

مطالعه آزمایشگاهی تثبیت و جامدسازی خاک آلوده به سرب و روی توسط سیمان ژئوپلیمری

مجتبی غلامرضایی، محمد دنواز*، هادی شهیر

دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
* delnavaz@khu.ac.ir

چکیده

این تحقیق به بررسی قابلیت‌های سیمان ژئوپلیمری در تثبیت و جامدسازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین سرب و روی پرداخته است. ماده اولیه استفاده شده در سیمان ژئوپلیمری سرباره‌های ذوب آهن و فولاد بود. در این راستا، نمونه‌های خاک آلوده با استفاده از دو نوع چسب تثبیت شدند و آزمایش‌های تراکم خاک، ICP، مقاومت فشاری تک‌محوری، آزمایش نشت (TCLP) و میکروسکوپ الکترونی روبشی برای ارزیابی عملکرد انجام شد. نتایج تست مقاومت فشاری تک‌محوری نشان داد که نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان ژئوپلیمری در تمامی دوره‌های عمل‌آوری، مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی سیمان پرتلند داشته‌اند، به‌طوری که مقاومت آن‌ها حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ کیلوپاسکال بیشتر از نمونه‌های سیمان معمولی بود. از سوی دیگر، نتایج آزمایش نشت نشان داد که سرباره فولاد به‌طور قابل توجهی قادر است غلظت یون سرب را از ۲۶۰۰۰ ppm به کمتر از ۱ ppm کاهش دهد. همچنین، در تثبیت یون روی، غلظت این یون از ۱۶۰۰۰ ppm به ۰/۳ کاهش یافت که نشان‌دهنده پتانسیل بالای این ماده در کنترل و تثبیت فلزات سنگین است. علی‌رغم این که نمونه‌های حاوی سیلیکات سدیم مقاومت بالایی در آزمایش‌های تک‌محوری داشتند، در آزمایش نشت نتوانستند غلظت فلزات سنگین را به زیر حد آستانه برسانند. نتایج نشان داد که با افزایش درصد چسب، مقاومت مکانیکی نمونه‌ها بهبود یافته و فرآیند تثبیت آلاینده‌ها به‌طور مؤثرتری انجام می‌شود. در نهایت، سیمان ژئوپلیمری به‌عنوان یک گزینه مناسب برای تثبیت خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، نه تنها به دلیل کارایی بالا در تثبیت آلاینده‌ها، بلکه به دلیل ویژگی‌های زیست‌محیطی و اقتصادی خود می‌تواند جایگزین مناسبی برای سیمان پرتلند باشد.

کلمات کلیدی:

سیمان ژئوپلیمری، تثبیت خاک، نشت، سرب و روی، مقاومت فشاری

آلودگی خاک مشکل بزرگی است که می‌تواند اثرات مخربی بر محیط‌زیست و سلامت انسان داشته باشد. امروزه با رشد فناوری و سرعت توسعه شهری و صنعتی‌شدن و استفاده بیشتر از مواد شیمیایی و پسماندهای تولید شده، حضور آلاینده‌ها در خاک‌ها به طور قابل توجهی افزایش یافته و تبدیل به یکی از مشکلات متداول زیست‌محیطی در سراسر جهان شده است [۱]. به‌طور کلی آلاینده‌های خاک را می‌توان به دو دسته آلاینده‌های آلی و غیرآلی تقسیم‌بندی کرد. مهم‌ترین آلاینده‌های آلی عبارتند از: ترکیبات فنل، هیدروکربن‌های آروماتیک (حشره‌کش‌ها)، هیدروکربن‌های کلردار (آفت‌کش‌های زراعی)، بنزین و سایر مشتقات نفتی. مهم‌ترین آلاینده‌های غیرآلی در خاک نیز عبارتند از: آرسنیک، آزبست، سیانیدها، سولفات‌ها، نترات‌ها، فسفات‌ها و فلزات سنگین نظیر کادمیوم، جیوه، سرب، روی، مس، کروم، نیکل و سلنیم [۲]. آلودگی خاک به فلزات سنگین یک مشکل رایج در سراسر جهان است. فلزات سنگین به علت سمی بودن، تجمع و حضور در پسماندها یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های زیست‌محیطی هستند. در میان فلزات سنگین یون سرب به‌صورت ویژه مورد توجه بوده و این به دلیل سمیت و استفاده گسترده از آن در صنایع مختلف است [۳]. منابع اصلی آلودگی سرب شامل انتشار آن از صنایع شیمیایی، پتروشیمی و متالورژی، دفع رنگ مبتنی بر سرب، انتشار گازهای گلخانه‌ای از نفت، زباله‌سوزهای جامد، عملیات معدن و ذوب فلزات می‌باشد. وجود سطوح بالای فلزات سنگین از جمله سرب، روی و کادمیوم در خاک‌های صنعتی مناطق متروکه عمدتاً به دلیل روش‌های نامناسب دفع زباله، نقص در فرایندهای تصفیه فنی و نشت‌های شیمیایی است [۴]. آلوده بودن خاک‌ها، باعث می‌شود زمانی که خاک آلوده در تماس با جریان‌های آب سطحی قرار می‌گیرد، این آلاینده‌ها در جریان سطحی شسته شده و با آب حل شده و ضمن ورود به آب‌های زیرزمینی باعث آلودگی آبخوان‌ها شود. تاکنون فناوری‌های مختلفی برای تبدیل زباله‌های خطرناک^۱ به مواد غیرسمی یا کاهش انتشار بالقوه گونه‌های سمی در محیط توسعه یافته‌اند. به عنوان نمونه می‌توان به ترسیب شیمیایی^۲، الکترولیز^۳، تصفیه بیولوژیکی^۴ و تثبیت/جامد سازی^۵ (S/S) اشاره نمود [۵]. فناوری‌های اصلاحی را می‌توان بر اساس بی حرکتی یا استخراج (عملی که روی فلزات اعمال می‌شود) درجا یا خارج از محل و انواع دیگر فناوری‌ها طبقه‌بندی کرد. تصفیه خاک‌های آلوده به فلزات سنگین به دو راهبرد اصلی بی حرکتی و استخراج محدود می‌شود [۶].

به‌طور کلی، تثبیت فرایندی است که در آن مواد افزودنی با ضایعات مخلوط می‌شوند تا نرخ حرکت آلاینده‌ها از زباله به حداقل برسد و سمیت زباله کاهش یابد. بنابراین، تثبیت را می‌توان به‌عنوان فرایندی توصیف کرد که در آن آلاینده‌ها به طور کامل یا جزئی با افزودن معرف‌های پشتیبانی‌کننده، چسباننده‌ها یا سایر اصلاح‌کننده‌ها محدود می‌شوند. به همین ترتیب، جامد سازی فرایندی است که از مواد افزودنی استفاده می‌کند که به‌وسیله آن ماهیت فیزیکی زباله (که با خواص مهندسی مقاومت، تراکم‌پذیری و یا نفوذپذیری اندازه‌گیری می‌شود) در طول فرایند تغییر کند. بنابراین، اهداف تثبیت و جامد سازی هم شامل کاهش سمیت و تحرک زباله و هم بهبود خواص مهندسی مواد تثبیت‌شده است [۷]. روش S/S به عنوان یکی از روش‌های موثر در رفع آلودگی فلزات سنگین خاک‌های آلوده مطرح است. این روش دارای راندمان بالایی است و می‌تواند شسته شدن مواد خطرناک را از زباله‌های دفع شده در محل‌های دفن زباله و خاک‌های آلوده کاهش دهد [۸]. در روش S/S از مواد مختلفی به‌عنوان چسب^۶ استفاده می‌شود که رایج‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها سیمان پرتلند معمولی^۷ است. از سایر موادی که به عنوان عامل چسباننده قابل استفاده هستند، می‌توان به آهک، گچ، پوزولان‌ها و خاکستر بادی اشاره نمود. در برخی موارد از چندین عامل تثبیت‌کننده به‌صورت ترکیبی استفاده می‌شود و تأثیر هر یک از این مواد در تثبیت مورد مطالعه قرار می‌گیرد [۹]. معمولاً برای روش S/S از سیمان پرتلند معمولی استفاده می‌شود؛ اما میزان کاهش مقاومت خاک‌های آلوده با سیمان به شدت به نوع و غلظت فلزات سنگین بستگی دارد. از طرفی با توجه به چالش‌های زیست‌محیطی مرتبط با

^۱ Hazardous Waste

^۲ Chemical Precipitation

^۳ Electrolysis

^۴ Biological Treatment

^۵ Solidification/Stabilization

^۶ Binder

^۷ Ordinary Portland Cement

تولید سیمان پرتلند، از جمله انتشار بالای دی‌اکسید کربن و مصرف انرژی زیاد، نیاز به یافتن جایگزین‌های پایدار و دوستدار محیط‌زیست امری ضروری است. در این راستا، سیمان ژئوپلیمری به دلیل پتانسیل بالا در کاهش اثرات زیست‌محیطی، خواص مکانیکی قابل توجه و مقاومت در برابر شرایط خوردنده، به‌عنوان یک جایگزین مناسب مطرح شده است [۱۰].

سیمان ژئوپلیمری که به‌عنوان یک نوع چسب جدید شناخته می‌شود، نوعی سیمان غیرآلی است که از ترکیب مواد اولیه آلومینوسیلیکاتی با محلول‌های قلیایی به دست می‌آید. برخلاف سیمان پرتلند که از ترکیب کلینکر و گچ تولید می‌شود و طی فرایند تولید آن مقادیر زیادی دی‌اکسید کربن منتشر می‌شود، سیمان ژئوپلیمری با استفاده از مواد ضایعاتی و پسماندهای صنعتی ساخته می‌شود و از این رو، به‌عنوان یک گزینه پایدار و دوستدار محیط‌زیست مطرح است. چسب‌های فعال شده با قلیا با استفاده از فرایند فعال‌سازی قلیایی مواد اولیه آلومینوسیلیکاتی، از جمله خاکستر بادی، سرباره کوره بلند آهن گدازی، متاکائولین، زئولیت و خاکستر پوسته برنج تولید می‌شوند. این مواد معمولاً ضایعات صنعتی یا طبیعی با محتوای بالای آلومینا و سیلیکا هستند. فرایند ژئوپلیمریزاسیون ممکن است با حل شدن مواد اولیه حاوی آلومینو سیلیکات در محلول‌های قلیایی انجام شود که منجر به تشکیل مونومرهای آلومینات و سیلیکات خواهد شد. این مواد سپس به الیگومرها و در نهایت به ژئوپلیمرها تبدیل می‌شوند [۱۱].

