LJAST
Libyan Journal of Applied Science and Technology
مجلة ليبيا للعلوم التطبيقية والتقنية

Volume 12 Issue 02
December 2024
ISSN 2958-6119

تصليب وتثبيث العناصر الثقيلة باستخدام مواد رابطة طبيعية

جميلة جمعة المرابط الدالي[1]، على ابراهيم شرلالة[2]، عبدالباسط عامر الخزوري[3]
[1،2،3] كلية التقنية الهندسية ـجنزور

ملخص:

تعد مشكلة تلوث التربة بالعناصر الثقيلة من أكبر المشاكل البيئية التي لها آثار عكسية في دورة حياة النباتات والإنسان وذلك لخطورة العناصر الثقيلة، وسُمّيتها وتأثيرها المباشر على صحة الإنسان والحيوان في حالة انتقالها إليهم عن طريق الغذاء أو المياه.
وتعمل كل الدول المتقدمة على إزالة تلوث التربة بأسرع وقت، وبعدة طرق يعرف منها المعالجة الحرارية، المعالجة باستخدام المواد الكيميائية، المعالجة باستخدام الطرق الفيزيائية، المعالجة الحيوية والمعالجة عن طريق النباتات، وتختلف هذه الطرق من ناحية سهولة تطبيقها، تكلفتها واحتياجاتها من إمكانيات بشرية ومالية.
من بين هذه الطرق والتي أثبتت نجاحا في إزالة الملوثات الغير عضوية كالعناصر الثقيلة والمركبات السامة، تظهر المعالجة الفيزيائية – الكيميائية باستخدام طريقة التصليب والتثبيت كأحد الطرق السهلة التطبيق، والمنخفضة التكلفة والتي يمكن تطبيقها في دولة ليبيا في إزالة العناصر الثقيلة من التربة الملوثة.
في هذه الدراسة، تمت دراسة إمكانية استخدام طريقة التصليب والتثبيت باستعمال مواد رابطة صديقة للبيئة متوفرة في ليبيا بكميات كبيرة، وبتكلفة اقتصادية منخفضة. النتائج المتحصل عليها أظهرت إمكانية استخدام طين الميثاكاولين في تثبيت العناصر الثقيلة وعدم تسربها وانتشارها في التربة بفعل المياه أو العوامل الجوية، وإمكانية استعمال هذه الطريقة والمادة الرابطة بكفاءة عالية في معالجة التلوث في التربة الملوثة بالعناصر الثقيلة.
كلمات مفتاحية : الجيوبوليمر ،معادن ثقيلة، التصليب والتثبيت ،التلوث الصناعى

المقدمة:

يُعرف أي شكل من أشكال التلوث يمكن أن يتتبع مصدره المباشر للممارسات الصناعية بالتلوث الصناعي، ويمكن إرجاع معظم التلوث الحاصل في معظم دول العالم إلى التطور الصناعي نتيجة لتسببه في تلوث البيئة المحيطة من خلال تلويث المياه والتربة والانبعاثات الغازية الصادرة من هذه المصانع.[1]

في ليبيا، ونظراً لعدم وجود سياسات فعالة للحد من تلوث البيئة، وعدم وجود قوة التنفيذ لتطبيق هذه اللوائح الصادرة من الجهات التشريعية والتنفيذية الخاصة بالحد من التلوث وضرورة معالجة المخلفات الصناعية الخطرة، أدى التلوث الناتج من بعض الصناعات إلى انتشار المركّبات السامة والخطرة والعناصر الثقيلة وانتقالها من مصادرها إلى التربة المحيطة بالمصانع وأماكن التنقيب على النفط والغاز إلى التربة المحيطة والمياه الجوفية والهواء الجوي، وانتقلت من مكان إلى آخر مما أثر في حياة العديد من الناس والكائنات الحية الأخرى [2].

