبق مع [4].



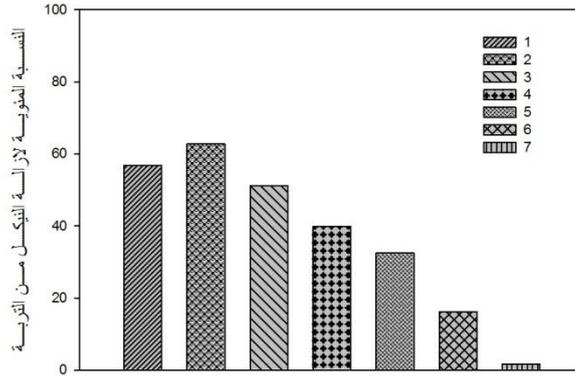
الشكل (4): تغير التيار خلال فترة المعالجة.

جريان محلول الغسل كان من قطب الأنود إلى قطب الكاثود كما موضح في الشكل رقم 5 (العلاقة بين الحجم التراكمي للمحلول والوقت). يلاحظ من الشكل زيادة جريان المحلول مع الوقت في التجربة (رقم-1) إلى التجربة (رقم-6) ، بينما في التجربة (رقم-7) زادت قليلا مع مرور الوقت واستقرت أخيرا عند 16 مل بسبب انسداد المسامات وذلك بسبب ترسب بعض المركبات مثل هيدروكسيدات المعادن في التربة والتي قد تكونت عن طريق التفاعل بين أيونات الهيدروكسيل بالقرب من قطب الكاثود وملوثات المعادن الثقيلة مما يسبب توقف الجريان [22]. وعلاوة على ذلك ، فإن ترسب الكالسيوم (الموجود في التربة) بالقرب من قطب الكاثود يؤدي الى انسداد مسامات التربة وهذا بدوره يقلل من حركة الانتقال لأيونات المعادن الثقيلة لغرض إزالتها [23].



الشكل (5): تغير جريان محلول الغسل خلال فترة المعالجة.

يوضح الشكل رقم 6 الكفاءة الكلية لإزالة النيكل (محسوبة على أساس كتلة النيكل المتبقية في التربة) لجميع التجارب التي أجريت. وكانت كفاءة الإزالة 55.2 % في التجربة (رقم-1) و 64.7 % في التجربة (رقم-2) و 50.6 % في التجربة (رقم-3) و 41.9 % في التجربة (رقم-4) و 33.8 % في التجربة (رقم-5) و 15.3 % في التجربة (رقم-6) و 2.1 % في التجربة (رقم-7). وأظهرت النتائج أن إزالة النيكل في التجربة (رقم-2) كانت الأعلى عندما تكون قيمة الدالة الحامضية تساوي 3 وأقل كفاءة لإزالة للنيكل في التجربة (رقم-7) عندما تكون قيمة الدالة الحامضية تساوي 8 وهذا ينطبق مع [13، 19].



الشكل (6): كفاءة الإزالة للنيكل.

4. الاستنتاجات

- وفقا للنتائج التي تم الحصول عليها من القياسات التجريبية ، يمكن استخلاص الاستنتاجات التالية:
1. قيمة الدالة الحامضية المثلى المساوية الى 3 في قطبي الأنود و الكاثود ، وأبار الحقن كان لها تأثير إيجابي كبير على كفاءة إزالة النيكل خلال فترة المعالجة. عند هذه القيمة للدالة الحامضية ازدادت كفاءة الإزالة للملوثات من خلال تعزيز انتقال الملوثات إلى قطب الكاثود.
 2. زيادة قيم الدالة الحامضية سبب في زيادة تركيز ايون الهيدروكسيد وهذا بدوره سبب ترسيب النيكل على شكل مركب غير قابل للذوبان هو هيدروكسيد النيكل، مما يقلل من كمية النيكل التي يراد إزالتها.
 3. عندما تكون قيمة الدالة الحامضية منخفضة، فان تركيز ايون الهيدروجين الموجب H^+ يكون كبير، مما يسبب تقليل في تدفق الجريان نحو قطب الكاثود المشحون بالشحنة السالبة، مما يسبب في انتقال أكثر لايون الهيدروجين الموجب H^+ لغرض المعادلة مع ايون الهيدروكسيد السالب OH^- المتكونة من قطب الكاثود. إضافة حامض النتريك HNO_3 تؤدي الى انخفاض تركيز ايون الهيدروكسيد، وهذا يقود الى تقليل ترسيب ايون النيكل، وان الانخفاض الكبير في تركيز أيون الهيدروجين الموجب H^+ يؤدي الى انخفاض الجريان ايضا، وهذا يقلل من وصول ايون النيكل Ni^{+2} الى قطب الكاثود كما هو مبين في الشكل رقم 5.
 4. معالجة التربة الملوثة بالطريقة الكهروحرارية هي من التقنيات الصديقة للبيئة، قليلة المخاطر، وهي من التقنيات السهلة والقابلة للتطبيق في التربة ذات النفاذية المنخفضة. ويمكن تسريعها بإضافة حامض النتريك HNO_3 باستخدام آبار الحقن مما يزيد من فعاليتها لإزالة أيون النيكل من التربة الملوثة.
 - 5 - يمكن تسريع انتقال ايونات النيكل بثبوت قيمة الدالة الحامضية عن طريق إدخال آبار حقن الحامض في التربة المعالجة، حيث يتم التحكم في قيمة الدالة الحامضية أيضا بنفس القدر. ومع ذلك تتدخل عوامل أخرى مثل تركيز المحلول المضاف، إجمالي التكاليف الكيميائية المرتبطة باستخدام الحلول المضاف، كلفة الطاقة للحصول على أعلى نسبة لإزالة الملوثات.