در سال‌های اخیر تحقیقات متنوعی در زمینه استفاده از فرایند تثبیت/جامدسازی برای حذف فلزات سنگین انجام شده است. Pan و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی چگونگی تأثیر عواملی مانند غلظت سیمان، غلظت سرب، محتوای اسید هیومیک و اسید فولویک و سن پخت بر مقاومت فشاری و رفتار عناصر رسمی بالقوه پرداختند [۱۲]. نتایج این تحقیق نشان داد که اسید هیومیک و اسید فولویک اثرات تثبیت فلزات سنگین در خاک تثبیت‌شده با سیمان را تضعیف می‌کنند. اگرچه این اسیدها می‌توانند سیمان‌سازی را در خاک تثبیت‌شده با سیمان تضعیف کنند، اما می‌توانند فلزات سنگینی مانند سرب را از طریق واکنش‌های شیمیایی مختلف تثبیت کنند. Huang و همکاران در سال ۲۰۲۰، در تحقیقی ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن و سیمان مناسب را به‌عنوان یک روش مؤثر برای تصفیه خاک‌آلوده به فلزات سنگین پیشنهاد کردند. هدف این تحقیق بررسی اثرات محتوای الیاف، طول الیاف، میزان سیمان، زمان پخت، انواع فلزات سنگین و غلظت بر خواص مکانیکی خاک بود. نتایج نشان داد که وجود سرب باعث کاهش مقاومت فشاری تک محوره و چسبندگی نمونه‌های خاک می‌شود و غلظت بالاتر سرب تأثیر بیشتری بر کاهش مقاومت دارد. با این حال، زاویه اصطکاک داخلی تحت تأثیر غلظت سرب قرار نمی‌گیرد. همچنین راندمان حذف سرب نسبت به روی و مس به دلیل محلولیت کمتر آن در خاک کمتر است [۱۳]. Ouhadi و همکاران در سال ۲۰۲۱ در تحقیقی با هدف بررسی تأثیر الگوهای حلالیت سرب وابسته به pH، به بررسی تثبیت رس‌آلوده و غلبه بر مشکلات مرتبط با هیدراتاسیون سیمان در این فرایند از طریق تصفیه NaOH پرداختند. نتایج نشان داد که برای یک فرایند تثبیت/جامدسازی موفق در رس‌آلوده حاوی غلظت بالای یون‌های سرب محلول، اگر pH اولیه نمونه در محدوده ۱۳ یا بیشتر باقی بماند، مشکل رسوب‌دهی یون‌های سرب روی سطح ذرات سیمان برطرف خواهد شد. زیرا در این محدوده pH، بیشتر یون‌های سرب به‌صورت محلول خواهند بود. بهبود رس‌آلوده با NaOH باعث افزایش حلالیت یون‌های سرب شده و در نتیجه از رسوب اجزای سرب روی ذرات سیمان جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، نتایج آزمون نشت کاهش قابل توجهی در قابلیت نشت سرب را تأیید می‌کند. این امر به رفع اثر تأخیری سرب بر هیدراتاسیون سیمان و پیشرفت چشمگیر در واکنش پوزولانی CSH نسبت داده می‌شود. در واقع، تشکیل CSH یون‌های سرب محلول را کپسوله می‌کند. در نتیجه، در نمونه‌های بهبودیافته، میزان سیمان موردنیاز برای فرایند تثبیت/جامدسازی تا ۶۰٪ کاهش یافته است [۳]. Chiu و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی اثرات خاکستر پوسته برنج (RHA) بر تثبیت سرب و مس در دوغاب تیمار شده با محتوای چسب بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب پرداختند. هدف این مطالعه، ارزیابی توان بالقوه RHA به‌عنوان جایگزینی جزئی برای سیمان در فرایند تثبیت و کاهش قابلیت تحرک فلزات سنگین مس و سرب می‌باشد. افزایش محتوای RHA در مخلوط سیمانی باعث بهبود تثبیت سرب و مس در ماتریس سخت شده و درعین حال، تأثیرات pH و ترکیبات موجود بر فرایند تثبیت و شستشوی فلزات را نشان داده است، با تأکید بر اینکه جایگزینی سیمان با RHA می‌تواند هزینه‌های بازسازی سایت‌های آلوده را به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه کاهش دهد [۱۴]. در سال ۲۰۱۹، Liu و همکاران در تحقیقی بررسی ریز مکانیسم S/S برای تصفیه خاک‌های آلوده به فلزات سنگین با روش مقاومت الکتریکی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که مقاومت الکتریکی با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش یافت و با افزایش غلظت فلزات سنگین کاهش یافت. مقاومت فشاری ارتباط نامایی با مقاومت الکتریکی داشت. تغییرات پارامترهای مقاومت الکتریکی نشان داد که افزایش زمان عمل‌آوری منجر به کاهش تخلخل و افزایش درجه سیمان‌کاری شد که به نوبه

خود منجر به ساختاری متراکم‌تر و مقاومت بیشتر نمونه‌ها می‌شود [۱۵]. در تحقیقی که توسط Li و همکاران در سال ۲۰۲۱ انجام شد ویژگی‌های ژئومحیطی یک خاک غنی از آرسنیک بررسی و سرباره کوره آهن گدازی و مخلوط سیمان برای S/S خاک حاوی آرسنیک بررسی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که بیش از ۸۰٪ از آرسنیک در خاک‌های بدون تصفیه به‌صورت اکسیدهای هیدراته کریستالی آهن و آلومینیوم و فازهای باقیمانده قرار دارد که باعث کاهش نشت آرسنیک به روش آزمون نشت و خطرات محیطی محدود می‌شود. محتوای رطوبت خاک عامل کنترلی در تأثیر بر درجه فشردگی و توسعه مقاومت محصولات خاک S/S بود. محتوای رطوبت خاک ۲۰٪ منجر به بیشترین مقاومت و نشت آرسنیک نسبتاً پایین‌تری شد. افزودن سرباره کوره آهن گدازی به سیستم چسباننده تأثیر کمی بر مقاومت ۷ روزه داشت، اما مقاومت ۲۸ روزه را به دلیل فعالیت پوزولانی به طور قابل توجهی افزایش داد. در مقایسه با تصفیه با سیمان پرتلند معمولی، استفاده بیش از حد از سرباره کوره آهن گدازی تأثیر منفی بر نشت آرسنیک خواهد داشت؛ بنابراین، درصد جایگزینی توصیه شده سیمان پرتلند معمولی با سرباره کوره آهن گدازی باید در فرایند S/S خاک‌های آلوده به آرسنیک به ۲۵٪ محدود شود [۱۶]. Karakoç و همکاران در تحقیقی به بررسی تأثیر میزان قلیا و مدول سیلیس در استفاده از محلول متاسیلیکات سدیم در شرایط مختلف عمل‌آوری بر ژئوپلیمریزاسیون سرباره فروکروم پرداختند. برای فعال‌سازی قلیا در فرایند ژئوپلیمریزاسیون از محلول‌های NaOH و Na_2SiO_3 استفاده شد. سیمان ژئوپلیمری با استفاده از سرباره فروکروم به‌عنوان ماده خام با سه مدول سیلیس مختلف (۰/۷ و ۰/۶ و ۰/۵) و ۴ غلظت مختلف Na_2O (۴، ۷، ۱۰ و ۱۲ درصد) تولید شد. زمان‌گیرش، حرارت هیدراتاسیون و مقاومت فشاری نمونه‌های خمیر ژئوپلیمری و مقاومت فشاری نمونه‌های ملات ژئوپلیمری اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که می‌توان با استفاده از مخلوط متناسبی از هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم به‌عنوان فعال‌کننده قلیا، سیمان ژئوپلیمری تولید کرد. زمان‌های گیرش اولیه و نهایی خمیر فعال شده بسیار زودتر از خمیر سیمان پرتلند رخ می‌دهد و حرارت هیدراتاسیون نمونه‌های خمیر ژئوپلیمری کمتر از سیمان‌های پرتلند معمولی است [۱۷]. Suwan و همکاران در سال ۲۰۱۸ مطالعه جامعی بر روی سیمان ژئوپلیمری انجام دادند که هدف این مطالعه، جمع‌بندی و تحلیل اطلاعات موجود درباره مواد اولیه مورد استفاده در تولید ژئوپلیمر است و این مواد را بر اساس نوع و منبع آن‌ها دسته‌بندی می‌کند. از آنجاکه تشکیل ژئوپلیمر زمانی رخ می‌دهد که منابع آلومینوسیلیکاتی با محلول قلیایی قوی واکنش می‌دهند، هر ماده‌ای که حاوی سیلیکا و آلومینا باشد، می‌تواند در سنتز ژئوپلیمر استفاده شود. عواملی مانند نسبت Si/Al، نوع نمونه، سن آزمایش، نوع فعال‌کننده قلیایی، شرایط پخت و اندازه نمونه می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری نهایی داشته باشند [۱۸]. در سال ۲۰۱۸، Kishar و همکاران به تهیه سیمان ژئوپلیمری از طریق مخلوط کردن مقادیر مختلف سرباره دانه‌ای کوره بلند با خاکستر بادی و غبار کوره سیمان پرداختند. اندازه‌گیری‌های پراش اشعه ایکس نشان داد که سیلیکات کلسیم هیدراته به‌عنوان ترکیب اصلی هیدراتاسیون در ساختار ژئوپلیمر به‌صورت آمورف و شیشه‌ای است. نتایج نشان می‌دهد که مخلوط حاوی ۸۵ درصد سرباره + ۱۵ درصد خاکستر بادی بهترین خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی را در سیمان ژئوپلیمری ارائه می‌دهد. مقاومت فشاری نمونه‌های خمیر سرباره کوره بلند فعال شده با سدیم هیدروکسید تا ۱۸۰ روز به طور تدریجی افزایش می‌یابد. محتوای آب ترکیبی و چگالی حجمی افزایش می‌یابد، درحالی‌که تخلخل کل با گذشت زمان پخت کاهش می‌یابد [۱۹]. Nikolić و همکاران با انجام تحقیقی به بررسی تأثیر افزودن مقدار زیادی سرب بر ساختار، مقاومت و رفتار انحلال (موفقیت در تثبیت سرب) ژئوپلیمرهای مبتنی بر خاکستر بادی، با توجه به شرایط پخت ژئوپلیمرها، پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که شرایط پخت انتخاب شده بر ساختار و مقاومت ژئوپلیمرها و همچنین اثر بخشی تثبیت سرب تأثیر گذاشت. افزودن مقدار زیاد سرب بدون توجه به شرایط پخت مورد استفاده باعث اختلال قابل توجهی در ساختار ژئوپلیمر شد که منجر به کاهش قابل توجه مقاومت ژئوپلیمر نیز گردید. نتایج این تحقیق تأیید کرد که با انتخاب مناسب پیش‌ساز جامد و شرایط سنتز، غلظت بالای سرب اضافه شده به فرم بسیار محلول می‌تواند به طور موفقیت‌آمیز در ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی تثبیت شود. با توجه به اینکه افزودن مقدار زیاد سرب باعث تشکیل ژل آلومینوسیلیکاتی فاقد آلومینیوم شد، انتظار می‌رود که تثبیت غلظت‌های بالای سرب و سایر فلزات سنگین، با استفاده از خاکستر بادی فعال شده با قلیا و فعال‌کننده‌های قلیایی مبتنی بر آلومینات سدیم یا ترکیبات سیلیکات/آلومینات سدیم، به شکل مؤثرتری انجام گیرد. این موضوع باید در کانون تحقیقات آینده قرار گیرد [۲۰]. در مطالعه‌ای که Reddy و همکاران انجام دادند، تغییرات ویژگی‌های شاخص، ویژگی‌های مهندسی، ویژگی‌های معدنی و مورفولوژیکی خاک‌های غیرآلوده و آلوده به مس که با چسب سرباره فعال شده با منیزیا تصفیه شده‌اند، مورد مطالعه قرار گرفته است. مقاومت فشاری بدون محدودیت خاک‌های غیرآلوده به طور متناسب با افزایش محتوای چسب از ۳ به ۱۵ درصد افزایش یافته است که