يعتبر التخلص من النفايات الخطرة المحتوية على عناصر ثقيلة وسامة قضية بيئية عالمية خطيرة، تؤدي إلى تلوث التربة والمياه والمحاصيل بالمعادن الثقيلة. ومن أهم المعادن الثقيلة الملوثة والأكثر وجودا في مختلف المخلفات الصناعية النحاس (Cu)والنيكل (Ni) ، الكروم (Cr) ، الرصاص (Pb) , الكادميوم (Cd) ، الزئبق ((Hg) والحديد (Fe) والزرنيخ (As).بعض المعادن الثقيلة، مثل الحديد والنيكل ضرورية لبقاء جميع أشكال الحياة عند تركيزات منخفضة. ومع ذلك، فإن المعادن الثقيلة مثل الرصاص والكادميوم والزئبق مواد سامّة للكائنات الحية عند وجودها بتركيزات منخفضة أو عالية لأنها تساهم في حدوث تشوهات أيضية للكائنات الحية وخاصة مستهلكي الغذاء من النباتات والمحاصيل الأخرى المزروعة فى التربة الملوثة. وقد ساهم التلوث الناجم عن الأنشطة البشرية في زيادة تسرب المعادن الثقيلة في النظام البيئي [3] . ويزداد القلق بشأن التلوث البيئي من المعادن الثقيلة في الغالب

Copyright © LJAST
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة ليبيا للعلوم التطبيقية والتقنية

عند وجود مصادر مختلفة مثل الهباء الجوي الحضري الصناعي، والنفايات الصناعية الصلبة والسائلة، وأنشطة التعدين والصناعات والمواد الكيميائية الزراعية [5,4] فإن تركيزات المعادن الثقيلة في التربة حول مكبات النفايات تتأثر ببعض العوامل بما في ذلك أنواع النفايات والتضاريس والجريان السطحي [3].

تشير الدراسات والأبحاث الى أنه عند دخول المعادن الثقيلة إلى التربة، فإنها تبقى لفترة طويلة وذلك لتركيبة التربة المعقدة، وطبيعتها البيوكيميائية والجيوكيميائية [6]، وبالتالي فإنها تحتفظ بالمعادن الثقيلة لفترة أطول من الهواء والماء [7].

هناك تقنيات مختلفة متاحة لمعالجة واستعادة التربة الملوثة بالمعادن الثقيلة. تتضمن تقنيات المعالجة عادةً عمليات فيزيائية أو كيميائية أو بيولوجية. من بين الطرق المستخدمة لإعادة تأهيل التربة ومعالجتها يتم استخدام المعالجة الهندسية من خلال إضافة كميات كبيرة من التربة النظيفة لتغطية التربة الملوثة أو لخلطها بها [8]. وفى بعض الحالات يتم استخدام المعالجة الكيميائية من خلال استخدام مواد كيميائية تعمل على تنظيف التربة الملوثة وإزالة معقدات المعادن الثقيلة [6]. كما تستعمل طريقة التصليب والتثبيت والتي تعتبر طريقة معالجة فيزيائية – كيميائية يتم فيها تحويل أيونات العناصر الثقيلة إلى مركبات كيميائية يتم امتزازها وحجزُها داخل مواد رابطة صناعية مثل الإسمنت، أو طبيعية مثل بعض أنواع الطين كالبنتونايت والزيولايت أو المواد الطبيعية الشبيهة بالزيولايت كالكاولين والميثاكاولين .[7].

