



Comparison of Enhancement in Cement-Based Stabilization/Solidification of Lead-Contaminated Bentonite Using Calcium Hydroxide and Sodium Hydroxide

Received: 2024.11.19

Accepted: 2025.04.18

Behnam Yousefi,¹ Vahid Reza Ouhadi^{2*}

¹ Ph.D Student of
Geotechnical Engineering,
Faculty of Eng., Bu-Ali Sina
University, Hamedan, Iran

² Civil Eng. Department,
Faculty of Eng., Bu-Ali Sina
Univ., Hamedan, Iran and
Department of
Environmental Eng., School
of Civil Engineering,
University of Tehran,
Tehran, Iran

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Soil contamination by heavy metals poses a serious threat to the environment and human health. The U.S. Environmental Protection Agency (EPA) has identified cement-based stabilization and solidification (S/S) as the most effective method to control the mobility of contaminants. The cement hydration process increases the pH of the environment through the production of calcium hydroxide, stabilizing the contaminants. Subsequently, pozzolanic reactions encapsulate the contaminants. However, environmental concerns regarding cement production present a global challenge. This study focuses on comparing the mechanisms controlling the S/S process of lead-contaminated bentonite using cement, along with the alkaline enhancing agents calcium hydroxide and sodium hydroxide, with the goal of reducing cement consumption.

Materials and Methods: This study specifically examines the pH elevation and its impact on the stabilization process. A series of pH adjustment, leachability (TCLP), and X-ray diffraction (XRD) tests were conducted. Bentonite soil was contaminated with 100 cmol/kg-soil of lead and then stabilized/solidified with 10% and 15% by weight of cement. To analyze the stabilization mechanism, the pH of the contaminated soil was adjusted to 10, 11, and 12 using incremental additions of calcium hydroxide and sodium hydroxide, corresponding to the pH range for the precipitation of lead heavy metal. To investigate cement reduction, stabilized soil with calcium hydroxide was solidified with 5%, 7.5%, 10%, and 15% cement.

Results and Discussion: Due to its significant cation exchange capacity, the presence of calcium carbonate, and large specific surface area, bentonite soil alone can retain about 50% of the applied contamination in the TCLP test, preventing its transfer to the environment. In cement-based S/S processes, if heavy metal contamination exceeds the soil's retention capacity, stabilization is required before encapsulation. Given the amphoteric properties of lead, the soil's pH must be adjusted to the range of 10–12 to stabilize lead ions through oxide-hydroxide phases. Accordingly, the amount of cement used must provide the necessary initial pH increase for stabilization. TCLP and XRD results show that in the S/S process, as pH increases, the retention phase transitions from carbonate to the more stable oxide-hydroxide phase, enhancing contaminant retention in the TCLP test. In soils stabilized with calcium hydroxide, the formation of cementitious products results in greater contaminant retention compared to sodium hydroxide-stabilized soils. However, desorption levels still do not meet the EPA standard limit (<5 mg/L). Achieving this limit requires the presence of cement and solidification mechanisms facilitated by cementitious products. By enhancing contaminated soil with calcium hydroxide and stabilizing free contaminants, cement consumption can be reduced.

Conclusion: Stabilization of heavy metal-contaminated soils with calcium hydroxide and sodium hydroxide and evaluating desorption levels in the TCLP test indicate that an optimal pH of 11 is most effective. The findings suggest that using calcium hydroxide as an enhancer not only activates the oxide-hydroxide precipitation mechanism but also enhances solidification mechanisms. This improved performance makes calcium hydroxide a more effective enhancer in the cement-based S/S process for soils containing heavy metal contaminants like lead. Intensification with calcium hydroxide reduces cement consumption by 33% compared to non-enhanced conditions in the cement-based S/S method.

Keywords: Cement-based stabilization/solidification, Contaminant precipitation, Enhancement, TCLP.

How to cite this article:

Yousefi, B., and Ouhadi V.R. 2026. The Impact of Agricultural Growth and Energy Consumption on Greenhouse Gas Emissions and Environmental Quality in Middle Eastern Countries. *Adv. Environ. Sci.* 23(4): 991-1008.

* Corresponding Author Email Address: vahidouhadi@basu.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2025.237612.1458



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

مقایسه شدت بخشی تثبیت/جامدسازی پایه سیمانی بنتونیت آلوده به سرب با کلسیم هیدروکسید و سدیم هیدروکسید

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۹

بهنام یوسفی^۱، وحیدرضا اوحدی^{۲*}^۱ گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران^۲ گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران و گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده مبسوط

سابقه و هدف: آلودگی خاک توسط فلزات سنگین تهدیدی جدی برای محیط زیست و سلامت انسان محسوب می شود. سازمان حفاظت از محیط زیست آمریکا، روش تثبیت و جامدسازی پایه سیمانی را بهترین راهکار برای کنترل انتقال آلاینده ها معرفی کرده است. هیدراسیون سیمان با تولید کلسیم هیدروکسید، pH محیط را افزایش داده و موجب تثبیت آلاینده شده و سپس با شکل گیری واکنش های پوزولانی، کپسوله سازی آلاینده ها صورت می گیرد. با این وجود، مشکلات ناشی از تولید سیمان به عنوان یک چالش جهانی برای محیط زیست مطرح است. هدف اصلی این تحقیق، مقایسه اثر دو عامل قلیایی، هیدروکسید کلسیم و هیدروکسید سدیم، بر تثبیت و جامدسازی خاک های آلوده به سرب با استفاده از سیمان است. این تحقیق به بررسی مکانیسم های کنترل کننده فرآیند تثبیت/جامدسازی (S/S) و اثر افزایش pH بر نگهداری آلاینده ها می پردازد.

مواد و روش ها: این مطالعه، به طور ویژه بر افزایش pH محیط و تحلیل تأثیر آن بر فرآیند تثبیت متمرکز شده است. بدین منظور یک مجموعه آزمایش pH، روش شست و شوی مشخصه سمیت (TCLP)^۱ و پراش پرتو ایکس انجام شده است. در این پژوهش نتونیت با غلظت ۱۰۰ cmol/kg-soil با فلز سنگین سرب آلوده شده و سپس با ۱۰ درصد و ۱۵ درصد وزنی سیمان تثبیت/جامدسازی شده است. برای تجزیه و تحلیل مکانیزم تثبیت، pH خاک آلوده به صورت جداگانه با افزودن تدریجی کلسیم هیدروکسید و سدیم هیدروکسید در مقادیر pH ۱۰، ۱۱ و ۱۲ تنظیم شده است، که منطبق بر دامنه pH رسوب فلز سنگین سرب است. برای بررسی کاهش مصرف سیمان، خاک تثبیت شده با کلسیم هیدروکسید با مقادیر ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۵ درصد سیمان جامدسازی شده است.

نتایج و بحث: خاک بنتونیت به دلیل داشتن ظرفیت تبادل کاتیونی قابل توجه، وجود کلسیم کربنات و سطح مخصوص زیاد، قادر است در آزمایش روش شست و شوی مشخصه سمیت، به تنهایی حدود ۵۰ درصد از مقدار آلودگی که به آن اعمال می شود را نگهداری کند. در فرآیند تثبیت و جامدسازی پایه سیمانی، در صورتی که آلودگی فلز سنگین بیش از ظرفیت نگهداشت خاک باشد، لازم است که این آلاینده تثبیت شود و سپس شرایط برای کپسوله کردن آن فراهم شود. به همین دلیل، با توجه به ویژگی آمفوتریک (Amphoteric) آلاینده فلز سنگین سرب، لازم است pH خاک آلوده در محدوده مقادیر ۱۰ تا ۱۲ تنظیم شود تا یون سرب توسط فاز اکسید-هیدروکسید تثبیت شود. بر این اساس مقدار سیمان مصرفی می بایست شرط تثبیت آلاینده آزاد را به واسطه افزایش pH اولیه تامین کند. نتایج حاصل نشان می دهد که در فرآیند تثبیت/جامدسازی، در مکانیزم تثبیت، با افزایش pH، فاز نگهداشت کربنات به فاز اکسید-هیدروکسید که پایدارتر است تبدیل می شود. همین امر سبب افزایش مقدار نگهداشت آلاینده در آزمایش آبشویی آلودگی شده است. در خاک تثبیت شده با کلسیم هیدروکسید به دلیل تشکیل محصولات سیمانی، مقدار نگهداشت آلاینده در فرآیند آبشویی آلودگی بیش از خاک تثبیت شده با سدیم هیدروکسید است. با این وجود، سطح واژدی هنوز به حد مجاز استاندارد EPA (کمتر از ۵ میلی گرم بر لیتر) نمی رسد. برای دستیابی به این حد مجاز، حضور سیمان و مکانیزم جامدسازی توسط محصولات سیمانی الزامی است. در صورت شدت بخشی خاک آلوده توسط کلسیم هیدروکسید و تثبیت آلاینده آزاد، می توان مصرف سیمان را کاهش داد.

نتیجه گیری: تثبیت خاک های آلوده به فلز سنگین با کلسیم هیدروکسید و سدیم هیدروکسید و ارزیابی میزان واژدی نشان می دهد که بهترین مقدار pH در این فرآیند حصول pH ۱۱ است. نتایج تحقیق حاضر حاکی از آن است که استفاده از ماده شدت بخشی کلسیم هیدروکسید سبب می شود تا علاوه بر فعال شدن مکانیزم تشکیل رسوب اکسید-هیدروکسید، مکانیزم های جامدسازی نیز فعال تر شود. همین موضوع سبب عملکرد بهتر کلسیم هیدروکسید به عنوان ماده شدت بخشی در فرآیند جامدسازی پایه سیمانی خاک حاوی آلاینده فلز سنگین سرب شده است. شدت بخشی با کلسیم هیدروکسید سبب کاهش میزان مصرف سیمان به میزان ۳۳ درصد نسبت به شرایط غیر شدت بخشی در روش تثبیت/جامدسازی پایه سیمانی شده است.

واژه های کلیدی: تثبیت/جامدسازی پایه سیمانی، رسوب آلاینده، شدت بخشی، TCLP

استناد به این مقاله: یوسفی، ب. و. ر. اوحدی. ۱۴۰۴. مقایسه شدت بخشی تثبیت/جامدسازی پایه سیمانی بنتونیت آلوده به سرب با کلسیم هیدروکسید و سدیم هیدروکسید. فصلنامه علوم محیطی نوین. ۲۳(۴): ۹۹۱-۱۰۰۸.