نشان‌دهنده توسعه ژل‌های با فرایندهای هیدراسیون است که توسط تحلیل‌های XRD تأیید می‌شود. بر اساس ویژگی‌های تنش-کرنش این ترکیبات، محتوای چسب بهینه شش درصد برای تصفیه خاک‌های آلوده به مس انتخاب شد. در خاک‌های آلوده به مس تثبیت شده/سخت شده، تحلیل XRD ظهور تنوریت (اکسید مس) را نشان داد که نشان‌دهنده رسوب و کاهش حلالیت مس است. به‌طور کلی، GGBS فعال شده با منیزیا نشان‌دهنده پتانسیل بالای خود در بهبود خاک‌های آلوده به مس است.

با توجه به سایر مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از سیمان‌های ژئوپلیمری برای حذف فلزات سنگین از خاک، هدف اصلی این مطالعه، مقایسه عملکرد سیمان ژئوپلیمری با دو نوع سرباره مجزای ذوب‌آهن و فولاد و همچنین سیمان پرتلند معمولی به‌عنوان چسب است. در این بررسی، دو نوع محلول قلیایی، شامل سدیم هیدروکسید و متاسیلیکات سدیم، در نسبت‌های مختلف برای فعال‌سازی سرباره مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین، کارایی این ترکیبات در کنترل انتشار یون‌های فلزی و تأثیر شرایط و زمان عمل‌آوری بر مقاومت مکانیکی نمونه‌ها و تثبیت آلاینده‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- نمونه خاک و مواد آزمایشگاهی استفاده شده

در این تحقیق از نمونه خاک آلوده از محل پسماند معدن سرب و روی معدنی واقع در شهرستان بوئین‌زهرآ استفاده شد. این منطقه به دلیل فعالیت‌های معدنی، حاوی مقادیر قابل‌توجهی از پسماندهای معدنی است که به شکل نامناسبی در محیط دپو شده‌اند. انباشت نادرست این پسماندها منجر به افزایش خطر آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های اطراف شده و به یک منبع بالقوه آلودگی زیست‌محیطی تبدیل گردیده است. برای بررسی دقیق این موضوع، نمونه‌برداری به‌صورت کاملاً تصادفی از نقاط مختلف این محل انجام شد. پس از جمع‌آوری نمونه‌ها و به‌منظور افزایش یکنواختی و کاهش اثرات متغیرهای محلی، نمونه‌ها با یکدیگر ترکیب و سپس از الک شماره ۱۰ عبور داده شدند تا نمونه‌ای همگن و مناسب برای انجام آزمایش‌های بعدی حاصل شود. این رویکرد امکان بررسی دقیق‌تر میزان آلودگی فلزات سنگین و اثرات زیست‌محیطی این پسماندها را فراهم می‌آورد.

جهت تثبیت آلودگی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین در این تحقیق، از سیمان ژئوپلیمری و سیمان پرتلند تولیدی شرکت سیمان آبیگ به عنوان نمونه شاهد استفاده شد. برای تولید سیمان ژئوپلیمری در این تحقیق، از دو نوع سرباره مجزا استفاده شده است: سرباره ذوب‌آهن و سرباره فولاد. سرباره ذوب‌آهن از نوع سرباره دانه‌ای کوره بلند (GGBFS) از کارخانه ذوب‌آهن اصفهان و سرباره فولاد (Slag) نیز از سرباره کوره قوس الکتریکی شرکت ایران سرباره در استان اصفهان تهیه شد. سرباره دانه‌ای کوره بلند به‌طور عمده در فرایند تولید آهن خام به‌عنوان یک محصول جانبی تولید می‌شود. این سرباره با سرد شدن سریع در آب به شکل دانه‌ای در می‌آید که حاوی مقادیر بالایی از سیلیکا و آلومینا است. این ترکیبات باعث می‌شوند که سرباره کوره بلند پتانسیل بالایی در تولید سیمان ژئوپلیمری داشته باشد و به‌عنوان یک ماده پوزولانی قوی عمل کند. از سوی دیگر، سرباره قوس الکتریکی در فرایند ذوب مجدد فلزات و بازیافت فولاد به وجود می‌آید. این سرباره معمولاً دارای ترکیبات متفاوتی از جمله اکسیدهای کلسیم، سیلیکا و آهن است که به آن خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوتی می‌بخشد. ساختار این سرباره به دلیل فرایند تولید آن به‌گونه‌ای است که ممکن است در ترکیب با سایر مواد، خواص ژئوپلیمری متفاوتی ایجاد کند. هدف استفاده از این دو نوع سرباره متفاوت (جدول ۱)، بررسی تأثیر ساختار و ترکیب شیمیایی آن‌ها در تثبیت آلودگی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین بود. با توجه به اختلافات موجود در ترکیب و ساختار این دو سرباره، عملکرد هریک در فرایند تولید سیمان ژئوپلیمری و تثبیت آلودگی‌های خاک بررسی شد. این ارزیابی می‌تواند به انتخاب سرباره مناسب‌تر برای استفاده در پروژه‌های پاک‌سازی محیط‌زیست و تولید مصالح ساختمانی پایدار کمک کند.

جدول ۱: آنالیز شیمیایی سرباره ذوب آهن و سرباره فولاد

Table 1: Chemical analysis of GGBFS and steel slag

SLAG (%)	GGBFS (%)	ترکیب شیمیایی
۴۵/۲	۳۷/۹	CaO
۱۷/۸	۳۵/۹	SiO ₂
۹/۵	۸/۹	MgO
۳/۲	۸/۴	Al ₂ O ₃
-	۲/۱	BaO
۰/۹	۱/۹	TiO ₂
۶/۱	۱/۵	MnO ₂
۱/۱	۰/۷	SO ₃
۰/۶	۰/۷	K ₂ O
۲۵/۴	۰/۷	FeO
-	۰/۳	SrO
۰/۳	-	Na ₂ O
۲/۴	۰/۹	LOI

در این تحقیق، از دو نوع محلول قلیایی سدیم هیدروکسید با درجه خلوص ۹۸ درصد و همچنین ترکیبی از سدیم هیدروکسید و متا سیلیکات سدیم در نسبت‌های مختلف برای فعال‌سازی سرباره استفاده شد. برای تهیه محلول سدیم هیدروکسید، ابتدا مقدار سدیم هیدروکسید لازم برای تهیه محلول با غلظت مشخص طبق معادله ۱ محاسبه شد.

$$G = \frac{N \times V \times M_m}{1000} \quad (1)$$

در این معادله N نرمالیه مورد نیاز بر حسب گرم بر مول، V حجمی دلخواه از محلول بر حسب میلی لیتر، Mm جرم مولی سدیم هیدروکسید بر حسب گرم بر مول و G مقدار مورد نیاز از سدیم هیدروکسید بر حسب گرم می باشد. محاسبات به این صورت است که برای تهیه ۱ لیتر محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مولار، باید ۳۲۰ گرم سدیم هیدروکسید جامد را در آب حل کرد. برای تهیه محلول ابتدا مقدار دقیق سدیم هیدروکسید جامد با استفاده از ترازو وزن شد. سپس مقدار مشخصی آب مقطر (کمتر از حجم نهایی) در ظرف شیشه‌ای ریخته شد. سدیم هیدروکسید به آرامی به آب مقطر اضافه گردید. باید توجه داشت که افزودن سدیم هیدروکسید به آب باعث آزاد شدن حرارت و تولید گاز می‌شود. بنابراین، این مرحله باید با احتیاط و به آرامی انجام شود و از دستکش و ماسک استفاده شود تا از بروز هرگونه خطر جلوگیری شود. پس از انحلال کامل سدیم هیدروکسید، محلول هم زده شد تا اطمینان حاصل شود که تمام ذرات به طور یکنواخت در آب حل شده‌اند. در نهایت، حجم محلول با افزودن آب مقطر به میزان لازم، به حجم نهایی رسانده شد. محلول سدیم هیدروکسید تهیه شده در یک ظرف شیشه‌ای درب‌دار نگهداری شد و برای استفاده‌های بعدی در آزمایش‌ها استفاده شد. در این مطالعه طبق نتایج تحقیقات گذشته از محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مولار که یک غلظت بهینه می باشد استفاده شده است.

سیلیکات سدیم که به‌عنوان چسب شیشه نیز شناخته می‌شود، یک ترکیب شیمیایی است که شامل سیلیکات‌های سدیم و آب است. سیلیکات سدیم یک ترکیب قلیایی است که pH بالایی دارد. این ویژگی به‌ویژه در فرایندهای ژئوپلیمری بسیار مهم است، زیرا شرایط قلیایی لازم برای فعال‌سازی مواد سیلیکاتی و تشکیل ژل ژئوپلیمر را فراهم می‌کند. سیلیکات سدیم به‌صورت جامد (پودر یا دانه‌ای) و مایع موجود است. شکل مایع آن معمولاً به‌عنوان چسب یا ماده اتصال‌دهنده به کار می‌رود و به دلیل خواص قلیایی و چسبندگی بالا، در بسیاری از فرایندهای شیمیایی و صنعتی استفاده می‌شود. در این تحقیق، از متا سیلیکات سدیم به‌صورت مایع استفاده شده است. سیلیکات سدیم مایع به دلیل قابلیت انحلال در آب و خاصیت چسبندگی بالا، به‌عنوان یک ماده اتصال‌دهنده در فرمولاسیون ژئوپلیمرها و برای تثبیت خاک‌های آلوده به فلزات سنگین مورد استفاده قرار گرفته است.