تتضمن طريقة المعالجة باستخدام أنظمة التصليب/التثبيت خلط النفايات (مثل التربة الملوثة) بمادة رابطة (عادةً الأسمنت)، يليه خطوة إضافة الماء وهي الأنسب للنفايات غير العضوية مثل المعادن الثقيلة والنفايات المشعة. تهدف أنظمة التصليب/التثبيت الى تثبيت الملوثات عن طريق تحويلها إلى أشكال أقل قابلية للذوبان (التثبيت)، وتغليفها عن طريق إنشاء مادة صلبة متينة (التصليب). وعادة ما يتم استخدام الإسمنت البورتلاندي والمواد البلاستيكية الحرارية (مثل البيتومين وبوليمرات الكبريت) والجير كعوامل تثبيت أولية في حين تستعمل مواد خبث أفران الصهر المطحونة، ورماد الوقود المسحوق والمواد البوزولانية الطبيعية التي تمتلك خصائص أسمنتيه "مواد رابطة ثانوية" لحاجتها الى مواد أخرى لتصليبها[9] .

في السنوات الأخيرة، ونتيجة للاتجاه نحو الحد من التلوث الناجم عن عمليات تصنيع الإسمنت، أجريت العديد من الأبحاث حول استخدام الجيوبوليمر كبديل للإسمنت في محاولات للحد من الانحباس الحراري العالمي الناتج عن إنتاج الإسمنت [10] .

الجيوبوليمر عبارة عن روابط ألومينوسيليكات منشطة قلويًا تتمتع بقوة ترابط عالية، وقابلية انضغاط عالية وانكماش منخفض وخصائص مقاومة للأحماض وعوامل التعرية [11].

حظيت عملية تصليب/تثبيت المعادن الثقيلة باستخدام الجيوبوليمر باهتمام كبير نظرا لتوفيرها لمنظومة صلبة وتكوينها روابط قوية لتثبيت المعادن الثقيلة، نظرًا لنفاذيتها المنخفضة ومتانتها وخواصها الميكانيكية العالية، وعادة ما تكون قابلية تسرب الملوثات من نفايات الجيوبوليمر المستقرة أقل عمومًا من قابلية تسرب نفايات الإسمنت البورتلاندي المستقرة [12] .

في هذا البحث، تمت دراسة إمكانية استخدام طين الكاولين المتوفر بكميات كبيرة في ليبيا، بعد تحويله إلى الميثاكاولين كمادة رابطة في أنظمة التصليب والتثبيت لتربة ملوثة بعدد من العناصر الثقيلة، وتقييم كفاءة عملية المعالجة باستخدام اختبارات سَمِّية المواد والاختبارات الميكانيكية المستخدمة في هذا المجال.

Copyright © LJAST
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة ليبيا للعلوم التطبيقية والتقنية

المواد وطرق العمل

التربة الملوثة: تم تجميع التربة الملوثة من منطقة صناعية محاطة بعدة ورش ومعامل لخلط طلاءات السيارات، التحاليل الكيميائية والفيزيائية للتربة موضحة في الجدول رقم 1.

جدول رقم 1. الخصائص الفيزيائية ومحتوى التربة الملوثة من العناصر الثقيلة

pH	EC	Pb	Cu	Ni
	-	µS/cm	mg/kg	
8.3	157	42.4	37	**45**

المادة الرابطة

الكاولين والميثاكاولين: تم تجميع عينة من طين الكاولين من منطقة تمنهنت بالقرب من مدينة سبها جنوب ليبيا، وتمت معالجتها حرارياً عند درجة حرارة 750 د. م لتحويلها الى الميثاكاولين، الجدول 2، يوضح التغير في التركيب الكيميائي الذي تم قياسه باستخدام جهاز قياس انبعاث طيف الاشعة السينية XRF Type Rigaku، والتغير في الطور لطين الكاولين الخام، وطين الميثاكاولين باستخدام جهاز قياس حيود الاشعة السينية XRD Burker D8

الإسمنت البورتلاندى:

في هذه الدراسة تم استعمال إسمنت بورتلاندى مُصنّع من شركة الاتحاد العربي للمقاولات – مصنع البرج. المواصفات الكيميائية والأطوار الموجودة في العينة موضحة كذلك في جدول رقم 2.