* Corresponding Author Email Address: vahidouhadi@basu.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2025.237612.1458



مقدمه

گسترده‌تری زیاد آن در طبیعت است (Muthu et al., 2018). اساس کاربرد تمام روش‌ها در ممانعت از انتقال آلاینده خطرناک در خاک، تبدیل مواد سمی به مواد بی‌اثر و پایدار از نظر فیزیکی، قابلیت ایجاد شیرابه‌زایی اندک و استحکام کافی برای فعالیت‌های اجرایی در زمین است (Yang et al., 2019). استفاده از سیمان، آهک و خاکستر بادی در تثبیت و جامدسازی، به‌عنوان روشی موثر برای کاهش قابلیت انتشار فلزات سنگین در خاک‌های آلوده شناخته شده‌اند (Liu et al., 2023). در مکانیزم تثبیت، انحلال‌پذیری و قابلیت انتقال آلاینده بر اثر واکنش شیمیایی کاهش می‌یابد (Mohammad Eisa et al., 2020). در این راستا، مقدار pH نقش مؤثری در تثبیت بسیاری از فلزات سمی توسط واکنش‌های رسوب دارد و تشکیل رسوب و انحلال رسوب فلزات تابع تغییرات pH است (Wang et al., 2016). پیوند شیمیایی آلاینده سرب به‌صورت ترکیبات اکسیدی و هیدروکسیدی در محیط قلیایی رخ می‌دهد (Wang and Wang, 2022). این در حالی است که مکانیزم جامدسازی، خاک آلوده را به‌صورت یک توده یکپارچه تبدیل کرده و ضمن یک واکنش شیمیایی و مکانیکی، با کپسوله کردن آلاینده مانع از انتقال آلاینده از طریق آبشویی می‌شود (Reddy et al., 2020). در حضور سیمان، مکانیزم‌های تثبیت و جامدسازی پایه سیمانی به‌طور هم‌زمان رخ می‌دهند، اگرچه هر کدام عملکرد متفاوتی دارند (Guo et al., 2017).

فرآیند شیمیایی از طریق تشکیل ژل C-S-H ضمن بهبود خواص مکانیکی و مقاومتی ملات‌های سخت شده، نقش اساسی در فرآیند تثبیت و جامدسازی پایه سیمانی ایفا می‌کند (Malviya and Chaudhary, 2004, 2006). سیلیکات‌های کلسیم (C_3S و C_2S) دو بخش چسباننده اصلی در سیمان هستند. هیدرات $C_3S_2H_3$ و مقدار آهک جدا شده به صورت $Ca(OH)_2$ ، محصول هیدراسیون C_3S

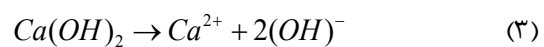
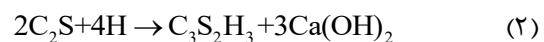
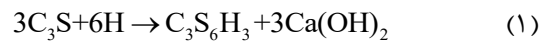
آلودگی فلزات سنگین در خاک‌ها تحت تأثیر فعالیت‌های اقتصادی قرار دارد و صنعتی شدن، به‌عنوان یکی از عوامل اصلی افزایش سطح آلودگی، به‌ویژه در مناطق در حال توسعه شناخته می‌شود. این موضوع به‌ویژه به‌دلیل فعالیت‌های صنعتی و تولید مواد شیمیایی است که سالانه مقادیر زیادی ضایعات حاوی فلزات سنگین ایجاد می‌کند (Chen et al., 2023; Zhao et al., 2024). با توسعه اقتصاد جهانی، مشکلات آلودگی خاک به فلزات سنگین نیز گسترش یافته است (He, 2023). در آمریکا و اروپا بیش از ۱۸ میلیون سایت آلوده به فلز سنگین گزارش شده است (Roy et al., 2022).

حضور آلاینده‌های فلزسنگین تهدیدی جدی برای محیط‌زیست و سلامت انسان است (Bilal et al., 2023). تحقیقات فراوانی امکان استفاده از بنتونیت برای غیرمتحرک‌سازی (ثابت کردن) یون‌های فلز سنگین در پروژه‌های زیست‌محیطی را مورد مطالعه و بررسی قرار داده‌اند (Ali, 2021). خاک‌های رسی به‌دلیل ساختار خاص خود می‌توانند به‌عنوان یک عامل مهم برای نگهداشت آلاینده‌های فلز سنگین از طریق ظرفیت تبادل کاتیونی و جذب سطحی زیاد مانع از انتقال آلاینده در محیط‌زیست شوند (Jiang et al., 2021). ارزیابی مطالعات و آزمایش‌های انجام شده توسط محققین نشان می‌دهد که فلزات سنگین در خاک‌های رسی توسط مکانیسم‌های تبادل کاتیونی، کربنات، اکسید و هیدروکسید (عامل pH)، و فاز آلی نگهداری می‌شوند (Cao et al., 2024; Ouhadi and Farahpour, 2024). با این وجود، مطالعات پژوهشگران در سال‌های اخیر حاکی از آن است که در مناطق صنعتی و شهری، میزان عناصر فلز سنگین مانند کادمیوم، سرب، جیوه، آرسنیک و روی فراتر از مقادیر استاندارد است (Yang and Yang, 2023). در سال‌های اخیر فلز سنگین سرب (Pb) به‌صورت ویژه‌ای مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است و این به‌دلیل سمیت و

شدت بخشی باشد. با توجه به اهمیت نقش تغییر pH در حضور سیمان و رسوب آلاینده فلزسنگین و از آن جا که در تحقیقات گذشته، به موضوع مقایسه تأثیر سدیم هیدروکسید و کلسیم هیدروکسید به عنوان ماده شدت بخشی در فرآیند اندرکنش آنها با بنتونیت آلوده به فلز سنگین توجه کمتری شده است، هدف این مقاله به مقایسه شدت بخشی فرآیند تثبیت/ جامدسازی پایه سیمانی بنتونیت آلوده به فلزسنگین سرب با کلسیم هیدروکسید و سدیم هیدروکسید معطوف شده است. در این راستا نقش مکانیزم های نگهداری آلاینده در تثبیت- جامدسازی پایه سیمانی خاک آلوده به فلزسنگین سرب و بهینه سازی و کاهش سیمان مصرفی مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته است.

نتایج پژوهش حاضر این امکان را فراهم می کند تا در سیستم تثبیت و جامدسازی پایه سیمانی خاک آلوده به فلز سنگین، با مشخص شدن نقش هر یک از مکانیزم ها عملکرد بهینه و افزایش بازدهی محقق شود و از ماده شدت بخشی با تأثیر مناسب تر استفاده شود. از مزایای اصلی این تحقیق می توان به کاهش سیمان مصرفی برای فرآیند تثبیت و جامدسازی خاک آلوده و نیز کاهش میزان انتقال آلاینده به لایه های زیرین خاک و آب های زیرزمینی اشاره نمود. در نوشتار حاضر نمونه های بنتونیت حاوی فلزسنگین سرب برای حصول شرایط قلیایی توسط سدیم هیدروکسید و کلسیم هیدروکسید متناسب با رسوب آلاینده سرب تثبیت شده و نقش مکانیزم تثبیت در کاهش مصرف سیمان بررسی شده است. سپس با ارزیابی تغییرات pH در مکانیزم تثبیت و استخراج آلاینده قابل دسترس توسط یک مجموعه آزمایش روش شست و شوی مشخصه سمیت (TCLP) به همراه آنالیز اشعه ایکس (XRD)، اهمیت و تأثیر نقش هر یک از مواد تثبیت کننده بررسی شده است. در انتها با در نظر گرفتن بهترین ماده تثبیت کننده، کاهش مصرف سیمان در مکانیزم تثبیت و جامدسازی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

هستند (معادله ۱). هیدراته شدن C_2S نیز ترکیب مشابه تولید می کند با این تفاوت که مقدار آهک آن کمتر است (معادله ۲). تشکیل $Ca(OH)_2$ در طی فرآیند هیدراسیون سیمان، اصلی ترین عامل افزایش pH در محیط است (معادله ۳) (Ouhadi et al., 2021).



با وجود آن که سیمان پرتلند معمولی از دیرباز به طور گسترده به دلیل خاصیت قلیایی و بهبود مشخصات فیزیکی خاک در تثبیت و جامدسازی مکانهای آلوده به فلز سنگین مورد استفاده قرار گرفته است؛ با این حال تولید سیمان پرتلند معمولی ضمن افزایش مقدار گازهای گلخانه ای، مصرف انرژی فراوانی را به همراه دارد (Singh and Budarayavalasa, 2021).

در این راستا گزارش شده است که تولید هر تن سیمان موجب افزایش گاز CO_2 به مقدار $0.82/$ تا $2.66/$ تن می شود (Geng et al., 2019). همین موضوع سبب شده است که استفاده از مواد شدت بخشی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی مورد توجه محققین قرار گیرد. استفاده از سدیم هیدروکسید به عنوان یک ماده شدت بخش، ضمن افزایش pH محیط و تغییرات شیمیایی در خاک سبب بهبود مقاومت خاک و مکانیزم جامدسازی می شود (Ouhadi et al., 2021; Mohamad et al., 2023). این در حالی است که به دلیل واکنش پذیری زیاد سدیم هیدروکسید با اجزای خاک، استفاده از این ماده به عنوان یک چالش محیط زیست مطرح شده است (Sohail et al., 2018). به نظر می رسد کلسیم هیدروکسید ضمن واکنش پذیری کمتر، از منظر تأمین شرایط قلیایی می تواند جایگزین مناسبی برای سدیم هیدروکسید به عنوان ماده

مواد و روش‌ها

نیترات، عامل اصلی انتخاب این ماده برای آلوده کردن خاک بوده است (Chen et al., 1991; Cuisinier et al., 2011). همچنین از سیمان پرتلند تیپ دو، محصول شرکت سیمان هگمتان ایران در این پژوهش استفاده شده است. آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است بخش اعظم آزمایشات صورت گرفته در این تحقیق، مطابق با روش‌های ارائه شده در دستورالعمل مرکز تحقیقات ژئوتکنیک دانشگاه مک‌گیل کانادا و دستورالعمل EPA و استاندارد ASTM صورت گرفته است.