در این تحقیق، نسبت سدیم هیدروکسید به متاسیلیکات سدیم در محدوده ۰/۵ تا ۲ انتخاب شد تا بهینه‌ترین شرایط فعال‌سازی قلیایی

برای تثبیت فلزات سنگین فراهم شود. انتخاب این محدوده بر اساس مطالعات پیشین و اصول شیمیایی ژئوپلیمرها انجام گرفت، زیرا نسبت‌های کمتر از ۵/۰ موجب تشکیل ناکافی ژل آلومینوسیلیکاتی و کاهش کارایی تثبیت می‌شوند، در حالی که نسبت‌های بالاتر از ۲ می‌توانند باعث افزایش بیش از حد قلیاییت، ترک‌خوردگی و کاهش کارایی نمونه‌ها گردند. این محدوده همچنین امکان کنترل ویسکوزیته، سرعت واکنش و زمان عمل‌آوری را فراهم می‌کند تا نمونه‌ها به راحتی قالب‌گیری و متراکم شوند و همزمان مقاومت مکانیکی و عملکرد تثبیت فلزات حفظ گردد.

۲-۲- طرح اختلاط و روش ساخت نمونه‌ها

ابتدا خاک، سرباره و سیمان به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس در آون خشک شدند تا اطمینان حاصل شود که هیچ رطوبتی در مواد باقی نمانده است. این مرحله برای کنترل دقیق درصد رطوبت نمونه‌ها ضروری بود، زیرا رطوبت باقی‌مانده می‌توانست نتایج را تغییر دهد. محلول قلیایی نیز یک روز قبل از ساخت نمونه‌ها تهیه شد. این اقدام به این دلیل انجام شد که محلول قلیایی در زمان تولید حرارت تولید می‌کند و باید فرصت کافی برای کاهش این حرارت وجود داشته باشد تا در زمان اختلاط با دیگر مواد، هیچ تأثیری بر خواص نهایی نمونه‌ها نگذارد.

در فرایند ساخت نمونه‌های سیمان ژئوپلیمری، ابتدا محلول قلیایی با سرباره به مدت ۵ دقیقه مخلوط شد تا واکنش اولیه به طور یکنواخت آغاز شود. سپس خاک‌آلوده به مخلوط اضافه و به مدت ۱۰ دقیقه دیگر هم زده شد تا تمامی اجزا به صورت همگن در نمونه توزیع شوند. این مدت زمان برای اطمینان از تشکیل ساختارهای ژئوپلیمری مناسب و توزیع یکنواخت آلودگی در نمونه‌ها انتخاب شد. برای ساخت نمونه‌های سیمان پرتلند، ابتدا سیمان پرتلند با آب مخلوط شد و پس از رسیدن به خمیری یکنواخت، خاک‌آلوده به مخلوط اضافه و به دقت هم زده شد. در این مرحله، از آب مقطر استفاده شد تا اطمینان حاصل شود که هیچ‌گونه مواد محلول در آب معمولی نتایج را تحت تأثیر قرار ندهد. این موضوع به خصوص در مطالعات میکروسکوپی ریزساختار نمونه‌ها اهمیت داشت، چرا که هرگونه ناخالصی می‌توانست منجر به انحراف در نتایج شود.

برای ساخت نمونه‌ها از قالب‌های فولادی به ابعاد ۳۸×۷۶ میلی‌متر استفاده شد. این قالب‌ها به دلیل مقاومت بالا در برابر تغییر شکل و دوام در برابر فشارهای بالا انتخاب شدند. ابتدا داخل قالب‌ها یک لایه نازک از طلق قرار داده شد تا نمونه‌ها به راحتی از قالب جدا شوند. نمونه‌ها به صورت لایه‌لایه ساخته شدند، به این صورت که مخلوط در سه لایه مساوی درون قالب قرار گرفت. هر لایه به کمک جک هیدرولیکی فشرده شد تا به تراکم مطلوب برسد. فشرده‌سازی در هر لایه با دقت انجام شد تا از یکنواختی تراکم و حذف هوا درون نمونه اطمینان حاصل شود. پس از پر شدن قالب‌ها، نمونه‌ها از قالب‌ها خارج شده، سطح آن‌ها صاف شد و به مدت معین در شرایط عمل‌آوری مختلف (دما و رطوبت کنترل‌شده) نگهداری شدند.

انتخاب و تنظیم نسبت‌های مختلف مواد مانند خاک، سیمان و سرباره نیازمند آزمایش‌های دقیقی بود. تغییرات جزئی در نسبت‌های مواد می‌توانستند خواص نهایی نمونه‌ها را به طور چشمگیری تغییر دهند. ابتدا محتوای مواد آلی موجود در خاک اندازه‌گیری شد و سپس بر اساس استانداردهای نشریه ۲۶۸، درصد استفاده از چسب تعیین گردید. طبق این نشریه، هر خاکی که حاوی کمتر از ۲ درصد مواد آلی بوده و مقدار سولفات قابل حل در آب آن از مقادیر مشخص شده تجاوز نکند، قابلیت تثبیت با سیمان پرتلند را دارد. به طور کلی، اگر دامنه خمیری خاک بیشتر از ۳۰ باشد، عمل اختلاط خاک با سیمان دشوار می‌شود و فرایند تثبیت به خوبی انجام نمی‌گیرد. همچنین، سیمان بر خاک‌های ماسه‌ای که حاوی بیش از ۲ درصد مواد آلی هستند یا pH آن‌ها کمتر از ۳/۵ است، اثر چندانی ندارد.

در این تحقیق، از چسب در درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد استفاده شد تا هم میزان تأثیر افزودن چسب ارزیابی شود و هم درصد بهینه برای تثبیت خاک به دست آید. این درصدها به عنوان نقاط مرجع انتخاب شدند تا تأثیر افزایش مقدار چسب بر خواص مکانیکی و شیمیایی نمونه‌ها مشخص شود.

یکی از اصلی‌ترین چالش‌ها، تنظیم دقیق درصد رطوبت مواد اولیه بود. عدم دستیابی به درصد رطوبت مناسب می‌توانست منجر به تراکم ناکافی یا غیریکنواخت نمونه‌ها شود که تأثیر مستقیمی بر خواص مکانیکی و پایداری نمونه‌ها داشت؛ بنابراین، برای هر ترکیب، آزمایش تراکم به صورت مجزا انجام شد تا درصد رطوبت بهینه آن ترکیب مشخص شود. بر این اساس، نمونه‌ها با توجه به درصد رطوبت بهینه مخصوص هر ترکیب ساخته شدند. این روش اجازه داد تا تأثیر اضافه کردن تثبیت‌کننده‌ها بر روی پارامترهای آزمایش تراکم نیز

مورد بررسی قرار داده شود. نکته‌ای که در نمونه‌های مربوط به سیمان ژئوپلیمری وجود داشت این بود که این نمونه‌ها به‌جای آب با محلول قلیایی ساخته می‌شدند و این ممکن بود نتایج آزمایش تراکم را دچار خطا کند؛ بنابراین، برای انجام آزمایش تراکم این نمونه‌ها به‌جای آب از محلول قلیایی سدیم هیدروکسید استفاده شد. تصاویر آزمایشگاهی آزمایش تراکم خاک آلوده در ترکیب با تثبیت‌کننده‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: تصاویر آزمایشگاهی آزمایش تراکم خاک آلوده در ترکیب با تثبیت‌کننده‌ها

Fig. 1: Laboratory images of soil compaction testing in combination with stabilizers

برای ساخت نمونه‌های تک‌محوری، دو روش متراکم‌سازی دینامیکی و متراکم‌سازی استاتیکی استفاده می‌شود. در این تحقیق، روش استاتیکی به‌عنوان روش اصلی متراکم‌سازی انتخاب شد. استفاده از این روش باعث کاهش خطاهای ناشی از عدم یکنواختی تراکم در نمونه‌ها می‌شود و به نتایج دقیق‌تر و قابل‌اعتمادتری منجر می‌گردد. استفاده از جک هیدرولیکی برای فشردن نمونه‌ها نیازمند دقت بالا در تنظیم فشار و حفظ یکنواختی تراکم در هر لایه بود. هرگونه ناهم‌آهنگی در فشردن لایه‌ها می‌توانست منجر به ناپایداری و تفاوت در نتایج آزمایش‌های تک‌محوری شود.

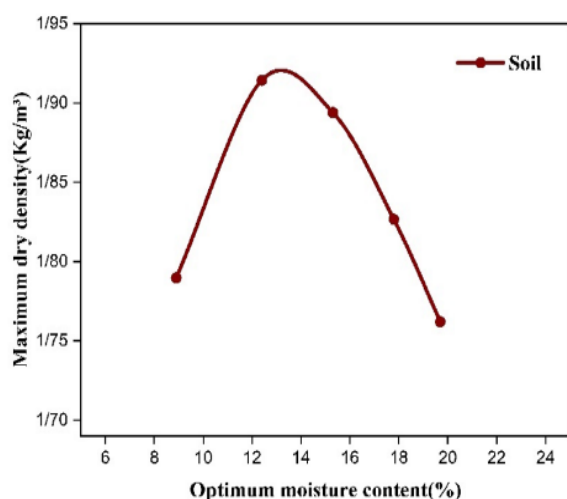
شرایط محیطی مانند دما و رطوبت در طول فرایند ساخت و نگهداری نمونه‌ها باید به‌دقت کنترل می‌شد. تغییرات کوچک در این شرایط می‌توانستند فرایند گیرش و سخت‌شدن مواد را تحت‌تأثیر قرار دهند. برای بررسی تأثیر شرایط مختلف بر کیفیت نمونه‌ها، دو نوع عمل‌آوری متفاوت در نظر گرفته شد. در روش عمل‌آوری تر نمونه‌ها در اتاقی با رطوبت نسبی ۹۸ درصد قرار داده شدند. این شرایط به‌منظور شبیه‌سازی محیط‌های مرطوب و ارزیابی تأثیر رطوبت بالا بر خواص نمونه‌ها طراحی شد. در روش عمل‌آوری خشک نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس درون آون قرار گرفتند. سپس، برای بقیه مدت‌زمان عمل‌آوری، نمونه‌ها در دمای محیط نگهداری شدند. این روش به‌منظور شبیه‌سازی شرایط خشک مورد استفاده قرار گرفت. این دو روش عمل‌آوری کمک کرد تا تأثیرات مختلف شرایط محیطی بر روی خصوصیات نهایی نمونه‌ها بررسی و تحلیل شود.