جدول رقم 2. التحليل الكيميائي وأطوار المواد الرابطة المستخدمة في أنظمة التصليب والتثبيت

XRF analysis (wt. %)			
Constituent	**OPC**	**Kaolin**	**Metakaolin**
SiO_2	21.2	47.0	54.0
TiO_2	0.32	0.00	0.00
Al_2O_3	5.43	39.0	46.0
Fe_2O_3	3.68	0.70	0.78
Mn_3O_4	0.02	0.00	0.00
MgO	1.76	0.14	0.16
CaO	64.5	3.24	3.60
Na_2O	0.10	0.40	0.40
K_2O	0.73	1.45	1.60

Copyright © LJAST
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة ليبيا للعلوم التطبيقية والتقنية

P_2O_5	0.17	0.01	0.00
SO_3	1.54	0.00	0.00
LOI	1.32	12.3	0.13

XRD Analysis	
OPC	Calcite $CaCO_3$, Calcium silicate Ca_3SiO_5, Lamite Ca_2SiO_4 , Brownmillerite $(Ca_2(Al,Fe^{+3})_2$
Kaolin	Kaolinite $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, Quart SiO_2
Metakaolin	Kaolinite $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, Quartz SiO_2

لتصليب أنظمة الإسمنت التي تتصلب من خلال تفاعلها مع الماء، تم استعمال ماء خالى من الأملاح، ولتصليب أنظمة الجيوبوليمر تم استخدام محاليل بتركيز 10 مولارى (M) تم تحضيرها بإذابة الكمية المناسبة من هيدروكسيد البوتاسيوم عالية النقاوة المصنعة من شركة Labbox-Spain

طريقة إعداد أنظمة التصليب والتثبيت

لإعداد أنظمة التصليب والثبيت المستخدمة للأسمنت البورتلاندى كمادة رابطة (PC-Mix.)، تم خلط الكميات الموضحة في الجدول رقم 3 ، من الإسمنت، التربة الملوثة وهي في الصورة الصلبة باستخدام خلاط كهربائي بسرعة خلط 150 دورة في الدقيقة، ثم إضافة الكمية الموضحة في نفس الجدول من الركام، وإضافة الماء الخالي من الاملاح. وبعد خلط المواد خلطاً جيداً بحيث لا تتزاوج تتجاوز كمية المياه 25% من كمية المواد الصلبة، ثم صب الخليط في قالب أسطواني مُعَد مسبقاً بأبعاد (طول 10 سم، قطر 5 سم) وتجفيفها في الهواء لمدة 28 يوم، مع رشها بالماء على فترات زمنية متكررة خلال الفترة الزمنية اللازمة لزيادة تصلبها.

بالنسبة لأنظمة التصليب والتثبيت المستخدمة لطين الميثاكاولين كمادة رابطة وتفاعل الجيوبوليمر(MK-Mix)، تم خلط الكميات الموضحة في الجدول 3 ، من طين الميثاكاولين، التربة الملوثة، الركام، وإضافة كمِّية لا تتعدى 25 % من إجمالي وزن المواد الصلبة من محلول هيدروكسيد البوتاسيوم وخلط المواد جيداً وصبِّها في القالب المُعَد مسبقا بنفس الأبعاد الموضحة أعلاه، وتعريضها للهواء الجوي لفترة 28 يوم.

جدول 3. مكونات أنظمة التصليب والتثبيت

النظام	الاسمنت	ميثاكاولين	التربة الملوثة	الركام	الماء	محلول 10M هيدروكسيد البوتاسيوم
	gram	gram	gram	gram	(ml)	**(ml)**
PC1	325	-	750	150	285	**-**
MK1	-	325	750	150	-	**285**

تم تصميم واعداد خلطات الجيوبلمر حسب الظروف الموضحة في الجدول 4:

Copyright © LJAST
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة ليبيا للعلوم التطبيقية والتقنية