5. المراجع

1. Kim, S.O., Moon, S.H., Kim, K.W. (2001). Removal of heavy metals from soils using enhanced electro-kinetic soil processing. Water, Air, and Soil Pollution, Vol. 125, pp. 259-272.
2. Al-Baidhani, J. O. and Al-Salihi, S.T. (2016). Removal of Heavy Metals from Aqueous Solution by Using Low Cost Rice Husk in Batch and Continuous Fluidized Experiments. International Journal of Chemical Engineering and Applications, Vol. 7, pp. 6-10.

3. Cheueh, I. Z. (2005). Ion Exchange Modeling of Silicotitanate Column for Chromium Removal from Argentine Waste, Wisting house Savannah River Company, USA,
4. Srivastava, R.K., Tiwari, R.P., Bala, R. P. (2007). Removal of cadmium using electro-kinetics – effect of enhancement agents. The First Sri Lankan Geotechnical society Int. Conf. on Soil and Rock Engineering, Colombo, Sir Lanka.
5. Gray, N.F. (2005). "Water technology; an introduction for environmental scientist's engineers", 2nd ed., Elsevier Butterworth-Heinemann.
6. Pichtel, J. (2007). Fundamentals of Site Remediation: for Metal- and Hydrocarbon-Contaminated Soils. 2nd ed. Government Institutes.
7. Acar, Y. B.; Alshawabkeh, A. N. (1993). Principles of electro-kinetic remediation. Environ. Sci. Technol., Vol. 27, pp. 2638.
8. Baraud, F.; Tellier, S.; Astruc, M. (1997). Ion velocity in soil solution during electro-kinetic remediation. Journal of Hazardous Materials, Vol. 56, pp. 2638-2647.
9. Baraud, F.; Tellier, S.; Astruc, M. (1999). Temperature effect on ionic transport during soil electro-kinetic treatment at constant pH. Journal of Hazardous Materials, Vol.64, pp. 263-281.
10. Virkutyte J.; Sillanpaa, M.; Latostenmaa P. (2002). Electro-kinetic soil remediation: A critical overview. The Science of the Total Environment, Vol.289, pp. 97-121.
11. Saeedi, M., Jamshidi, A., Shariatmadri, N., Falamaki, A. (2009). An investigation on the efficiency of electro-kinetic coupled with carbon active barrier to remediate nickel contaminated clay. International Journal of Environmental Research, Vol.3, pp. 629-636.
12. Caliman, F. A., Robu, B. M., Smaranda, C., Pavel, V. L., Gavrilescu, M. (2011). Soil and groundwater cleanup: Benefits and limits of emerging technologies. Clean Techn. Environ. Policy, Vol.13, pp. 241-268
13. Faisal, A.A.H, and Hussein, A.A. (2015). An Acidic Injection Well Technique for Enhancement of the Removal of Copper from Contaminated Soil by Electrokinetic Remediation Process. Separation Science and Technology, Vol.50, pp. 2578–2586.
14. Acar, Y.B., Gale R. J., Alshawabkeh, A.N., Marks, R. E., Puppala, S., Bricka, M., and Parker, R. (1995). Electrokinetic remediation: Basics and technology status. Journal of Hazardous Materials, Vol.40, pp. 117-137.
15. Yeung, A. T., Hsu, C., and Menon, R. M. (1997). Physicochemical soil-contaminant interactions during electrokinetic extraction. Journal of Hazardous Materials, Vol.55, pp. 221-137.
16. Kornilovich, B., Mishchuk, N., Abbruzzese, K., Pshinko, G., and Klishchenko, R. (2005). Enhanced electrokinetic remediation of metals-contaminated clay. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, Vol.265, pp. 114-123.
17. Yuan, C. and Chiang, T.-S. (2007). The mechanisms of arsenic removal from soil by electrokinetic process coupled with iron permeable reaction barrier. Chemosphere, Vol.67, pp. 1533-1542.
18. De Battisti, A. (2007). Electrokinetic remediation methods of remediation of soils and ground waters (EREM 2005). Electrochim. Acta. Vol.52, pp. 3345-3348.

19. Elsayed-Ali, A., Abdel-Fattah, T.M., Elsayed-Ali, H.E. (2009). Effect of initial soil pH on copper ion transport in an electro-kinetic cell. Proc. of the 4th IASME / WSEAS Int. Conf. on Energy and Environment (EE'09), pp. 84-87.
20. Reddy, K.R. (2013). Electrokinetic remediation of soils at complex contaminated sites: Technology status, challenges, and opportunities. Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics: From Theoretical and Experimental Research to Practical Applications - Proceedings of the International Symposium, pp. 131-147.
21. Hansen, H.K., Rojo, A., Ottosen, L.M. (2007). Electro-kinetic remediation of copper mine tailings implementing bipolar electrodes. Journal of Electrochimica. Acta., Vol.52, pp. 3355-3359.
22. Page, M.M., and Page, C.L. (2002). Electroremediation of Contaminated Soils. Journal of Environmental Engineering (ASCE), Vol.128, pp. 208-219.
23. Ouhadi, V.R., Yong, R.N., Shariatmadari, N., Saeidijam, S., Goodarzi, A.R., Safari-Zanjani, M. (2010). Impact of carbonate on the efficiency of heavy metal removal from kaolinite soil by the electro-kinetic soil remediation method. Journal of Hazardous Materials, Vol.173, pp. 87-94.