برای بررسی تأثیر مدت زمان عمل آوری بر خواص نمونه‌ها، چهار دوره زمانی مختلف شامل ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز در نظر گرفته شد. مدت ۳ روز به تحلیل تغییرات اولیه و تأثیرات فوری عمل آوری بر خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها اختصاص یافت. دوره ۷ روزه به بررسی روند تغییرات و پیشرفت فرایند سیمانی شدن پرداخت. مدت ۲۸ روز، معادل یک ماه، به عنوان نقطه مرجع برای تحلیل تغییرات بلندمدت و تثبیت خواص نمونه‌ها انتخاب شد. در نهایت، مدت ۹۰ روز به منظور ارزیابی تأثیرات طولانی مدت عمل آوری و بررسی نهایی خواص و پایداری نمونه‌ها در نظر گرفته شد. این زمان‌های مختلف عمل آوری امکان تحلیل تأثیر زمان بر عملکرد و کیفیت نمونه‌ها در مراحل مختلف فرایند را فراهم ساخت.

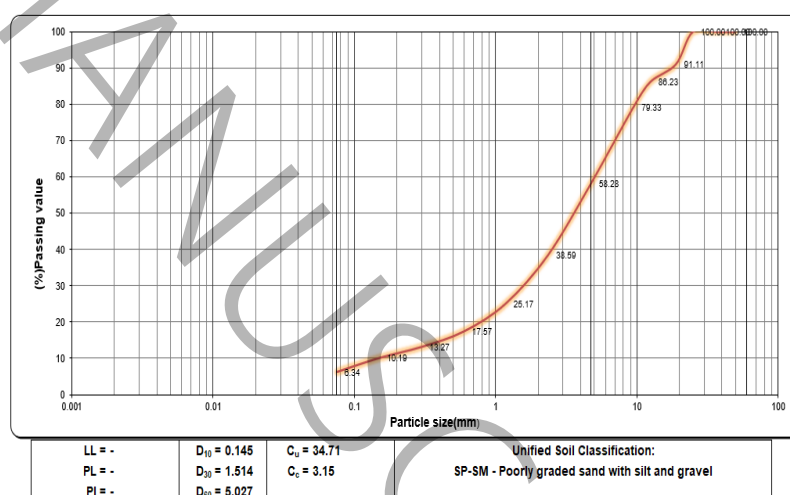
۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمایش‌ها بر روی نمونه خاک اولیه

در این تحقیق، درصد رطوبت خاک با استفاده از روش استاندارد ASTM D2216 تعیین شد. برای تعیین نوع و طبقه‌بندی خاک، آزمایش دانه‌بندی به روش الک مطابق با استاندارد ASTM D6913-04 انجام شد. جهت تعیین وزن مخصوص نسبی ذرات خاک (Gs)، از آزمایش وزن مخصوص نسبی مطابق با استاندارد ASTM D854 استفاده شد. آزمایش تراکم خاک به منظور تعیین چگالی خشک حداکثر و رطوبت بهینه خاک طبق استاندارد ASTM D698 انجام شد. برای تعیین میزان pH خاک، آزمایش مربوطه طبق استاندارد ASTM D4972 انجام شد. برای تعیین میزان مواد آلی موجود در خاک از روش احتراق استفاده شد. این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D2974 انجام گردید. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش دانه‌بندی به روش الک و تحلیل نمودار دانه‌بندی، مشخص شد که خاک مورد بررسی طبق طبقه‌بندی یونیفاید^۱ از نوع ماسه - سیلت (SP-SM) است. این طبقه‌بندی به معنای آن است که خاک عمدتاً از ذرات ماسه‌ای با محتوای مشخصی از ذرات ریز سیلت تشکیل شده است. خاک SP-SM به طور خاص به عنوان ماسه‌ای بد دانه‌بندی شده با مقادیر قابل توجهی از سیلت توصیف می‌شود که می‌تواند بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک تأثیر بگذارد. نتایج دانه بندی خاک و تراکم استاندارد آن در شکل ۲ نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

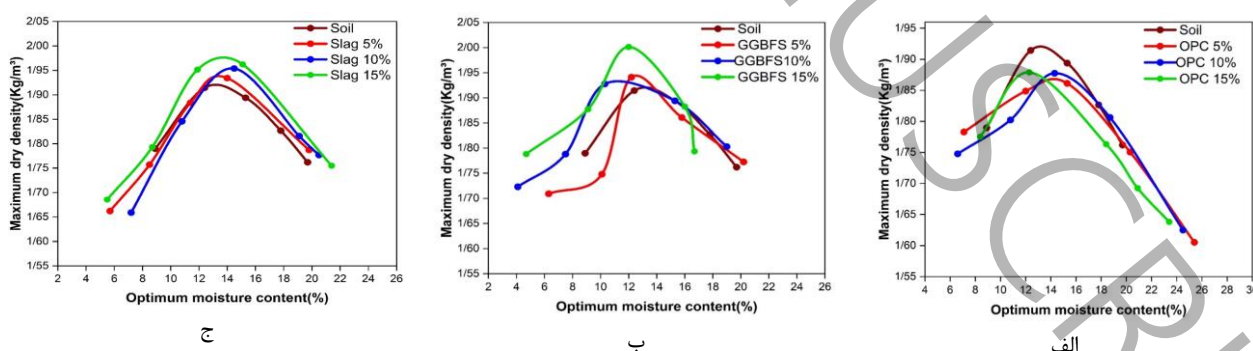
شکل ۲: الف) نمودار دانه بندی خاک مورد مطالعه، ب) تراکم استاندارد خاک
Fig. 2: a) Grading diagram of the studied soil, b) Standard soil compaction

^۱ Unified Soil Classification System - USCS

به منظور تعیین میزان فلزات سنگین بر روی نمونه اولیه خاک، آزمایش طیف سنجی پلاسمای جفت شده القایی (ICP) انجام شد. آزمایش ICP یک تکنیک تحلیلی قدرتمند برای شناسایی و تعیین غلظت عناصر در نمونه‌ها است. این روش به دلیل دقت بالا و قابلیت اندازه‌گیری هم‌زمان چندین عنصر به طور گسترده‌ای در علوم محیطی، شیمی، مواد و دیگر حوزه‌های تحقیقاتی استفاده می‌شود. همانطور که عنوان شد، به منظور افزایش دقت و قابلیت اعتماد نتایج، نمونه‌ها به صورت تصادفی از مکان‌های مختلف انتخاب شدند. این روش تصادفی‌سازی به اطمینان از نمایندگی جامع و دقیق از وضعیت واقعی آلودگی خاک کمک کرد. این آزمایش به خصوص بر روی اندازه‌گیری میزان فلزات سنگین مانند سرب و روی متمرکز شد. میانگین نتایج غلظت سرب به میزان ۲۵۰۷۷ ppm و غلظت روی به میزان mg/kg ۱۶۷۲۱ بدست آمد. نتایج آزمایش ICP نشان می‌دهد که غلظت سرب در نمونه‌های خاک به طور معناداری بالاتر از حد استانداردهای زیست‌محیطی موجود است. این افزایش غلظت سرب می‌تواند نشان‌دهنده آلودگی محیطی و نیاز به بررسی‌های بیشتری باشد. در مقابل، غلظت روی در نمونه‌ها در محدوده قابل قبول و مطابق با استانداردهای تعیین شده قرار داشت.

۲-۳- آزمایش تراکم

آزمایش تراکم یکی از روش‌های مهم در مهندسی ژئوتکنیک برای تعیین ویژگی‌های تراکمی خاک است. هدف اصلی این آزمایش، تعیین حداکثر وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه خاک است که برای دستیابی به تراکم مطلوب در پروژه‌های مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمودارهای مرتبط با آزمایش تراکم در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج بیانگر آن است که افزودن سیمان، سرباره ذوب‌آهن و فولاد تأثیرات مختلفی بر پارامترهای تراکم دارد. این تغییرات به وضوح در نمودارهای درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک مشاهده می‌شود. نمودارهای تراکم‌پذیری خاک نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل توجه در رفتار مکانیکی خاک با استفاده از افزودنی‌های مختلف است. افزودن سیمان به خاک باعث افزایش درصد رطوبت بهینه شد. این افزایش ممکن است به دلیل ویژگی‌های جذب آب توسط سیمان و نیاز بیشتر به رطوبت برای تراکم بهتر باشد. با این حال، افزودن سیمان منجر به کاهش وزن مخصوص خشک شد. این کاهش ممکن است به دلیل تغییر در ساختار داخلی خاک و سیمان و تأثیر آن بر تراکم‌پذیری خاک باشد. استفاده از سرباره ذوب‌آهن باعث افزایش درصد رطوبت بهینه شد. این افزایش می‌تواند به دلیل واکنش‌های شیمیایی سرباره با خاک و افزایش نیاز به رطوبت باشد. سرباره ذوب‌آهن همچنین باعث افزایش وزن مخصوص خشک خاک شد. این افزایش احتمالاً به دلیل خصوصیات فیزیکی و ترکیب شیمیایی سرباره است که موجب بهبود تراکم خاک می‌شود. افزودن سرباره فولاد به خاک تأثیر ناچیزی بر درصد رطوبت بهینه داشت که نشان می‌دهد این افزودنی تأثیر کمی بر نیاز رطوبت خاک دارد. با این حال، افزودن سرباره فولاد به طور چشمگیری باعث افزایش وزن مخصوص خشک شد. این افزایش ممکن است به دلیل خواص فیزیکی سرباره قوس الکتریکی و تأثیر آن بر تراکم‌پذیری بهتر خاک باشد.