جدول 4. ظروف تصميم واعداد خلطات جيوبلمر الميثاكاولين

نوع وتركيز المنشط القاعدى	النسبة المولية Si/Al	سرعة الخلط	مدة الخلط	الاس الهيدروجيني للخليط
هيدروكسيد البوتاسيوم	mol. ratio	rpm	min.	-
10M	2.1	2000	10	12.5

تقييم كفاءة أنظمة التصليب والتثبيت في الحد من تسرب العناصر الثقيلة

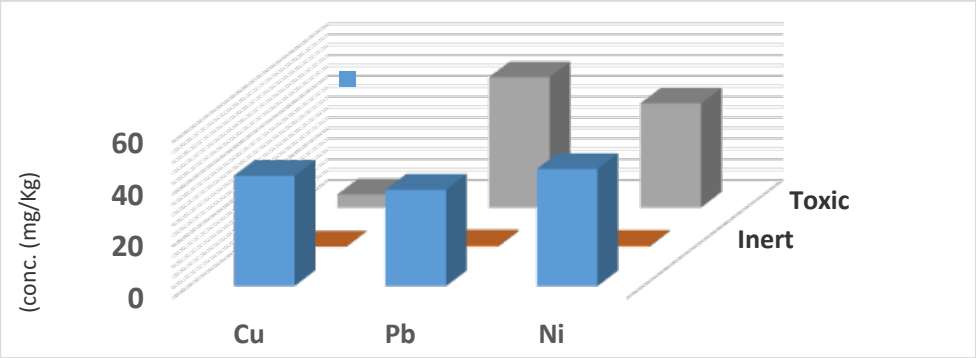
لتقييم كفاءة أنظمة المعالجة في هذه الدراسة، تم البدء في إجراء اختبارات قوة الإنضِغاطِية الذي يتحمله أي نظام قبل الوصول إلى الإنهيار. العينات من النظامين المختبرين في هذه الدراسة باستخدام آلة اختبار قوّة الضغط نوع وفقاً للمواصفة الأوروبية EN196-1- 2006 ، تم اجراء اختبار امتصاصية الماء، واختبارات الكثافة وفق المواصفة الأمريكية ASTM C-642

ولإجراء اختبارات لقياس فاعلية أنظمة المعالجة المقترحة في تثبيت العناصر الثقيلة، تم إجراء اختبار السمية (اختبار الغسيل) لمعرفة نجاح أنظمة التصليب والتثبيت في الحد من تسرب العناصر الثقيلة من كل نظام حسب المواصفات الأوروبية (BS EN 12457) والتي يتم فيها وضع كمية من كل نظام بعد طحنها إلى حجم أقل من (4 mm) في أنابيب اختبار، وإضافة 10 أضعافها من الماء الخالي من الاملاح ، ووضعها في جهاز هزاز لمدة 24 ساعة لاستخلاص أكبر قدر من المعادن الثقيلة من هذه الأنظمة، تم قياس تركيز العناصر الثقيلة في الطور السائل بعد تصفية المواد العالقة باستخدام جهاز الامتصاص الذرى نوع Agilant -USA

مناقشة النتائج

نتائج اختبار سُمِّية التربة الملوثة أظهر أن التربة تحتوي على عناصر ثقيلة بتركيز عالية مقارنة باللوائح العالمية التي تصنف مدى سُمِّية التربة، وأن هذه التربة تعتبر مخلفات خطرة وتحتاج إلى معالجة لمنع تسرب هذه العناصر الثقيلة إلى البيئة المحيطة.