خاک مورد استفاده در این تحقیق، بنتونیت تجاری با نام «بنتونیت فلات ایران» تهیه شده از شرکت «ایران باریت» است. برخی از مشخصات فیزیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی آن در جدول ۱ ارائه شده است. در این تحقیق از سرب نیترات^۲ با جرم مولی ۳۳۱/۲ گرم بر مول، تهیه شده از شرکت تجاری مرک^۳، به‌عنوان ماده تولیدکننده آلاینده یون سرب استفاده شده است. عدم تداخل نیترات در هیدراسیون سیمان و انحلال پذیری قابل توجه سرب

جدول ۱- برخی از مشخصات فیزیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی بنتونیت مورد استفاده

Table 1. Some of the geotechnical and geoenvironmental Eng. properties of bentonite

مشخصات فیزیکی بنتونیت	مقدار	روش اندازه‌گیری
pH	9.8	BS EN 12457-2
درصد کربنات	10	BS 1377-3
ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) (cmol/kg-soil)	62.2	(Ouhadi and Goodarzi, 2003; Ouhadi, 2017)
سطح مخصوص (SSA) (m^2/g)	418	(Eltantawy and Arnold, 1973)
توده‌ی ویژه (G_s)	2.79	ASTM C188
حدروانی (LL)، (%)	319	ASTM D4318
دامنه خمیری (PI)، (%)	275	ASTM D4319
ذرات هم اندازه رس (%)	72	ASTM D7928

جدول ۲- مقادیر اکسیدهای اصلی معادل اجزای تشکیل‌دهنده سیمان و بنتونیت

Table 2. XRF analysis of Cement and bentonite compounds

عناصر تشکیل‌دهنده	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	L.O.I
بنتونیت	57.3	14	3.2	3.8	2.9	0.4	2.3	0.7	14.7
سیمان پرتلند	21.5	4.9	3.8	63.3	1.6	2.4	0.5	0.8	1.2

آزمایش نگهداشت فلز سنگین به روش تعادل سوسپانسیون خاک، بر اساس روش ارائه شده در استاندارد EPA به شرح زیر انجام شده است. ابتدا محلول‌های حاوی غلظت‌های متفاوت از فلز سنگین تهیه شد و ۲۰ میلی‌لیتر از آنها به‌عنوان آلاینده مرجع برای استفاده در آزمایش‌ها انتخاب شده است. سوسپانسیون

نمونه بنتونیت مورد مطالعه غنی در اکسیدهای سیلیس و آلومینیوم بوده که بیانگر قابلیت بنتونیت در واکنش‌های پوزولانی در حضور سیمان است (Ouhadi et al., 2023). به‌منظور بررسی اندرکنش آلاینده‌های فلز سنگین سرب با بنتونیت و تصمیم‌گیری درباره میزان غلظت آلودگی مورد استفاده در آزمایش‌ها، یک مجموعه

نمک نیترات سرب به صورت سوسپانسیون در آب حل شده و به نسبت S:W (آب (میلی لیتر): خاک (گرم)) برابر با ۱:۱۰ تهیه شده است. سوسپانسیون به مدت ۹۶ ساعت، هر روز به مدت ۲ ساعت توسط لرزاننده (*Shaker*) مکانیکی برای انجام تبادل کاتیونی کاملاً هم زده شده و پس از آن در گرمخانه با دمای ۶۰ درجه سانتی گراد خشک شده است. خاک ذکر شده به عنوان خاک آلوده در فرآیند تثبیت و جامدسازی مورد استفاده قرار گرفته است.

به منظور امکان مطالعه تأثیر مواد افزایش دهنده pH بر فرایند جامدسازی پایه سیمانی خاک آلوده به فلز سنگین، و مقایسه اثر هیدروکسید کلسیم و هیدروکسید سدیم بر این فرایند، آزمایش‌ها در سه سری انجام شده‌اند. در سری اول، نمونه‌های بنتونیت آلوده، با درصد‌های مختلف سیمان مورد تثبیت و جامدسازی قرار گرفته‌اند. در سری دوم آزمایشات، به نمونه‌های بنتونیت آلوده، درصد‌های مختلف هیدروکسید کلسیم و هیدروکسید سدیم اضافه شده و تأثیر افزودنی‌های فوق بر فرایند تثبیت و جامدسازی بنتونیت آلوده (در عدم حضور سیمان) مطالعه شده است. در سری سوم نیز نمونه‌های بنتونیت آلوده ابتدا با اضافه کردن هیدروکسید کلسیم و هیدروکسید سدیم مورد ثابت‌سازی pH قرار گرفته و سپس با افزودن درصد‌های مختلف سیمان، مورد تثبیت و جامدسازی قرار گرفته‌اند. هر سه سری نمونه‌ها پس از آماده شدن تحت یک مجموعه آزمایش مطابق با روش شست‌وشوی مشخصه سمیت (TCLP) قرار گرفته و مقدار واجد ذره فلز سنگین آنها تعیین شده است. این الگوی آزمایش‌ها، امکان تفکیک اثر هیدروکسید کلسیم و هیدروکسید سدیم بر فرایند جامدسازی در حضور و در فقدان حضور سیمان را فراهم می‌کند. بر اساس روش‌های متداول، میزان درجه عدم تحرک فلزات سنگین بعد از انجام فرایند تثبیت و جامدسازی با استفاده از روش شست‌وشوی مشخصه سمیت (TCLP)

نمونه‌ها در نسبت S:E (محللول الکترولیت (میلی لیتر): مواد جامد (گرم)) برابر با ۱:۲۰ مورد آزمایش قرار گرفته است. لوله‌های فالكون حاوی نمونه، بر روی لرزاننده مکانیکی به مدت ۹۶ ساعت و هر روز به مدت ۲ ساعت هم‌زده شده‌اند تا سیستم کاملاً همگن شده و تبادل کاتیونی صورت گیرد. سپس توسط دستگاه سانتریفیوژ، فاز مایع از جامد جدا شده، مقدار pH اندازه‌گیری شده و بخشی از فاز مایع توسط دستگاه جذب اتمی (AAS) مدل GBC932-AB Plus موجود در آزمایشگاه تحقیقاتی ژئوتکنیک و ژئوتکنیک زیست‌محیطی دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا آنالیز شده است.

عوامل شیمیایی، مانند تأثیر یون‌های فلزی می‌توانند بر خواص مواد سیمانی همچون زمان گیرش و یکپارچگی نهایی، ساختار را تحت تأثیر قرار دهند (Liu et al., 2023). بر این اساس یک مجموعه آزمایش، به منظور بررسی چگونگی تشکیل رسوب آلاینده Pb با تغییر pH صورت گرفته است. بدین منظور ابتدا یک لیتر محللول استاندارد با غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر تهیه شده است. در مرحله بعد، نمونه‌های ۲۰ میلی لیتر از محللول اولیه توسط سدیم هیدروکسید ۱ مولار در محدوده pH ۲ تا ۱۲ تنظیم شده است. سپس نمونه‌ها بر روی لرزاننده مکانیکی به مدت ۲ ساعت قرار داده شدند، و سپس به مدت ۲۴ ساعت به حالت ثابت برای رسیدن به حالت تعادل قرار گرفته‌اند. در انتها ضمن اندازه‌گیری مجدد pH، با عبور محللول از کاغذ صافی مقدار یون سرب توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شده است.

نمونه بنتونیت مورد استفاده در این تحقیق دارای حداکثر ظرفیت جذب آلودگی سرب معادل ۹۳ cmol/kg-soil است (Ouhadi et al., 2023). براین اساس به منظور بررسی مکانیزم‌های تثبیت و جامدسازی، خاک مورد نظر با غلظت آلودگی معادل ۱۰۰ cmol/kg-soil (بزرگتر از ظرفیت نگهداشت نمونه) در آزمایشگاه به صورت مصنوعی آلوده شده است. برای تهیه خاک آلوده به روش مصنوعی،

مجدد دیگر از نمونه‌های سری دوم آماده شده است و سپس نمونه‌های فوق که به‌صورت جداگانه با افزودن کلسیم هیدروکسید و سدیم هیدروکسید در مقادیر ۱۰، ۱۱، و ۱۲، تحت ثابت‌سازی pH قرار گرفته‌اند با درصد سیمان ۵، ۷/۵، ۱۰، و ۱۵ درصد و ۱/۴ برابر درصد رطوبت بهینه تثبیت و جامدسازی شده‌اند. نمونه‌های تثبیت و جامدسازی شده در این حالت نیز کاملاً سلفون پیچ شده و درون اتاقک مرطوب با درصد رطوبت بیش از ۹۰ درصد قرار گرفته‌اند تا ضمن جلوگیری از انتقال رطوبت از تشکیل فرآیند کربناتاسیون جلوگیری گردد. هر سه سری نمونه‌ها بعد از آماده‌سازی تحت یک مجموعه آزمایش TCLP قرار گرفته‌اند و مقدار واجد یون سرب برای آنها اندازه‌گیری شده است. در نمونه‌هایی که حاوی سیمان بوده‌اند قبل از انجام آزمایش TCLP و برای جلوگیری از ادامه روند هیدراسیون، ابتدا نمونه‌ها در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شده است. محلول استخراج مورد استفاده در آزمایش TCLP استیک اسید ۰/۱ مولار بوده است. سپس نمونه‌ها به ابعادی کوچکتر از ۹/۵ میلی‌متر تبدیل شده و به نسبت S:E (محلول استخراج (میلی‌لیتر): مواد جامد (گرم) برابر با ۱:۲۰ تهیه شده و بر روی لرزاننده مکانیکی به مدت ۱۸ ساعت قرار گرفته‌اند. با اندازه‌گیری pH نمونه‌ها و سانتریفیوژ کردن نمونه‌ها میزان یون سرب در محلول توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری می‌شود. معیار سازمان حفاظت از محیط‌زیست آمریکا برای پذیرش نمونه‌ها مقدار یون سرب کمتر از ۵ میلی‌گرم بر لیتر در آزمایش TCLP است (Yang et al., 2024). در این پژوهش به‌منظور تحلیل و بررسی پیشرفت واکنش‌ها و عناصری که در طی فرآیند تثبیت میان خاک آلوده و مواد تثبیت‌کننده رخ داده است، از آنالیز پراش پرتو ایکس استفاده شده است. نمونه‌ها به صورت پودری بر اساس روش بیان شده توسط (Ouhadi et al., 2016; ikolić et al., 2018) تهیه شده است. بر این اساس نمونه‌ها ابتدا توسط آسیاب مکانیکی پودر شده و برای رسیدن به نتایج