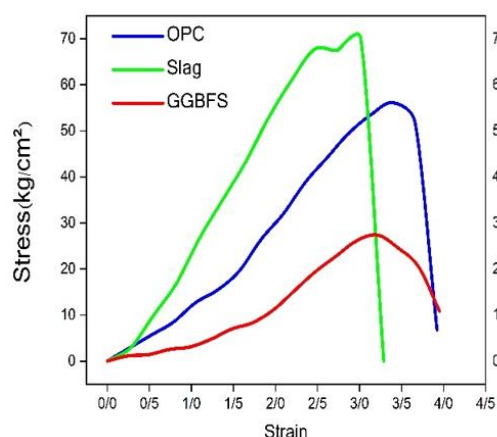
شکل ۳: تراکم مربوط به خاک آلوده (الف) مخلوط با سیمان (ب) مخلوط با سرباره ذوب‌آهن (ج) مخلوط با سرباره فولاد
Fig. 3: Compaction of contaminated soil a) mixed with cement b) mixed with GGBFS c) mixed with slag

۳-۳- آزمایش تک محوری

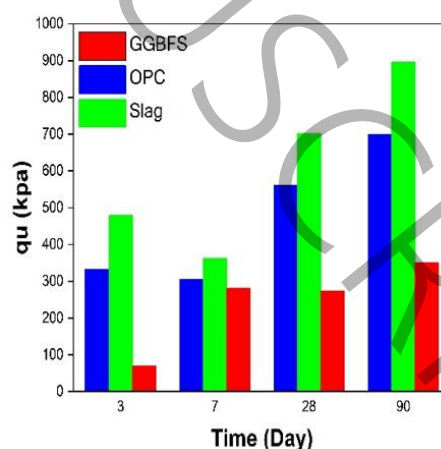
آزمایش تک محوری به منظور تعیین مقاومت فشاری و ویژگی‌های مکانیکی مواد به کار می‌رود. در این آزمایش، نمونه‌های استوانه‌ای یا مکعبی با ابعاد استاندارد آماده شده و در دستگاه تعیین مقاومت فشاری قرار می‌گیرند. بار به طور یکنواخت در امتداد یک محور به

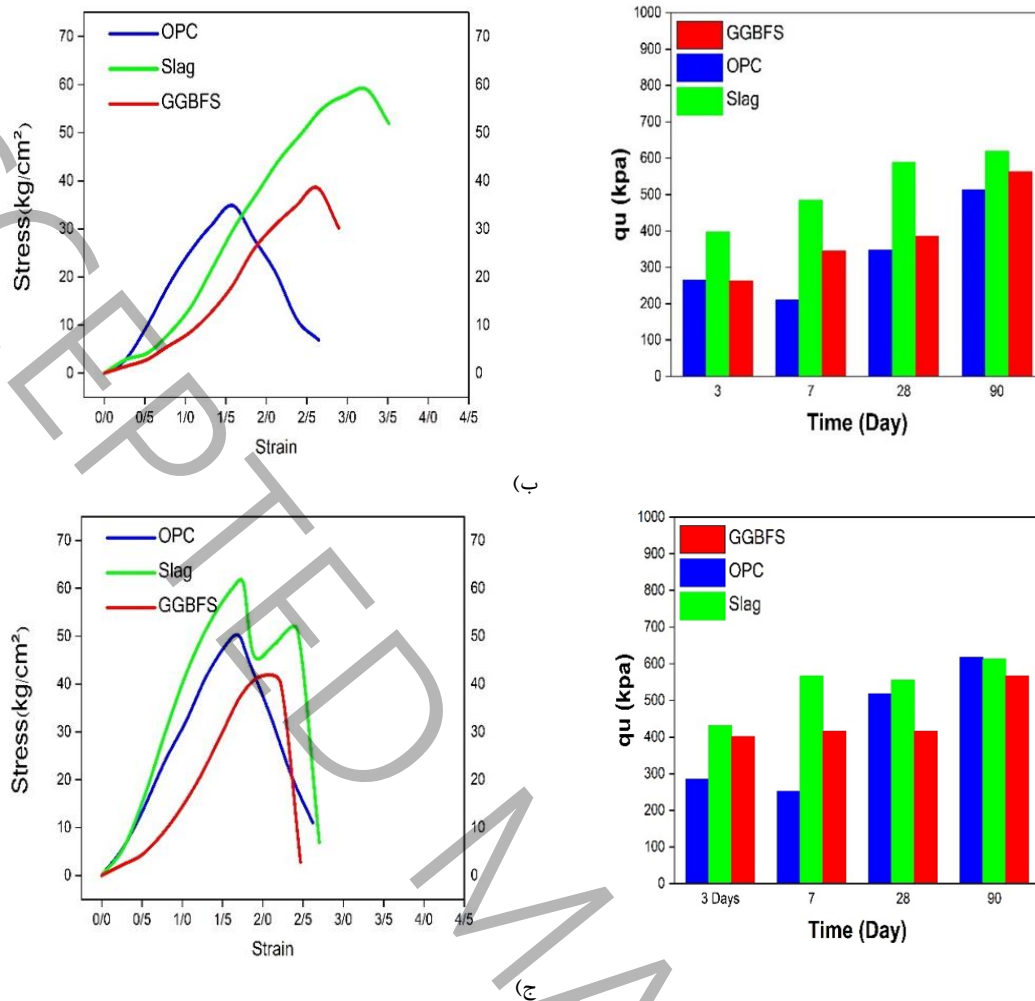
نمونه وارد می‌شود تا به حد شکست یا بار نهایی برسد. تغییرات بار و تغییر شکل نمونه در طول آزمایش ثبت شده و به کمک آن منحنی تنش - کرنش رسم می‌شود. این منحنی امکان تعیین مقاومت فشاری نهایی، مدول الاستیسیته و تحلیل رفتار شکست مواد را فراهم می‌آورد. آزمایش تک‌محوری به دلیل دقت بالا و سادگی، برای ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی مواد و مقایسه آنها به کار می‌رود و اطلاعات ارزشمندی درباره توانایی مواد در تحمل بارهای فشاری ارائه می‌دهد. استفاده از آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده برای ارزیابی اثربخشی تثبیت و جامدسازی به یک استاندارد بین‌المللی تبدیل شده است. مواد تثبیت‌شده و جامد شده باید از استحکام کافی برخوردار باشند تا بتوانند بارهای موادی را که روی آنها قرار می‌گیرد تحمل کنند. علاوه بر این، انتظار می‌رود که نتایج آزمایش با اثربخشی تثبیت ضایعات معدنی مرتبط باشد، زیرا مواد معدنی در ماتریس هیدراتاسیون گره خورده‌اند. بنابراین، مقاومت فشاری اغلب به‌عنوان پارامتر شاخص اثربخشی تثبیت استفاده می‌شود. در این تحقیق، به‌منظور بررسی تأثیرات مختلف بر مقاومت فشاری، نمونه‌های خاک با استفاده از تثبیت‌کننده‌های متفاوت و تحت شرایط مختلف عمل‌آوری تهیه شدند. هدف از این آزمایش، بررسی تأثیر پنج پارامتر اصلی بر مقاومت فشاری نهایی و رفتار تنش - کرنش نمونه‌ها شامل زمان عمل‌آوری، شرایط عمل‌آوری، نوع تثبیت‌کننده، نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم و درصد بهینه مواد بود. تأثیر مدت عمل‌آوری و درصد تثبیت‌کننده در شکل ۴ نشان داده شده است. با افزایش مدت زمان عمل‌آوری، مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها به طور چشمگیری افزایش یافت. در مورد نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان پرتلند، مشاهده شد که مقاومت تک‌محوری به طور مستقیم با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش پیدا می‌کند. نمونه‌هایی که به مدت ۳ روز عمل‌آوری شدند، کمترین مقاومت را داشتند، اما نمونه‌هایی که به مدت ۷، ۲۸، و ۹۰ روز عمل‌آوری شدند، به‌ترتیب مقاومت فشاری بالاتری نشان دادند. این روند نشان‌دهنده تأثیر مثبت زمان عمل‌آوری بر فرایند هیدراتاسیون و تقویت ساختار سیمان است. نمونه‌های ژئوپلیمری مقاومت تک‌محوری بسیار بالاتری نسبت به نمونه‌های سیمان پرتلند در مدت‌زمان ۳ روز عمل‌آوری نشان دادند. این نشان‌دهنده عملکرد برتر اولیه ژئوپلیمرها در مقایسه با سیمان پرتلند در مراحل ابتدایی عمل‌آوری است. با این حال، با گذشت زمان و افزایش مدت عمل‌آوری، افزایش مقاومت در هر دو نوع نمونه مشاهده شد، اما روند افزایش مقاومت در نمونه‌های ژئوپلیمری به‌طور کلی سریع‌تر و بیشتر از سیمان پرتلند بود. نتایج آزمایش‌های تک‌محوری نشان داد که نوع تثبیت‌کننده تأثیر قابل‌توجهی بر مقاومت نمونه‌ها دارد. در میان مواد مختلف، سرباره فولاد با ارائه بالاترین مقاومت فشاری عملکرد برتری نسبت به سایر مواد داشت. علت آن ترکیب شیمیایی غنی از کلسیم و آلومینات‌ها، ریزدانه بودن و سطح تماس بالای ذرات و همچنین تراکم بهتر نمونه‌ها است. این نتایج تأکید می‌کند که انتخاب نوع تثبیت‌کننده می‌تواند به طور قابل‌توجهی بر عملکرد مکانیکی نمونه‌ها تأثیر بگذارد.

با توجه به نتایج آزمایش‌های تک‌محوری، مشاهده شد که افزودن تثبیت‌کننده در مقدار ۱۰ درصد، مقاومت فشاری نمونه‌ها را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. این درصد از مواد افزودنی توانسته است به بهبود عملکرد مکانیکی نمونه‌ها کمک کند و نتایج مقاومتی مطلوبی را ارائه دهد. این امر نشان‌دهنده این است که ۱۰ درصد برای افزودن مواد، به‌ویژه در زمینه بهینه‌سازی مقاومت فشاری، به‌عنوان یک مقدار قابل‌قبول و مؤثر در فرایند تثبیت شناخته شده است.