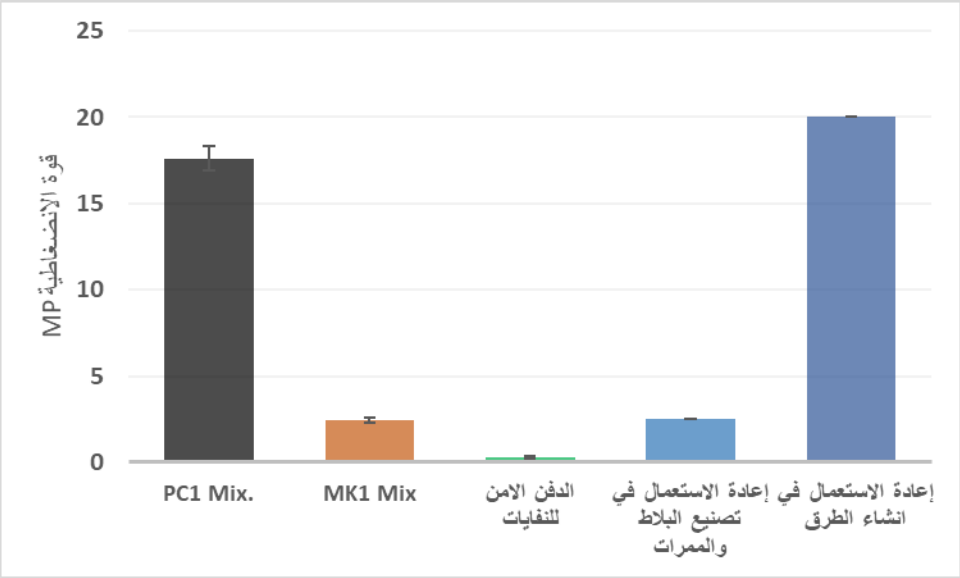
الشكل رقم 1، وضّح أن تركيزات عناصر النحاس، الرصاص والنيكل تعدّت المسموح به في اللوائح الصادرة عن الإتحاد الأوروبي (Council Decision annex 2003/33/EC) وبالتالي يستوجب معالجتها وتثبيتها لمنع انتشارها بفعل الأمطار أو الرياح إلى البيئة المحيطة كالمياه الجوفية أو التربة المحيطة بمكان التلوث .



شكل 1. مقارنة نتائج تحليل التربة بلوائح تصنيف التربة الاوربية رقم(Council Decision annex 2003/33/EC)

Copyright © LJAST
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة ليبيا للعلوم التطبيقية والتقنية

أظهرت النتائج أن جميع الخلطات التي تم تصليبها وتثبيتها بالإسمنت العادي، أو باستخدام طين الميثاكاولين قد أنتجت عيّنات صلبة متماسكة وهو ما يعتبر دليل على نجاح عمليات التصليب والتثبيت من خلال إنتاج خليط متجانس صلب بدون عيوب كما مُوضّح بالشكل التالى :



شكل2 . نتائج اختبار قوة انضغاطية القوالب الخرسانية باستخدام الإسمنت أو الميثاكاولين كمواد رابطة

النتائج المتحصل عليها تشير إلى إمكانية الدفن الآمن للتربة الملوثة التي تم تصليبها وتثبيت العناصر الثقيلة الموجودة بها دون الخوف من احتمالية تسربها إلى المياه الجوفية أو البيئة المحيطة حسب متطلبات المنظمة الأمريكية لحماية البيئة حسب المواصفة EPA USA 1991-2004 [13]. و أنه بالإمكان إعادة استخدام النظامين في تصنيع الممرات والأرصفة حسب المواصفة الإنجليزية رقم BS 6073 -1991 [14]، و أن نظامي المعالجة في هذه الدراسة لم تحقق قوة الانضغاطية المطلوبة لإعادة الاستعمال في انشاء الطرق حسب المواصفة الامريكية رقم ACI 201.2R-16, . [15]لأنها تحتاج الى انضغاطية بقيمة(20 MPa على الأقل)

النتائج تؤكد أنه بالإمكان استخدام طين الميثاكاولين المتوفر محلياً وبتكلفة بسيطة جداً كبديل للإسمنت في معالجة تلوث التربة بطريقة التصليب والتثبيت لمعالجة التلوث بالعناصر الثقيلة، وهو ما يوفر بديل مستدام وبتكلفة منخفضة.