ارزیابی شده است (Belay, 2024; Fu et al., 2024). این آزمایش بر اساس دستورالعمل استاندارد EPA1311 انجام شده است (USEPA, 2009). برای آماده‌سازی سری اول نمونه‌ها که شامل نمونه‌های بنتونیت آلوده شده با فلز سنگین سرب و سپس تثبیت و جامدسازی با سیمان بوده است خاک آلوده با مقادیر ۱۰ و ۱۵ درصد سیمان به‌طور کامل مخلوط شده و با ۱/۴ برابر درصد رطوبت بهینه (OWC) تثبیت و جامدسازی شده‌اند. مقدار درصد رطوبت بهینه نمونه‌های خاک آلوده و سیمان توسط دستگاه و قالب هاروارد مینیچر (Harvard Miniature) و بر اساس استاندارد (ASTM D4609) (Ouhadi et al., 2012; Ouhadi and Amiri, 2015; Adajar and Valbuena, 2021; Abdila and Abdullah, 2025). نمونه‌ها پس از ساخت برای جلوگیری از انتقال رطوبت و CO₂ و ممانعت از تشکیل فرآیند کربناتاسیون، کاملاً سلفون پیچ شده (سیستم بسته) و در اتاقک مرطوب با درصد رطوبت بیش از ۹۰ درصد نگهداری شده‌اند (Netterberg et al., 1987; Zha et al., 2021). برای تهیه سری دوم نمونه‌های مورد آزمایش از آنجا که محدوده pH در رسوب آلاینده سرب (pH ۱۰ تا ۱۲) است، بر این اساس نمونه‌های خاک که به‌صورت مصنوعی آلوده شده‌اند با اضافه کردن کلسیم هیدروکسید و سدیم هیدروکسید در محدوده pH رسوب آلاینده آزاد تثبیت شده‌اند. بدین‌منظور، پس از آلوده کردن نمونه‌ها به‌صورت جداگانه، مقدار ۰/۵ گرم کلسیم‌هیدروکسید و یا ۰/۵ گرم سدیم هیدروکسید به هر یک از نمونه‌ها اضافه شده و پس از ۲ ساعت قرار دادن بر روی لرزاننده و گذشت ۲۴ ساعت، pH نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است. سپس با تکرار این فرآیند و پس از حصول اطمینان از قرارگیری pH در مقادیر ۱۰، ۱۱، و ۱۲، نمونه‌ها در گرم‌خانه با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شده‌اند. برای آماده‌سازی نمونه‌های سری سوم آزمایشات، یکسری

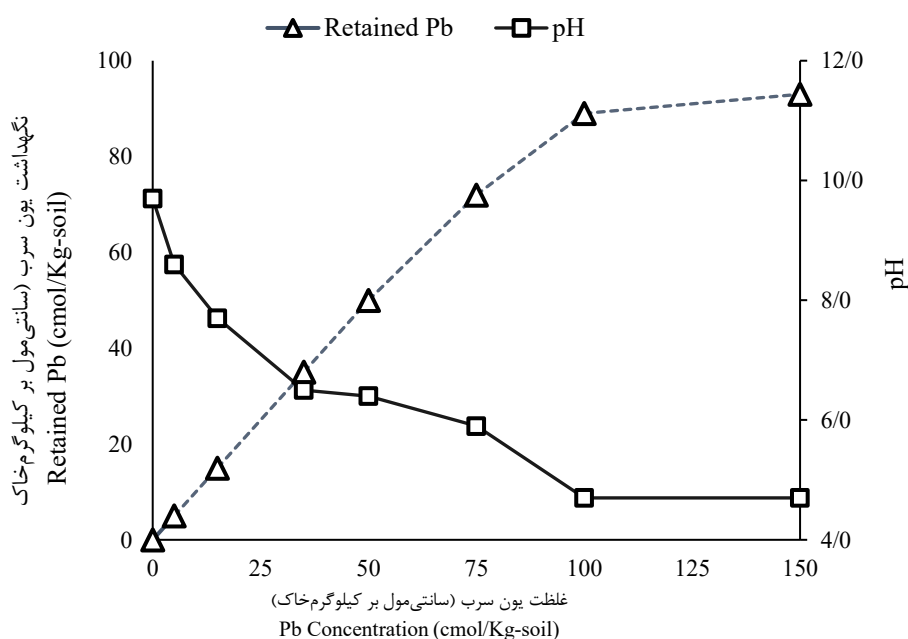
جذب و نگهداری آلاینده سرب، در این تحقیق یک مجموعه آزمایش تعادل سوسپانسیون اشباع صورت گرفته که نتایج آن در شکل (۱) ارائه شده است. همان طور که در نتایج شکل (۱) مشاهده می شود با شروع حضور آلاینده در نمونه بنتونیت، مقدار pH کاهش یافته است. این مسأله به دلیل حضور آلاینده فلز سنگین در آب و آزادسازی یون H^+ رخ داده است. بر این اساس مقدار pH از ۹/۸ در شرایط بدون حضور آلاینده تا pH معادل با ۴/۷ در حضور مقادیر بیش از ظرفیت نگهداشت خاک کاهش یافته است. مقدار نگهداشت آلاینده توسط نمونه بنتونیت تا حدود ۵۰ cmol/kg-soil رفتار خطی دارد و پس از این مقدار، بنتونیت تا حدود ۹۳ cmol/kg-soil حداکثر مقدار نگهداشت را تجربه کرده است.

از سوی دیگر، پیش از عملکرد مکانیزم جامدسازی می بایست آلاینده آزاد تثبیت شده و در محدوده رسوب قرار گرفته باشد (USEPA, 2009). بنابراین برای ارزیابی تغییرات رفتار سرب با تغییرات pH، ابتدا یک مجموعه آزمایش رسوب بر محلول نیترات سرب انجام شده است (شکل (۲) منحنی رسوب یون سرب).

مطلوب، اندازه ذرات کمتر از ۱۰۰ میکرومتر شده است (Yong and Ouhadi, 1997; Dermatas *et al.*, 2007). نمونه ها باید به گونه ای آسیاب شوند که اندازه ذرات ریز و یکنواختی حاصل شود. این کار سطح تماس را افزایش می دهد و کیفیت داده های پراش را بهبود می بخشد (Jenkins *et al.*, 1986). در ادامه نمونه پودری را به طور یکنواخت در نگهدارنده نمونه قرار داده تا از شکاف های هوا که می تواند منجر به داده های پراش نادرست شود، جلوگیری گردد (Davis, 1986). آزمایش توسط دستگاه پراش پرتو ایکس مدل Siemens- Diffractometer D8 Advance واقع در دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا با پرتو Cu-K α در محدوده 2θ برابر با ۴ تا ۷۰ درجه انجام شده است. برای تشخیص فازهای کریستالی در نتایج پراش پرتو ایکس از نرم افزار X-Pert High Score Plus بر مبنای پایگاه داده ها (PDF-2/ICDD (2017 release) استفاده شده است.

نتایج و بحث

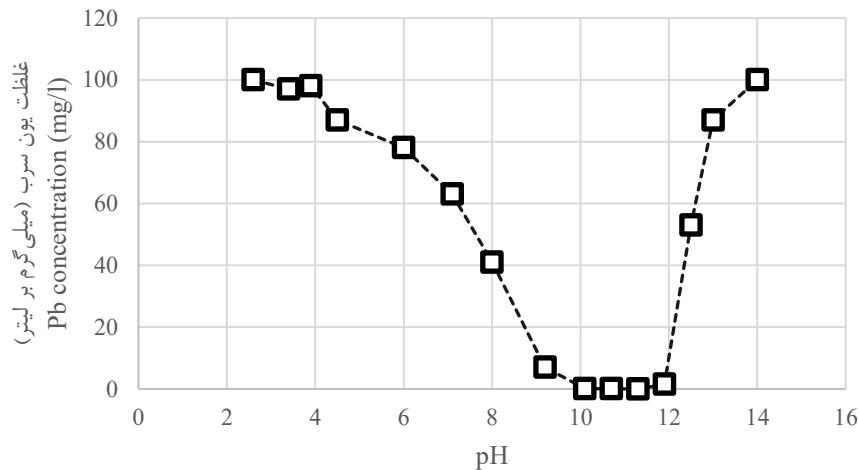
به منظور مطالعه رفتار ژئوتکنیک زیست محیطی بنتونیت در



شکل ۱- قابلیت نگهداری فلز سنگین سرب توسط بنتونیت و تغییرات pH آن
Fig. 1- Lead Heavy Metal Retention Capacity of Bentonite and Its pH Variations.

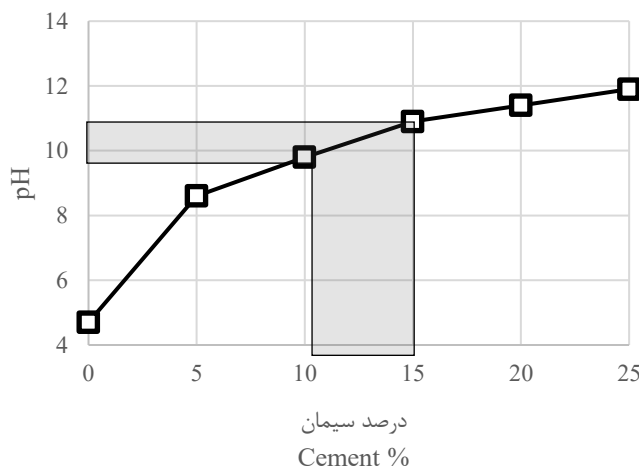
گرم‌خانه با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، خشک شده و بر اساس روش استاندارد (BS EN 12457-2) به صورت سوسپانسیون به نسبت S:W (آب) (میلی‌لیتر): مواد جامد (گرم) برابر با ۱:۱۰ تهیه شده و pH نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است. با توجه به نتایج شکل (۳) در حضور ۱۵ درصد سیمان، pH نمونه بنتونیت حاوی ۱۰۰ cmol/kg-soil در شرایط رسوب آلاینده آزاد قرار گرفته است. این در حالی است که نمونه بنتونیت در حضور ۱۰ درصد سیمان، pH نزدیک به مقدار ۱۰ را کسب کرده است. بر این اساس در ادامه این تحقیق برای تثبیت و جامدسازی نمونه خاک آلوده فوق از مقادیر ۱۰ و ۱۵ درصد سیمان استفاده شده است.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود در شرایط اسیدی و قلیایی شدید، فلز سنگین سرب به صورت یون محلول در آب است و در pH محدوده ۱۰ تا ۱۲ به صورت اکسید و هیدروکسید رسوب می‌کند. به این رفتار فلز سنگین سرب رفتار آمفوتریک گفته می‌شود (Ouhadi *et al.*, 2021). بر این اساس اگر در خاک آلوده، pH نمونه در محدوده ۱۰ تا ۱۲ قرار گیرد استفاده از فاز تثبیت برای نگهداری آلاینده در خاک آلوده با بازده حداکثر صورت خواهد گرفت. از سوی دیگر، در شکل (۳) منحنی تغییرات pH در حضور درصدهای مختلف سیمان نشان داده شده است. بدین‌منظور خاک آلوده پس از ترکیب با درصدهای متفاوت سیمان و مدت زمان ۳ روز عمل‌آوری درون



شکل ۲- منحنی میزان تشکیل و رسوب هیدروکسید سرب با تغییرات pH محلول

Fig. 2- Formation and Precipitation Curve of Lead Hydroxide with pH Variations of the Solution.