(الف)



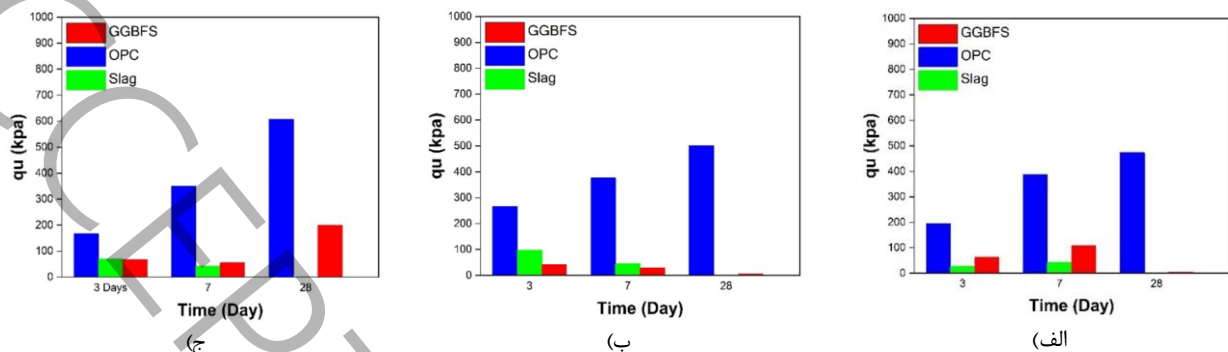


شکل ۴: مقاومت تک محوری و رفتار تنش-کرنش نمونه های ۲۸ روزه و عمل آوری خشک، الف) با میزان تثبیت کننده ۵٪ ب) با میزان تثبیت کننده ۱۰٪ ج) با میزان تثبیت کننده ۱۵٪

Fig. 4: Uniaxial strength and stress-strain behavior of 28-day and dry-cured specimens, a) with 5% stabilizer content b) with 10% stabilizer content c) with 15% stabilizer content

مقاومت تک محوری در درصد های مختلف تثبیت کننده در شرایط عمل آوری مرطوب در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که شرایط عمل آوری تأثیر قابل توجهی بر عملکرد مکانیکی نمونه ها دارد. برای نمونه های تثبیت شده با سیمان پرتلند، مشاهده شد که عمل آوری در شرایط مرطوب به طور مؤثرتری بر مقاومت تک محوری تأثیر می گذارد. نمونه های سیمان پرتلند که تحت شرایط مرطوب عمل آوری شدند، مقاومت فشاری بالاتری نسبت به نمونه های عمل آوری شده در شرایط خشک نشان دادند. باین حال، نمونه های عمل آوری شده در شرایط خشک نیز مقاومت قابل قبولی داشتند و به طور کلی ضعیف نبودند. در مورد نمونه های ژئوپلیمری، وضعیت به طور قابل توجهی متفاوت بود. این نمونه ها در شرایط خشک عملکرد بسیار خوبی داشتند و مقاومت تک محوری بالاتری نسبت به شرایط مرطوب نشان دادند. برعکس، در شرایط مرطوب، عملکرد ژئوپلیمرها ضعیف تر بود و برخی از نمونه های ۲۸ روزه حتی تخریب شده و مقاومت خود را به طور کامل از دست داده بودند. این تخریب ممکن است به دلیل عدم پایداری مناسب در برابر رطوبت یا واکنش های شیمیایی غیر بهینه در شرایط مرطوب باشد. رطوبت زیاد موجب رقیق شدن و تخریب ژل های آلومینوسیلیکاتی (N-A-S-H) یا C-A-S-H شد. این فرآیند باعث کاهش چسبندگی بین ذرات، شسته شدن بخش هایی از مواد ژل و کاهش مقاومت مکانیکی نمونه ها گردید. در نتیجه، حساسیت ژئوپلیمر به شرایط محیطی مرطوب عامل اصلی کاهش عملکرد مکانیکی آن ها بود. این نتایج نشان دهنده این است که شرایط عمل آوری تأثیر زیادی بر مقاومت نهایی نمونه ها دارد و انتخاب مناسب شرایط عمل آوری می تواند به بهبود عملکرد مکانیکی

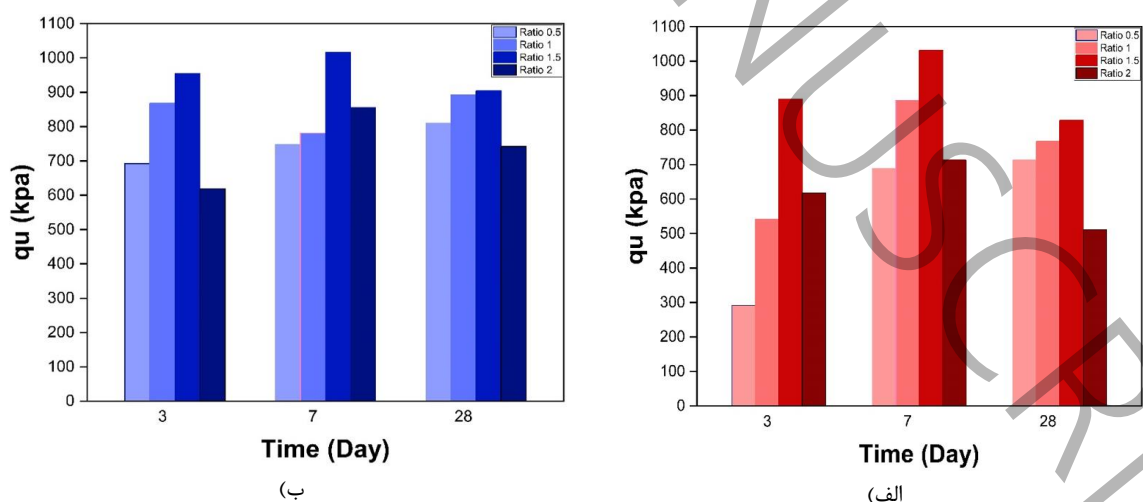
و دوام نمونه‌ها کمک کند. درحالی‌که سیمان پرتلند به‌خوبی در شرایط مرطوب عمل می‌کند، ژئوپلیمرها ممکن است نیاز به شرایط خاصی برای حفظ و بهبود عملکرد خود داشته باشند.



شکل ۵: مقاومت تک محوری نمونه و عمل آوری مرطوب الف) با میزان تثبیت‌کننده ۵٪ ب) با میزان تثبیت‌کننده ۱۰٪ ج) با میزان تثبیت‌کننده ۱۵٪

Fig. 5: Uniaxial strength of the sample and wet curing a) with a stabilizer content of 5% b) with a stabilizer content of 10% c) with a stabilizer content of 15%

در آزمایش‌های تک‌محوری، نسبت بهینه متاسیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید برای به‌دست‌آوردن حداکثر مقاومت فشاری به میزان ۱/۵ بدست آمد (شکل ۶). این نسبت بهینه بیانگر ایجاد تعادل مناسب میان تأمین یون‌های سیلیکات و قلیائیت محیط واکنش است، به‌گونه‌ای که فرآیند حل شدن و پلیمریزاسیون مؤلفه‌های آلومینوسیلیکاتی به‌طور مؤثر انجام می‌گیرد و ساختار ژلی متراکم‌تری شکل می‌گیرد. در این شرایط، تشکیل ژل‌های پایدار آلومینوسیلیکاتی موجب افزایش پیوستگی بین ذرات و بهبود انتقال تنش در نمونه‌ها می‌شود. در مقابل، نسبت‌های بالاتر متاسیلیکات سدیم می‌توانند باعث افزایش ویسکوزیته مخلوط و پراکندگی نامناسب مواد شوند که این امر به توزیع غیریکنواخت فعال‌کننده‌ها، تضعیف پیوندهای بین ذرات و کاهش کارایی مکانیکی منجر می‌گردد. همچنین، نسبت‌های غیربهینه می‌توانند واکنش‌های شیمیایی را دچار اختلال کرده و به تشکیل فازهای ضعیف‌تر یا واکنش‌های ناقص منجر شوند که در نهایت مقاومت نهایی نمونه‌ها را کاهش می‌دهد. به‌طور کلی، نسبت ۱/۵ به‌عنوان نسبت بهینه، تعادل مناسبی میان متاسیلیکات سدیم و سدیم هیدروکسید ایجاد کرده و بهترین عملکرد مکانیکی را در فرآیند تثبیت فراهم می‌آورد.



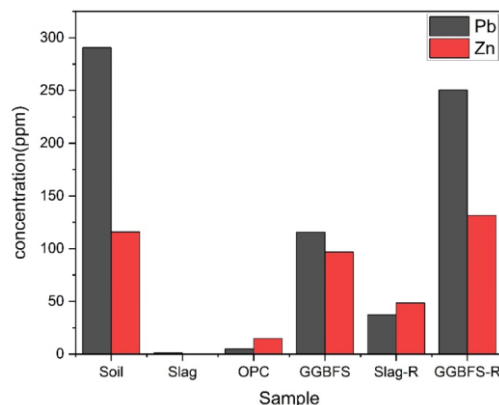
شکل ۶: مقاومت تک محوری با نسبت‌های مختلف NaOH/Na₂SiO₃ الف) نمونه‌های سرباره ذوب آهن ب) نمونه‌های سرباره فولاد

Fig. 6: Uniaxial strength with different NaOH/Na₂SiO₃ ratios a) GGBFS samples b) Steel slag samples