تحاليل وقياسات سُمِّية التربة قبل وبعد عملية التصليب والتثبيت، أظهرت كفاءة عملية تثبيت العناصر الثقيلة باستخدام مواد الإسمنت والميثاكاولين كمواد رابطة، مع وجود أفضلية لمادة الميثاكاولين بحيث وصلت كفاءة المعالجة الى 99.6 % كما هو مُوضّح بالجداول التالية

Copyright © LJAST
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة ليبيا للعلوم التطبيقية والتقنية

Volume 12 Issue 02
December 2024
ISSN 2958-6119

جدول 5. كفاءة عملية تصليب وتثبيت العناصر الثقيلة باستخدام الإسمنت كمادة رابطة

ت.	العنصر الثقيل	الوحدات	نتائج اختبار الثبيت		المخلفات الامنة	المخلفات الخطرة	كفأة عملية التصليب والثبيت
			قبل المعالجة	بعد المعالجة			
1	**Cupper**	mg/Kg	42.4	0.09	0.04	5.0	**99.75**
2	**Lead**	mg/Kg	37	0.01	0.5	50.0	**99.95**
3	**Nickel**	mg/Kg	45	0.03	0.4	40.0	**99.93**

جدول 6. كفاءة عملية تصليب وتثبيت العناصر الثقيلة باستخدام الميثاكاولين كمادة رابطة

ت.	العنصر الثقيل	الوحدات	نتائج اختبار الثبيت		المخلفات الامنة	المخلفات الخطرة	كفأة عملية التصليب والثبيت
			قبل المعالجة	بعد المعالجة			
1	**Cupper**	mg/Kg	42.4	0.05	0.04	5.0	**99.88**
2	**Lead**	mg/Kg	37	0.015	0.5	50.0	**99.99**
3	**Nickel**	mg/Kg	45	0.01	0.4	40.0	**99.98**

الخلاصة:

نتائج هذا البحث أكدت على أن استخدام الجيوبوليمرات المتكونة من الميثاكاولين كمادة رابطة، وهيدروكسيد البوتاسيوم كمنشط قاعدي قادرة على تثبيت العناصر الثقيلة كالرصاص، النيكل والنحاس وتحويلها إلى مركبات كيميائية، وبالتالي تمت إعاقة حركتها وتسربها خارج المنظومة الصلبة عن طريق عدة آليات، منها تكوين روابط كيميائية جديدة أدت إلى تحويلها من أيونات إلى مركبات كيميائية تم ترسيبها داخل الفراغات والبنية الداخلية ، أو امتزازها على سطح وداخل البنية الداخلية للنظام المتصلب ، أو تغليفها داخل الأنظمة الصلبة الناتجة من تفاعل الجوبلمرة بين الميثاكاولين والمنشط القاعدي ، أو تفاعل التميؤ الخاص بأنظمة الإسمنت ، وبالتالي تحويل التربة الملوثة إلى مخلفات آمنة يمكن دفنها دفن آمن في مكبّات المخلفات الصناعية دون الخوف من تسرُبها الى البيئة المحيطة أو المياه الجوفية ، أو إعادة استعمال الخرسانات الناتجة من تفاعل جيوبلمرة الميثاكاولين والتربة الملوثة أو الإسمنت والتربة المُلوّثة في الأعمال الإنشائية كرصف الطرق والممرات أو صناعة البلاط.

النتائج أظهرت ان أنظمة الجيوبوليمرات المتكونة من الميثاكاولين والتربة الملوثة والمنشطة قاعدياً باستخدام هيدروكسيد البوتاسيوم أنتجت أنظمة بخواص ميكانيكية وقدرة عالية على ثبيت العناصر الثقيلة تؤهلها لمنافسة الأنظمة المتكونة باستخدام الإسمنت كمادة رابطة، وبالتالي إمكانية توفيرها لأنظمة بديلة صديقة للبيئة وبتكلفة اقتصادية منخفضة.