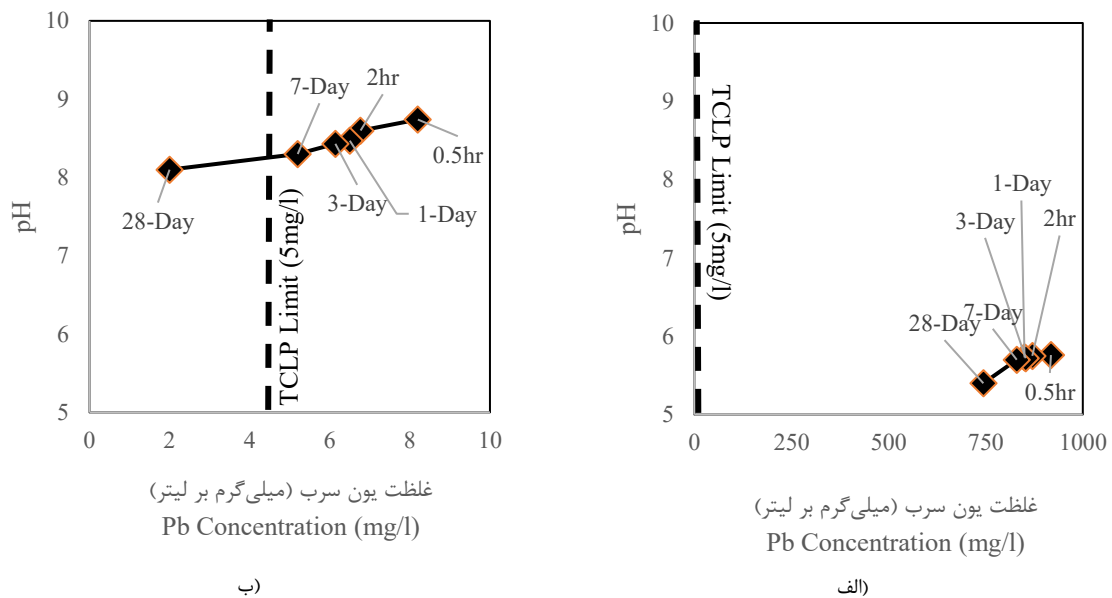


شکل ۳- تغییرات pH در درصدهای مختلف سیمان برای نمونه بنتونیت آلوده شده با ۱۰۰ cmol/kg-soil نیترات سرب پس از ۳ روز عمل‌آوری

Fig. 3- Effect of cement content on the pH variations of bentonite contaminated with 100 cmol/kg-soil of lead after 3 days of curing time.

شرایط استاندارد EPA را تأمین نکرده است. با بررسی هم زمان نتایج شکل‌های (۲ و ۳) مشاهده می‌شود که در حضور ۱۰ درصد سیمان، pH محیط کمتر از ۱۰ است بنابراین مقدار قابل توجهی از آلاینده آزاد تثبیت نشده است.

در شکل (۴) نتایج یک مجموعه آزمایش TCLP بر نمونه‌های بنتونیت حاوی 100 cmol/kg-soil فلز سنگین سرب که در سیستم بسته با ۱۰ و ۱۵ درصد سیمان عمل‌آوری و تثبیت و جامدسازی شده‌اند مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج (شکل ۴-الف) افزودن ۱۰ درصد سیمان



شکل ۴- نتایج آزمایش TCLP در نمونه‌های تثبیت/ جامدسازی حاوی 100 cmol/kg-soil نیترات سرب الف) ۱۰ درصد سیمان ب) ۱۵ درصد سیمان

Fig. 4- TCLP Test Results for stabilization and solidification samples containing 100 cmol/kg-soil lead nitrate: a) 10% cement b) 15% cement

مکانیزم تثبیت، خاک آلوده توسط کلسیم‌هیدروکسید با مقادیر $4/5$ ، 7 و $8/5$ درصد وزنی خاک در pH 10 ، 11 و 12 تثبیت شده است. سپس با انجام آزمایش TCLP بر روی نمونه خاک‌های تثبیت شده، نقش مکانیزم تثبیت مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۵) نتایج آزمایش TCLP در خاک آلوده و خاک آلوده تثبیت شده با کلسیم هیدروکسید ارائه شده است.

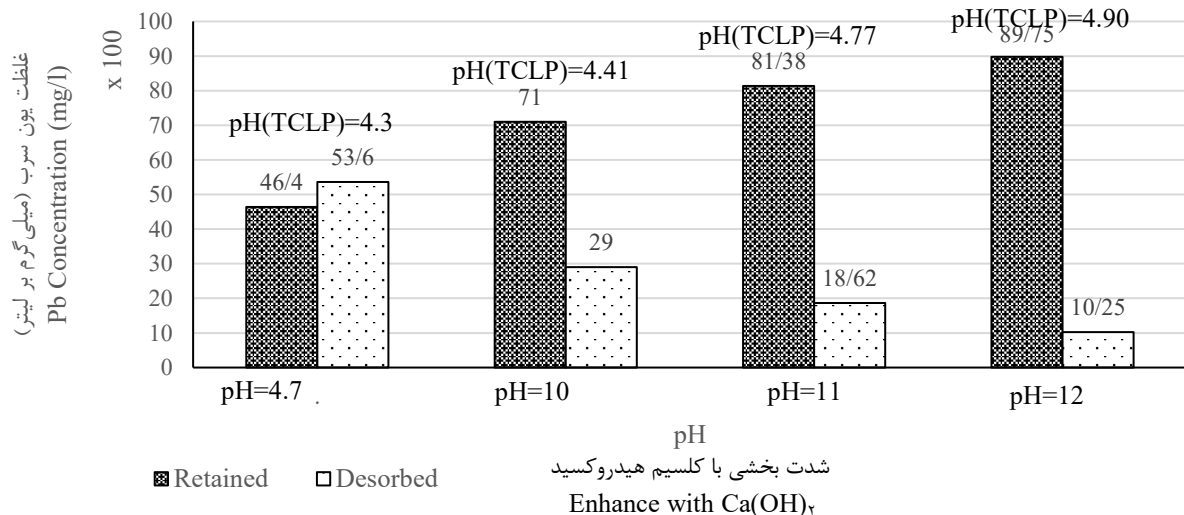
بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۵)، در شرایط اولیه، مقدار واجدبی خاک بیش از مقدار نگهداشت خاک است. این امر به دلیل حضور آلاینده بیش از ظرفیت نگهداشت خاک در نمونه مورد مطالعه است. برای نمونه فوق مقدار نگهداشت آلاینده توسط خاک در آزمایش TCLP برابر $46/4$ درصد مقدار کل آلاینده اعمالی بوده است. با توجه

با افزودن ۱۵ درصد سیمان، ضمن تثبیت و رسوب‌بخش بسیار زیادی از آلاینده آزاد، محدودیت استاندارد نیز احراز شده است. در واقع مقدار pH نقش مؤثری در تثبیت بسیاری از فلزات سمی توسط واکنش‌های رسوب دارد و تشکیل رسوب و انحلال رسوب فلزات، تابع تغییرات pH است (Jiang et al., 2024; Wang et al., 2016). افزایش pH در حضور سیمان به واسطه تشکیل کلسیم‌هیدروکسید در طی فرآیند پیشرفت هیدراسیون است (Ouhadi et al., 2021). همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود با انحلال کلسیم‌هیدروکسید ظرفیت بافرینگ با گذشت زمان کاهش یافته و pH محیط در آزمایش TCLP کاهش یافته است (Zoqi and Doosti, 2021). بنابراین برای بررسی جداگانه نقش pH در

و جامدسازی پایه سیمانی، مکانیزم تثبیت نقش قابل توجهی داشته است؛ با این وجود، برای رسیدن واجدبی به مقدار کمتر از ۵ppm و احراز شرایط استاندارد EPA، مکانیزم جامدسازی نقش اصلی را ایفا کرده است. سیمان پرتلند معمولی طی یک واکنش فیزیکی-شیمیایی ضمن افزایش pH محیط و تبدیل آلاینده به ترکیبات شیمیایی با قابلیت انتقال کمتر، با کپسوله کردن ترکیبات رسوب مانع از انتقال آلاینده در آزمایش TCLP می شود (Ji and Pei, 2019). همچنین به منظور مقایسه تفاوت مکانیزم عملکرد سدیم هیدروکسید و کلسیم هیدروکسید در رسوب فلز سنگین در بنتونیت آلوده و در pH یکسان، نمونه های بنتونیت آلوده شده با نیترات سرب، توسط سدیم هیدروکسید با مقادیر ۳/۵۷، ۴/۵، و ۵/۵ درصد وزنی خاک در pH ۱۰، ۱۱، و ۱۲ تثبیت شده است. سپس برای تعیین واجدبی بر نمونه های فوق یک مجموعه آزمایش TCLP انجام شده است. در شکل (۶) نتایج آزمایش TCLP در خاک آلوده و خاک آلوده تثبیت شده توسط سدیم هیدروکسید و در فقدان حضور سیمان ارائه شده است.

به نتایج شکل های (۳ و ۴) با قرارگیری pH در مقدار ۱۱، نمونه تثبیت و جامدسازی شده با ۱۵ درصد سیمان معیار استاندارد EPA را تأمین کرده است. در شرایط بدون حضور سیمان در pH برابر با ۱۱ مقدار آلاینده قابل دسترس پس از انجام آزمایش TCLP از ۵۳/۶ درصد در شرایط اولیه (pH برابر با ۴/۷) به ۱۸/۶۲ درصد در pH برابر با ۱۱ کاهش یافته است. نتایج نشان می دهد که در شرایط اولیه به دلیل حضور آلاینده آزاد، مقدار واجدبی ۶ درصد بیش از مقدار نگهداشت بوده است و پس از افزایش pH مقدار واجدبی به ۱۸/۶۲ درصد کل آلاینده اعمالی کاهش یافته است.

بر این اساس می توان بیان نمود که افزایش pH در محدوده ۱۱ با کلسیم هیدروکسید و بدون حضور سیمان، سبب کاهش ۶۵ درصد آلاینده واجدبی شده است و مکانیزم تثبیت به تنهایی سبب نگهداشت حدود ۸۱ درصد آلاینده اعمالی شده است. به استناد نتایج شکل (۴) که مکانیزم تثبیت و جامدسازی را بررسی نموده و نتایج شکل (۵) که مکانیزم تثبیت توسط کلسیم هیدروکسید را نشان می دهد، می توان بیان کرد که در خاک حاوی آلاینده ۱۰۰ cmol/kg-soil در تثبیت



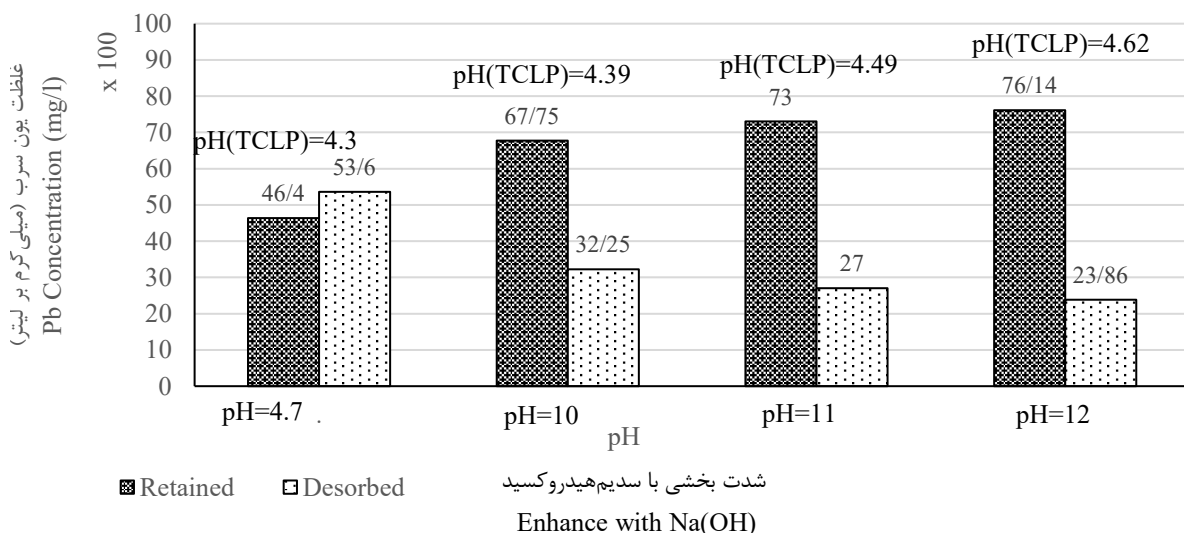
شکل ۵- نتایج آزمایش TCLP در نمونه بنتونیت حاوی ۱۰۰ cmol/kg-soil آلاینده، بدون حضور سیمان و تثبیت شده توسط

کلسیم هیدروکسید در pH ۱۰، ۱۱ و ۱۲

Fig. 5- TCLP test results for bentonite samples containing 100 cmol/kg-soil of lead nitrate without cement and stabilized with Ca(OH)_2 at pH 10, 11, and 12.

پراش پرتو ایکس یکی از روش‌هایی است که به شکل گسترده در شناسایی ریزساختاری کانی‌های رسی و مطالعه تغییر ساختار آنها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Yong *et al.*, 1996; Mitchell and Soga, 2005). در این تحقیق از آنالیز (XRD) به منظور بررسی ریزساختاری تشکیل کانی‌های مختلف و یافتن علت تغییرات در نتایج نمونه‌های نتایج شکل‌های (۵) و (۶) استفاده شده است. بر این اساس پراش پرتو ایکس نمونه‌های بنتونیت حاوی آلاینده 100 cmol/kg-soil نیترات سرب که در pH ۱۱ توسط کلسیم هیدروکسید و سدیم هیدروکسید تثبیت شده‌اند، مورد آنالیز و بررسی قرار گرفته است. نتایج شکل (۷) با استفاده از پرتو $\text{Cu-K}\alpha$ در محدوده 2θ ، ۴ تا ۷۰ درجه تهیه شده است. برای تشخیص فازهای کریستالی در نتایج پراش پرتو ایکس از نرم‌افزار X-Pert High Score Plus بر مبنای پایگاه داده‌ها PDF-2/ICDD (2017 release) استفاده شده است.

همان‌طور که در نتایج شکل (۶) مشاهده می‌شود مقدار واجذبی نمونه‌ها با افزایش pH کاهش یافته است. شدت بخشی بنتونیت آلوده به سرب پیش از افزودن سیمان، موجب افزایش استفاده از قابلیت بنتونیت در جذب فلزات سنگین سرب شده است (Ouhadi and Deiranlou, 2023). با مقایسه نتایج شکل‌های (۵) و (۶) مشاهده می‌شود که مقدار واجذبی نمونه‌ها در pH یکسان در خاک‌های تثبیت شده با کلسیم هیدروکسید کمتر از خاک تثبیت شده با سدیم هیدروکسید است. به عنوان مثال مقدار نگهداشت آلاینده در pH برابر ۱۲ در خاک تثبیت شده با کلسیم هیدروکسید برابر با ۸۹/۷۵ درصد و در خاک تثبیت شده با سدیم هیدروکسید برابر با ۷۶/۱۴ درصد است. این تفاوت می‌تواند به دلیل تشکیل ترکیبات سیمانی همچون کلسیم سیلیکات هیدرات و کلسیم آلومینو سیلیکات هیدرات به دلیل استفاده از کلسیم هیدروکسید در افزایش مقدار pH خاک باشد.



شکل ۶- نتایج آزمایش TCLP در نمونه بنتونیت حاوی 100 cmol/kg-soil بدون حضور سیمان و تثبیت شده توسط سدیم هیدروکسید در pH ۱۰، ۱۱ و ۱۲

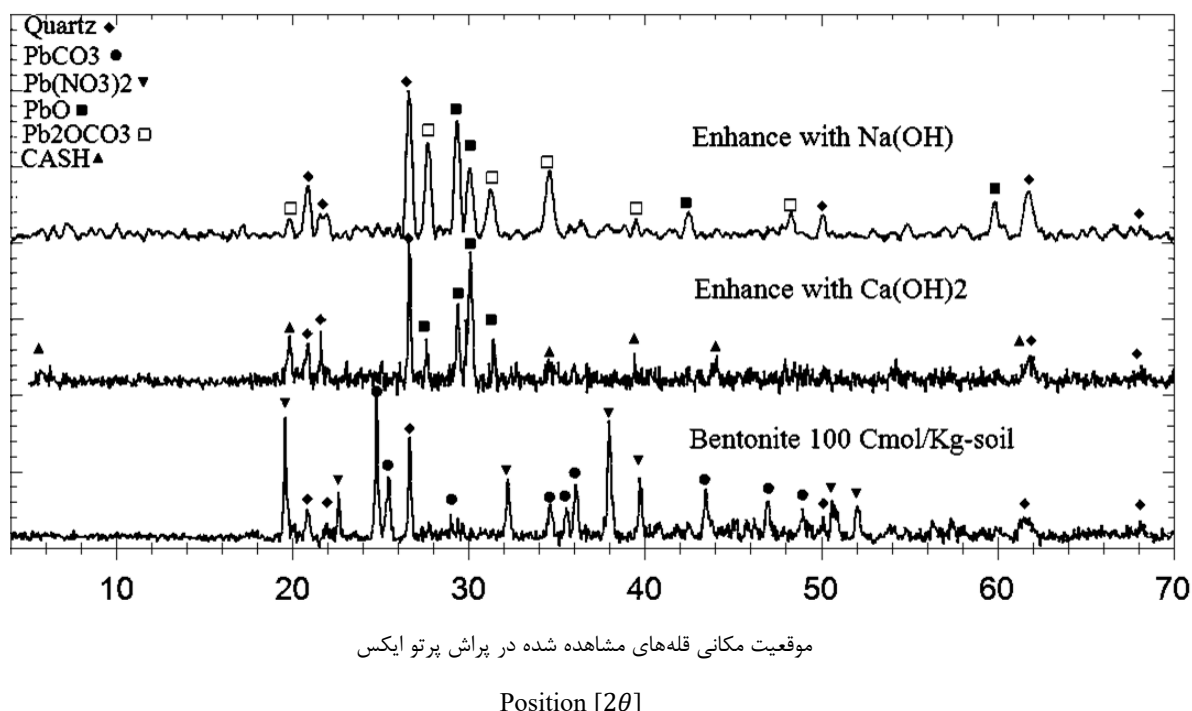
Fig. 6- TCLP test results for bentonite samples containing 100 cmol/kg-soil of lead nitrate without cement and stabilized with NaOH at pH 10, 11, and 12.

قابل مشاهده است. بر اساس شکل (۷) فاز غالب نگهداشت به صورت فاز کربنات بوده است. به طور کلی فاز نگهداشت آلاینده سرب به شکل کربنات بسیار سریع‌تر از فاز نگهداشت اکسید- هیدروکسید تشکیل می‌شود (Król *et al.*, 2020).

با بررسی هم زمان شکل‌های (۱) و (۷) در نمونه cmol/kg-soil 100 می‌توان نتیجه‌گیری نمود که به دلیل حضور آلاینده با غلظت بزرگتر از ظرفیت نگهداشت خاک، در پراش پرتو ایکس نمونه مورد مطالعه، آلاینده آزاد به صورت سرب نیترات

فازهای مختلف نگهداشت سرب، فاز اکسید- هیدروکسید پایدارترین حالت است (Wuana and Okieimen, 2011). این در حالی است که با توجه به نتایج شکل (۷) در تثبیت توسط کلسیم هیدروکسید، تشکیل کلسیم آلومینوسیلیکات هیدرات سبب نگهداشت بیشتر آلاینده نسبت به تثبیت توسط سدیم هیدروکسید شده است.

همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود پس از تثبیت نمونه بنتونیت آلوده در pH برابر با ۱۱، فاز کربنات و آلاینده آزاد به صورت فازهای اکسید و هیدروکسید تبدیل شده است. در طی فرایند فوق، افزایش مقدار pH سبب کاهش قابلیت انتقال آلاینده درون خاک شده است (Wang et al., 2016; Jiang et al., 2024). محققین نشان داده‌اند که در میان

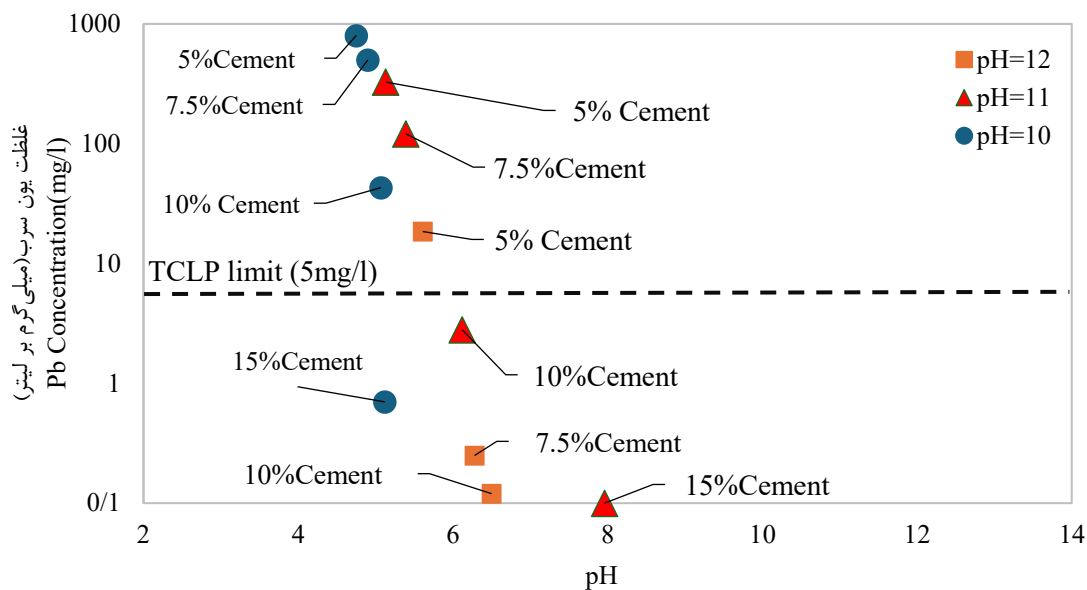


موقعیت مکانی قله‌های مشاهده شده در پراش پرتو ایکس

شکل ۷- منحنی‌های پراش پرتو ایکس نمونه بنتونیت حاوی ۱۰۰ cmol/kg-soil تثبیت شده در pH=11
Fig. 7- XRD results for bentonite samples containing 100 cmol/kg-soil fixed at pH 11.

تثبیت و جامدسازی شده و سپس مقدار واجدبی یون سرب در آزمایش TCLP برای این نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است. شدت بخشی موجب کاهش بسیار قابل توجه اختلالات سرب در تشکیل محصولات هیدراسیون سیمان و در نتیجه سبب افزایش تشکیل محصولات هیدراسیون شده است (Ouhadi and Deiranlou, 2023). بر اساس مقادیر واجدبی نمونه‌ها در شکل (۸) می‌توان نتیجه‌گیری نمود که برای نمونه بنتونیت آلوده شده و سپس تثبیت شده با کلسیم هیدروکسید در مقدار pH برابر ۱۱، استفاده از ۱۰ درصد سیمان سبب احراز محدودیت‌های ارائه شده در EPA در نتایج آزمایش‌های TCLP شده است.

در مرحله نهایی این تحقیق با توجه به نقش مناسب‌تر کلسیم‌هیدروکسید در مکانیزم تثبیت و افزایش pH محیط در حضور سیمان، با شدت بخشی نمونه‌های بنتونیت آلوده توسط کلسیم‌هیدروکسید و تثبیت pH محیط خاک در محدوده ۱۰ تا ۱۲، با انجام یک مجموعه آزمایش TCLP، ارزیابی میزان واجدبی نمونه‌های فوق در حضور درصد‌های مختلف سیمان با هدف کاهش سیمان مصرفی، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است (شکل ۸). در شکل (۸) نمونه‌های تثبیت شده بنتونیت آلوده و شدت بخشی شده توسط کلسیم‌هیدروکسید، با استفاده از درصد‌های مختلف ۵، ۷/۵، ۱۰، و ۱۵ درصد وزنی سیمان



شکل ۸- مقادیر واجذب یون سرب در آزمایش TCLP نمونه‌های تثبیت شده توسط کلسیم هیدروکسید در pH ۱۰، ۱۱، و ۱۲ و جامدسازی شده با مقادیر ۵- ۷/۵- ۱۰- ۱۵ درصد سیمان در خاک ۱۰۰ cmol/kg-soil (۲۸ روز عمل آوری)

Fig. 8- Lead ion desorption values in the TCLP test for samples stabilized with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ at pH 10, 11, and 12, and solidified with 5%, 7.5%, 10%, and 15% cement (100 cmol/kg-soil, 28 curing days).

۱۲ تثبیت شده و pH مناسب معادل ۱۱ گزارش شده است، برای اطلاق این مقدار pH به مقدار بهینه لازم است در مطالعات تکمیلی دامنه pH مقادیر ۱۰/۵ و ۱۱/۵ نیز مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد.

نتیجه گیری

مهمترین نتایج این پژوهش را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

۱. با توجه به اهمیت pH در رسوب آلودگی، در صورت حضور آلاینده آزاد، در صورتی که مقدار pH نمونه خاک قبل از اختلاط با سیمان در محدوده pH ۱۰ تا ۱۲ قرار گیرد، ضمن رسوب بخشی از آلاینده فاز حل شده، شرایط جامدسازی بهتر فراهم می‌شود.
۲. در غلظت ۱۰۰ cmol/kg-soil نیترات سرب، مقدار نگهداشت آلاینده در خاک بنتونیت پس از آزمایش TCLP به تنهایی در حدود ۵۰ درصد است. با افزایش pH محیط توسط

از سوی دیگر، با توجه به نتایج شکل (۵) و بررسی هم‌زمان شکل (۴) می‌توان این گونه نتیجه گرفت که با وجود افزایش مقدار نگهداشت در مقادیر pH برابر با ۱۲، در تثبیت و جامدسازی بنتونیت شدت بخشی شده، بهترین نتایج در حضور نمونه‌های شدت بخشی شده توسط کلسیم هیدروکسید در pH برابر ۱۱ صورت گرفته است؛ در واقع کلسیم هیدروکسید با رسوب بخشی از یون سرب موجود در فاز محلول، زمینه پیشرفت واکنش‌های پوزولانی در حضور سیمان را برای جامدسازی یون فلز سنگین فراهم می‌کند. به بیان دیگر با استفاده از راهکار شدت بخشی می‌توان مقادیر سیمان کمتری در فرآیند تثبیت و جامدسازی استفاده کرد (Ouhadi and Deiranlou, 2023). این مقدار کاهش سیمان مصرفی ناشی از شدت بخشی اولیه نمونه با هیدروکسید کلسیم در بنتونیت آلوده با ۱۰۰ cmol/kg soil نیترات سرب برابر با ۳۳ درصد بوده است. با این وجود از محدودیت‌های نتایج این تحقیق می‌توان به محدودیت دامنه تغییرات pH اشاره نمود. در واقع از آنجا که در این مطالعه، مقادیر pH نمونه‌ها در مقادیر ۱۰، ۱۱ و

EPA در آزمایش واجذبی آلاینده است.

۵. با شدت بخشی و تثبیت خاک آلوده توسط کلسیم هیدروکسید در pH برابر با ۱۱، ضمن تأمین فرایند تثبیت، مقدار سیمان مصرفی به میزان ۳۳ درصد کاهش می‌یابد.

۶. بر اساس نتایج این تحقیق اگرچه، سدیم هیدروکسید قابلیت بیشتری در افزایش ظرفیت بافرینگ بنتونیت آلوده دارد لیکن از آنجا که حضور کلسیم هیدروکسید علاوه بر افزایش pH، به دلیل تأمین یون کلسیم، امکان شکل‌گیری بیشتر واکنش‌های پوزولانی را فراهم می‌کند در فرایند تثبیت/ جامدسازی پایه سیمانی عملکرد بهتری داشته است.

سپاسگزاری

از حوزه پژوهشی دانشگاه بوعلی سینا برای تأمین مالی خرید مصالح و مواد شیمیایی این تحقیق قدردانی می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

¹ Toxicity characteristic leaching procedure

² Lead(II) Nitrate (Pb(NO₃)₂)

³ Merck

References

- Abdila, S. R., & Abdullah, M. M. A. B. (2025). In situ DCP to evaluate unconfined compressive strength of soil stabilization using ground-granulated blast slag and fly ash via geopolymer process. In *Recent Developments of Geopolymer Materials* (pp. 201–221). Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780443240683000108>
- Adajar, M. A., & Valbuena, K. (2021). Optimization of the strength properties of expansive soil stabilized with agricultural wastes. *GEOMATE Journal*, 21(88), 35–41.
- Ali, Y. M. (2021). Use of Bentonite and Zeolite to Stabilize Nutrients and Heavy Metals Within Earthen Pond Sediments. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 12(12), 909–917.
- Belay, L. M. (2024). Stabilization and solidification of industrial waste. <https://digilib.k.utb.cz/handle/10563/54853>

کلسیم هیدروکسید این مقدار نگهداشت در pH برابر ۱۱ در حدود ۸۰ درصد بوده است. این موضوع بیانگر نقش غالب مکانیزم تثبیت در نگهداشت آلاینده است.

۳. بر اساس نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس می‌توان نتیجه‌گیری نمود که در صورت شدت بخشی و افزایش pH، فاز نگهداشت کربنات تغییر کرده و به فاز اکسید که پایدارتر است تبدیل می‌شود. در صورت شدت بخشی با سدیم هیدروکسید، نگهداشت کمتری در مقایسه با استفاده از کلسیم هیدروکسید مشاهده شده است. این تغییرات مشاهده شده را می‌توان به تشکیل محصولات سیمانی در هنگام شدت بخشی توسط کلسیم هیدروکسید نسبت داد.