Copyright © LJAST
حقوق الطبع محفوظة
لمجلة ليبيا للعلوم التطبيقية والتقنية

References

[1] A. K. Priya, Muthiah Muruganandam, Sameh S. Ali, Michael Kornaros. Clean-Up of Heavy Metals from Contaminated Soil by Phytoremediation: A Multidisciplinary and Eco-Friendly Approach. Toxics vol.11, p. 422 (2023)

[2] Abdur Rashid, Brian J. Schutte, April Ulery. Heavy Metal Contamination in Agricultural Soil:

Environmental Pollutants Affecting Crop Health. Agronomy vol. 13,p. 1521(2023).

[3] Bakshi S, Banik C and He Z . The impact of heavy metal contamination on soil health, In: Managing soil health for sustainable agriculture (Reicosky, ed.),vol. 2(8) p. 1–36.(2018)

[4] Rasmussen C, Matsuyama N, Randy A, Dahlgren, Randal J and Southard NB. Soil genesis and mineral transformation across an environmental gradient on andesitic lahar. Soil Sci. Soc. Am. J., vol.71(1): p.225–237 (2007).

[5] Agbemafle R, Elsie Aggo S, Akutey O and Bentum JK (2019) Heavy metal concentrations in leachates and crops grown around waste dumpsites in Sekondi-Takoradi in the Western Region of Ghana. Res. J. Environ. Toxicol., vol.14(1): p.16–25. (2019)

[6] Alloway BJ and Jackson AP .The behaviour of heavy metals in sewage sludge-amended soils. Sci. Total Environ., vol. 100(3):p. 151–176. (1990)

[7] Kamari A .Chitosans as soil amendments for the remediation of metal contaminated soil. PhD thesis, University of Glasgow.(2011)

[8] Zheng XS, Lu AH, Gao X, et al. . Contamination of heavy metals in soil present situation and metho method. Soils Environ. Sci., vol.11(1):p. 79–54.(2019).

[9] Lisheng Guo, Xin Xu, Qing Wang, Junboum Park,, Haomin Lei, Zhou. Machine learning-based prediction of heavy metal immobilization rate in the solidification/stabilization of municipal solid waste incineration fly ash (MSWIFA) by geopolymers. Journal of Hazardous Materials. Volume 467 (2024).

[10] Yuchi Chen, Fangyuan Chen, Fan Zhou, Meng Lu. Early solidification/stabilization mechanism of heavy metals (Pb, Cr and Zn) in Shell coal gasification fly ash based geopolymer. Science of The Total Environment. Vol.102.(2022).

[11] Quanzhi Tian, Yingchu Bai, Yinhai Pan. Application of Geopolymer in Stabilization/Solidification of Hazardous Pollutants: A Review. Molecules, 27, 4570 (2022)

[12] Xupicheng Ren, Fan Wang, Xiang Hec ,Xiaomin Hu. Resistance and durability of fly ash based geopolymer for heavy metal immobilization:properties and mechanism. RSC Adv., (2024)

Copyright © LJAST

حقوق الطبع محفوظة
لمجلة ليبيا للعلوم التطبيقية والتقنية

[13] Qian, G., CAO, Y., CHUI, P. and TAY, J.Utilization of MSWI fly ash for stabilization/solidification of industrial waste sludge. Journal of Hazardous Materials, vol. 129(1-3), pp.274-281 (2006).

[14] BS 6073-1:1981 Precast concrete masonry units. Specification for precast concrete masonry units (AMD 3944) (AMD 4462)

[15] NRC (National Research Council) (1991) Opportunities in the Hydrologic Sciences. National Academies Press, Washington DC.

LJAST
مجلة ليبيا للعلوم التطبيقية والتقنية

Copyright © LJAST

حقوق الطبع محفوظة
لمجلة ليبيا للعلوم التطبيقية والتقنية