۴. سیمان پرتلند معمولی ضمن افزایش pH، از طریق تشکیل CSH، مکانیزم جامدسازی را نیز با کپسوله کردن آلاینده تأمین می‌کند. با توجه به تأثیر مثبت افزایش pH در مقدار نگهداشت آلاینده، حضور سیمان و جامدسازی آلاینده، دو شرط اساسی برای تأمین محدودیت استاندارد

منابع

- Bilal, M., Alshammari, A. M., & Ali, A. (2023). Binder-Based Remediation of Heavy Metal Contaminated Soils: A Review of Solidification/Stabilization Methods. *Knowledge-Based Engineering and Sciences*, 4(3), 17–34.
- Cao, W., Qin, C., Zhang, Y., Wei, J., Shad, A., Qu, R., Xian, Q., & Wang, Z. (2024). Adsorption and migration behaviors of heavy metals (As, Cd, and Cr) in single and binary systems in typical Chinese soils. *Science of The Total Environment*, 950, 175253.
- Chen, H. M., Zheng, C. R., & Sun, X. H. (1991). Effect of anions on adsorbability and extractability of lead added in soil. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19911960443>
- Chen, L., Nakamura, K., & Hama, T. (2023). Review on stabilization/solidification methods and mechanism of heavy metals based on OPC-based

- binders. *Journal of Environmental Management*, 332, 117362.
- Cuisinier, O., Le Borgne, T., Deneele, D., & Masroui, F. (2011). Quantification of the effects of nitrates, phosphates and chlorides on soil stabilization with lime and cement. *Engineering Geology*, 117(3–4), 229–235.
- Davis, B. L. (1986). A tubular aerosol suspension chamber for the preparation of powder samples for X-ray diffraction analysis. *Powder Diffraction*, 1(3), 240–243.
- Dermatas, D., Chrysochoou, M., Pardali, S., & Grubb, D. G. (2007). Influence of X-Ray Diffraction Sample Preparation on Quantitative Mineralogy: Implications for Chromate Waste Treatment. *Journal of Environmental Quality*, 36(2), 487–497. <https://doi.org/10.2134/jeq2006.0215>
- Eltantawy, I., & Arnold, P. (1973). Reappraisal of ethylene glycol mono-ethyl ether (EGME) method for surface area estimations of clays. *Journal of Soil Science*, 24(2), 232–238.
- Fu, J., Chen, Y., He, J., Zhou, H., & Liu, W. (2024). Optimization of solidification/stabilization materials based on solid waste geopolymer. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1335(1), 012040. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1335/1/012040/meta>
- Geng, Y., Wang, Z., Shen, L., & Zhao, J. (2019). Calculating of CO₂ emission factors for Chinese cement production based on inorganic carbon and organic carbon. *Journal of Cleaner Production*, 217, 503–509.
- Guo, B., Liu, B., Yang, J., & Zhang, S. (2017). The mechanisms of heavy metal immobilization by cementitious material treatments and thermal treatments: A review. *Journal of Environmental Management*, 193, 410–422.
- He, X. (2023). Review on Remediation Technology of Heavy Metal Contaminated Soil. *Academic Journal of Science and Technology*, 6(1), 177–179.
- Jenkins, R., Fawcett, T. G., Smith, D. K., Visser, J. W., Morris, M. C., & Frevel, L. K. (1986). JCPDS—international centre for diffraction data sample preparation methods in X-Ray Powder Diffraction. *Powder Diffraction*, 1(2), 51–63.
- Ji, Z., & Pei, Y. (2019). Bibliographic and visualized analysis of geopolymer research and its application in heavy metal immobilization: A review. *Journal of Environmental Management*, 231, 256–267.
- Jiang, J., Ayaz, T., Jiang, Z., & Lei, M. (2021). Green remediation of heavy metal polluted water and soil using clay minerals: A review. 632(5), 052079.
- Jiang, Y., Tian, Q., Zhang, H., Yue, X., Xue, S., Qiu, F., & Zhang, T. (2024). One-step removal of anionic/cationic heavy metal ions from wastewater by magnetic amphoteric adsorbent. *Journal of Water Process Engineering*, 65, 105847.
- Król, A., Mizerna, K., & Bozym, M. (2020). An assessment of pH-dependent release and mobility of heavy metals from metallurgical slag. *Journal of Hazardous Materials*, 384, 121502.
- Liu, J., Wu, D., Tan, X., Yu, P., & Xu, L. (2023). Review of the interactions between conventional cementitious materials and heavy metal ions in stabilization/solidification processing. *Materials*, 16(9), 3444.
- Malviya, R., & Chaudhary, R. (2004). Study of the treatment effectiveness of a solidification/stabilization process for waste bearing heavy metals. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 6, 147–152.
- Malviya, R., & Chaudhary, R. (2006). Factors affecting hazardous waste solidification/stabilization: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 137(1), 267–276.
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior* (Vol. 3). John Wiley and Sons New York.
- Mohamad, H. M., Sharudin, M. F. I., Amaludin, A. E., & Zakaria, S. N. F. (2023). Characteristic and physicochemical properties of peat soil stabilized with sodium hydroxide (NaOH). *Civ Eng J*, 9(9), 2221–2232.
- Mohammad Eisa, H., Vaezi, I., & Mahboubi Ardakani, A. (2020). Evaluation of solidification/stabilization in arsenic-contaminated soils using lime dust and cement kiln dust. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 1683–1692.
- Muthu, M., Santhanam, M., & Kumar, M. (2018). Pb removal in pervious concrete filter: Effects of accelerated carbonation and hydraulic retention time. *Construction and Building Materials*, 174, 224–232.
- Netterberg, F., Paige-Green, P., Mehring, K., & Von Solms, C. L. (1987). Prevention of surface carbonation of lime and cement-stabilized pavement layers by more appropriate curing techniques <https://trid.trb.org/View/291175>
- Nikolić, V., Komljenović, M., Džunuzović, N., & Miladinović, Z. (2018). The influence of Pb addition on the properties of fly ash-based geopolymers. *Journal of Hazardous Materials*, 350, 98–107.
- Ouhadi V.R., & Goodarzi A.R. (2003). Pore Fluid Characteristics Effect on Dispersivity Behaviour of Bentonite from Macro and Micro Structure Aspects, 2nd International Symposium on Contaminated Sediments, Quebec City, Canada; pp200-206.

- Ouhadi, V., Bayesteh, H., & Pasdarpour, M. (2012). Analysis of dispersivity behavior of clay minerals by fuzzy computational system and experimental methods. *Journal of Dispersion Science and Technology*, Vol. 33.(3), pp. 420-428.
- Ouhadi, V. R., Amiri, M., & Goodarzi, A.R. (2012). The special potential of nanoclays for heavy metal contaminant retention in geo-environmental projects. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, Vol. 45 (6), 631-642.
- Ouhadi, V.R., & Amiri, M. (2014). Interaction of Nano-Clays and Cu Contaminant in GeoEnvironmental Projects. *Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 16 (160), 75-87.
- Ouhadi, V., Amiri, M. & Zangane, M. (2016). Microstructural assessment of lime consumption rate and pozzolanic reaction progress of a lime-stabilized dispersive soil. *Modares Civil Engineering Journal*, 16(1), 11-22.
- Ouhadi, V. R. (2017). Development and Validation of the Modified Barium Chloride Method for CEC Measurement and Determination of Accurate Exchangeable Calcium Cation Concentration in Carbonated Clayey Soils. *Modares Civil Engineering Journal*, 17(3), 21–34.
- Ouhadi, V.R., Yong, R.N., & Deiranlou, M. (2021). Enhancement of cement-based solidification/stabilization of a lead-contaminated smectite clay. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123969.
- Ouhadi, V. R., & Deiranlou, M. (2023). Impact of Enhancement by NaOH on Solidification/Stabilization of Contaminated Bentonite. *Scientific Quarterly journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 16, 43-46.
- Ouhadi, V. R., Yousefi, B., & Safadoust, R. (2023). Micro-structural evaluation of the impact of curing method on the process of cement-based stabilization/solidification of Pb ion contaminated bentonite. *Sharif Journal of Civil Engineering*.
- Ouhadi, V. R., & Farahpour, M. A. (2024). Utilizing Surface Potential and Soil Retention Phases to Optimize the Selection of Enhancement Materials for Contaminant Extraction from Kaolinite. *Modares Civil Engineering Journal*, 24(3), 165–178.
- Reddy, V. A., Solanki, C. H., Kumar, S., Reddy, K. R., & Du, Y.-J. (2020). Stabilization/solidification of Zinc-and lead-contaminated soil using limestone calcined clay cement (LC3): An environmentally friendly alternative. *Sustainability*, 12(9), 3725.
- Roy, S., Gupta, S. K., Prakash, J., Habib, G., & Kumar, P. (2022). A global perspective of the current state of heavy metal contamination in road dust. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(22), 33230–33251. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18583-7>
- Singh, R., & Budarayavalasa, S. (2021). Solidification and stabilization of hazardous wastes using geopolymers as sustainable binders. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23(5), 1699–1725.
- Sohail, S., Honna, M., Mathad, V., & Bharamgoud, B. (2018). Comparative study on soil stabilization using powdered glass and sodium hydroxide additives. *International Journal for Innovative Research in Science and Technology*, 4(12), 86–93.
- US, E. (2009). Technology performance review: Selecting and using solidification/stabilization treatment for site remediation. US Environmental Protection Agency, EPA/600/R-09/148.
- Wang, D., & Wang, Q. (2022). Clarifying and quantifying the immobilization capacity of cement pastes on heavy metals. *Cement and Concrete Research*, 161, 106945.
- Wang, P., Xue, Q., Li, J., & Zhang, T. (2016). Effects of pH on leaching behavior of compacted cement solidified/stabilized lead contaminated soil. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 35(1), 149–155. <https://doi.org/10.1002/ep.12218>
- Wuana, R. A., & Okieimen, F. E. (2011). Heavy metals in contaminated soils: A review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *International Scholarly Research Notices*, 2011.
- Yang, L., Wen, T., Wang, L., Miki, T., Bai, H., Lu, X., Yu, H., & Nagasaka, T. (2019). The stability of the compounds formed in the process of removal Pb (II), Cu (II) and Cd (II) by steelmaking slag in an acidic aqueous solution. *Journal of Environmental Management*, 231, 41–48.
- Yang, S., Dong, Z., Zhu, B., Yan, X., Huang, J., Xie, X., Chang, Z., Tian, S., & Ning, P. (2024). Feasibility and solidification mechanism study of self-sustaining smoldering remediation for copper and lead-contaminated soil. *Environmental Research*, 250, 118498.
- Yang, X., & Yang, Y. (2023). Spatiotemporal patterns of soil heavy metal pollution risk and driving forces of increment in a typical industrialized region in central China. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 25(3), 554–565.
- Yong, R.N. & Ouhadi, V.R. (1997). Reaction factors impacting on instability of bases on natural and lime stabilized marls", Special International Conference on Foundation Failures, Lecture, Keynote Paper, Singapore, pp. 87-97.
- Yong, R.N., Ouhadi, V.R., & Mohamed, A.M.O. (1996). Physicochemical evaluation of failure of stabilized marl soil; Proceedings of the 49th Canadian geotechnical conference frontiers in

geotechnology, 2, 769-776.

Zha, F., Liu, C., Kang, B., Xu, L., Yang, C., Chu, C., Yu, C., Zhang, W., Zhang, J., & Liu, Z. (2021). Effect of Carbonation on the Leachability of Solidified/Stabilized Lead-Contaminated Expansive Soil. *Advances in Civil Engineering*, 2021(1), 8880818. <https://doi.org/10.1155/2021/8880818>

Zhao, X., Zhang, J., Ma, R., Luo, H., Wan, T., Yu, D., & Hong, Y. (2024). Worldwide Examination of Magnetic Responses to Heavy Metal Pollution in Agricultural Soils. *Agriculture*, 14(5), 702.

Zoqi, M. J., & Doosti, M.R. (2021). Solidification/Stabilization of Lead Contaminated Soil Using Magnesia Phosphate cement and Ordinary Portland cement. *Journal of Environmental Health Engineering*, 8(3), 257-270.