۳-۴- نتایج آزمایش تراوش آلودگی

بر اساس استانداردهای سازمان حفاظت از محیط زیست (EPA)، تمامی انباشت‌های پسماند صنایع و معادن باید از لحاظ غلظت فلزات سنگین توسط آزمایشات نشت (TCLP)^۱ کنترل گردد. همچنین اگر از این پسماندها در ساخت مصالح و مواد مختلف استفاده شود، باید تراوش آلودگی در مصالح و مواد ساخته شده از پسماندها نیز کنترل گردد. آزمایش TCLP شبیه‌سازی شرایط باران اسیدی در یک دوره زمانی طولانی (تقریباً ۱۰۰ سال) را انجام می‌دهد. این آزمایش با استفاده از یک محلول اسیدی ضعیف (معمولاً اسید استیک)، تأثیرات طولانی‌مدت بارش اسیدی را بر روی نمونه‌ها مدل‌سازی می‌کند و میزان آلاینده‌هایی که ممکن است در طول این مدت از نمونه‌ها آزاد شوند را اندازه‌گیری می‌کند. نتایج این آزمایش می‌تواند به تعیین پایداری و ایمنی بلندمدت مواد تثبیت‌کننده در مواجهه با شرایط محیطی کمک کند. برای انجام آزمایش تراوش آلودگی عمیق باطله معدنی از روش EPA 1311 و جهت ارزیابی پتانسیل انتشار فلزات سنگین از نمونه‌های تثبیت‌شده پس از ۲۸ روز عمل‌آوری استفاده شد. انتخاب دوره ۲۸ روزه برای نمونه‌ها بر اساس استانداردهای معمول در مطالعات مهندسی ژئوتکنیک و محیط زیست انجام شده است که مدت‌زمان کافی را برای تکمیل فرایندهای تثبیت و واکنش‌های شیمیایی در مواد فراهم می‌کند. در این آزمایش، ابتدا نمونه‌های تثبیت‌شده و شاهد به قطعات کوچک‌تر خرد شده و pH اولیه آن‌ها اندازه‌گیری شد. pH اولیه همه نمونه‌ها بالای ۵ بود، بنابراین برای آن‌ها از محلول استات استفاده شد. نمونه‌ها در محلول استات قرار گرفتند و به مدت ۱۸ تا ۲۴ ساعت در یک دستگاه همزن چرخشی نگهداری شدند. پس از این مدت، pH ثانویه نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. در این بررسی مشخص شد که pH ثانویه نمونه خاک شاهد و نمونه مربوط به سرباره فولاد فعال شده یا محلول متا سیلیکات سدیم هیدروکسید به کمتر از ۵ کاهش یافته است، بنابراین محلول استخراج این نمونه‌ها متفاوت بود. این تغییر در pH نشان‌دهنده تغییرات شیمیایی نمونه شاهد در طول آزمایش است. نتایج آزمایش TCLP (شکل ۷) نشان داد که سرباره فولاد به طور مؤثری توانسته از نشت آلودگی جلوگیری کند و مقادیر آلاینده‌ها در حد مطلوب و کمتر از استانداردهای تعیین‌شده بودند. سیمان پرتلند نیز عملکرد مشابهی داشت و به‌خوبی از نشت آلودگی جلوگیری کرد. با این حال، سرباره ذوب آهن ضعیف‌تر از دو گزینه دیگر عمل کرد و میزان آلودگی نشت شده از حد استاندارد بیشتر بود. علاوه بر این، هنگامی که متا سیلیکات به ترکیب اضافه شد، نتایج بدتر شدند و میزان نشت آلودگی افزایش یافت که نشان می‌دهد استفاده از این ماده ممکن است اثرات نامطلوبی بر روی کارایی تثبیت خاک داشته باشد. افزایش غلظت آلاینده‌ها در شیرابه را می‌توان به برهم‌خوردن تعادل شیمیایی و ساختاری ماتریس تثبیت‌شده نسبت داد. افزودن متاسیلیکات سدیم، به‌ویژه در نسبت‌های بالاتر از مقدار بهینه، موجب افزایش قابل توجه pH محیط می‌شود که این امر می‌تواند حلالیت برخی فلزات سنگین را افزایش داده و پیوندهای شیمیایی ایجادشده میان یون‌های فلزی و فازهای ژلی را تضعیف کند. از سوی دیگر، افزایش مقدار متاسیلیکات باعث بالا رفتن ویسکوزیته مخلوط و توزیع غیریکنواخت فعال‌کننده‌ها در ماتریس می‌شود، که این مسئله به تشکیل ساختارهای ناهمگن و افزایش تخلخل و نفوذپذیری منجر می‌گردد. افزایش نفوذپذیری، مسیرهای ترجیحی برای عبور شیرابه ایجاد کرده و امکان شستشوی یون‌های فلزی محبوس‌شده را فراهم می‌سازد. همچنین، تغییر در نوع و پایداری ژل‌های آلومینوسیلیکاتی در اثر نسبت‌های غیربهینه فعال‌کننده می‌تواند منجر به تشکیل فازهای ضعیف‌تر یا ناپایدار شود که در برابر تماس با محلول مهاجم، مقاومت کمتری داشته و در نتیجه آزادسازی آلاینده‌ها افزایش می‌یابد. همچنین، نتایج نشان داد که مقدار آلودگی در نمونه خاک شاهد کمتر از حد انتظار بود که احتمالاً به دلیل انتخاب نمونه از بخشی از خاک با آلودگی کمتر بوده است. این مسئله می‌تواند نشان‌دهنده تنوع در توزیع آلودگی در خاک مورد بررسی باشد.

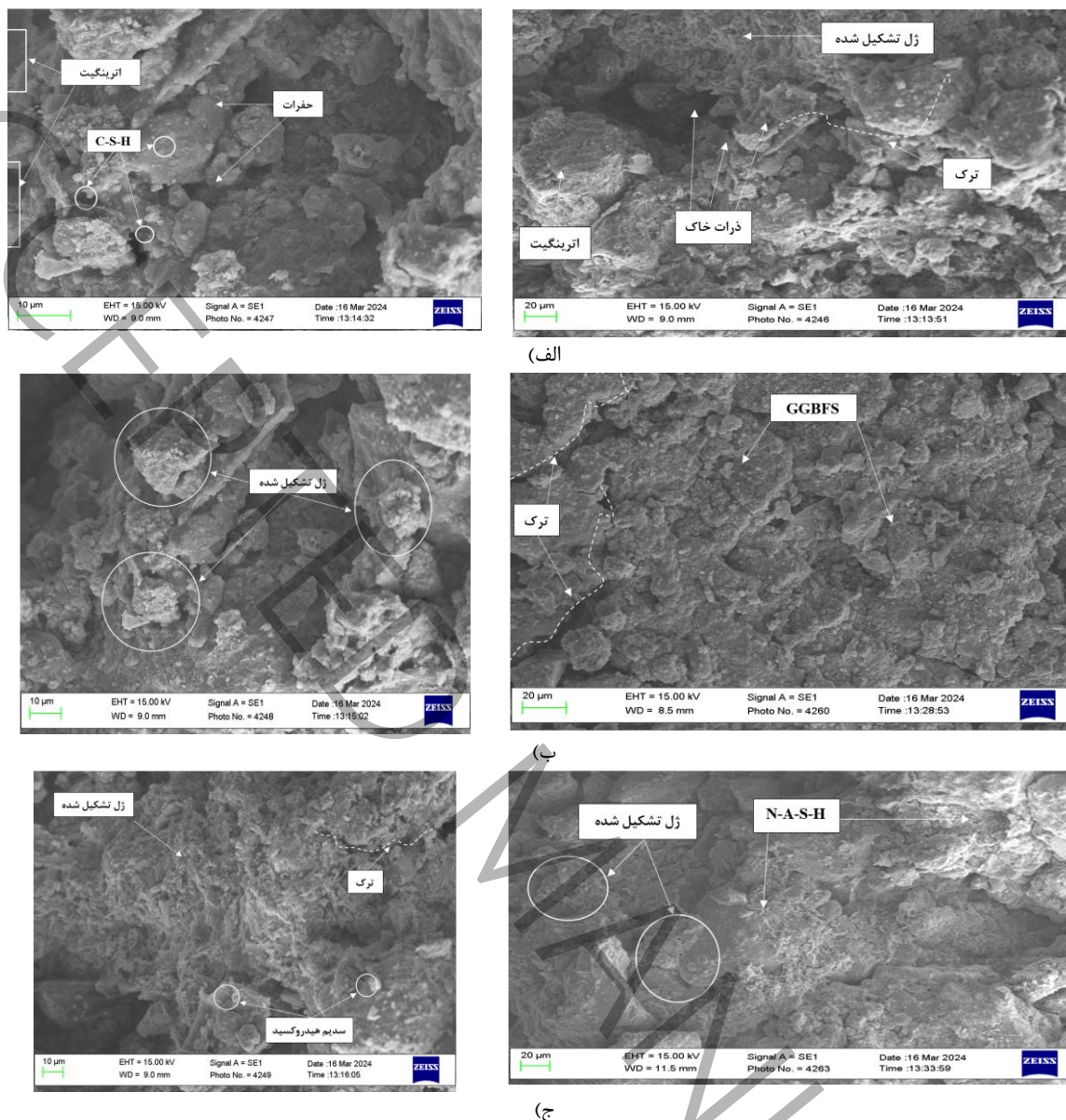
^۱ - Toxicity characteristic leaching procedure



شکل ۷: غلظت فلزات سنگین خارج شده از آزمایش TCLP
Fig. 7: Concentration of heavy metals extracted from TCLP test

۳-۵- بررسی ریزساختار نمونه‌های تثبیت شده

برای بررسی ریزساختار نمونه‌های تثبیت شده، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) استفاده شد. این تصاویر اطلاعات دقیقی در مورد نحوه توزیع فازها، نحوه پیوند ذرات خاک و تشکیل فازهای جدید در اثر استفاده از تثبیت کننده‌ها ارائه می‌دهند. به منظور انجام عکس برداری SEM قسمتی از نمونه‌ها که یکنواختی بیشتری داشته انتخاب شده و عکس برداری در مقیاس‌های متفاوت انجام گردید (شکل ۸). تصاویر SEM مربوط به نمونه‌های تثبیت شده با سیمان پرتلند نشان دهنده تشکیل فازهای هیدراته مانند C-S-H (کلسیم سیلیکات هیدرات) است. این فازها به عنوان چسب بین ذرات خاک عمل کرده و منجر به افزایش مقاومت فشاری می‌شوند. همچنین، فضاهای خالی بین ذرات خاک تا حد زیادی پر شده‌اند که نشان دهنده تراکم بهتر و کاهش تخلخل است. مطابق تصاویر خلل و فرج و درزهایی مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از تبخیر آب باشد. در تصاویر SEM نمونه‌های مربوط به سرباره ذوب آهن، تشکیل فازهای شیشه‌ای و غیر بلوری مشاهده شد که از ویژگی‌های معمول سرباره‌های فعال شده به صورت قلیایی است. این فازها به دلیل خاصیت پیونددهی قوی خود، منجر به بهبود قابل توجهی در مقاومت فشاری نمونه‌ها شده‌اند. همچنین، مشاهده می‌شود که ذرات سرباره به خوبی با خاک ترکیب شده و در سطح تماس آن‌ها، پیوندهای قوی ایجاد شده است. تصاویر SEM مربوط به نمونه‌های سرباره فولاد نشان می‌دهند که ذرات سرباره فولاد به دلیل ساختار خاص خود، توانسته‌اند با ذرات خاک پیوندهای قوی ایجاد کنند. همچنین، تشکیل فازهای هیدراته در این نمونه‌ها کمتر از نمونه‌های تثبیت شده با سیمان پرتلند است، اما به دلیل پیوند قوی بین ذرات، مقاومت فشاری همچنان بالا است. وجود ذرات فلزی در ساختار سرباره فولاد نیز در تصاویر مشخص است که می‌تواند تأثیری در خواص مکانیکی نهایی داشته باشد. مقایسه تصاویر SEM از نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد که نوع تثبیت کننده تأثیر مستقیم بر ریزساختار خاک دارد. نمونه‌های تثبیت شده با سیمان پرتلند فازهای هیدراته بیشتری دارند و تخلخل بیشتری نشان می‌دهند، در حالی که نمونه‌های تثبیت شده با سرباره ذوب آهن و سرباره قوس الکتریکی دارای فازهای غیر بلوری و تخلخل کمتری هستند که موجب بهبود پیوند بین ذرات و افزایش مقاومت فشاری شده‌اند. میزان تخلخل در نمونه‌های تثبیت شده با GGBFS و سرباره کمتر از نمونه‌های خاک رس بهبود یافته با سیمان است که به تفاوت در ماهیت مواد و محصولات هیدراتاسیونی تولید شده برمی‌گردد. در نمونه‌های خاک تثبیت شده با سرباره، به دلیل واکنش‌های هیدراتاسیونی، منافذ بزرگ‌تر پر شده و به منافذ کوچک‌تر تبدیل شده‌اند. این امر را می‌توان با بررسی تعداد و اندازه خلل و فرج در سطح نمونه‌ها مشاهده کرد. تصاویر SEM نشان می‌دهند که تخلخل در نمونه‌های تثبیت شده با ژئوپلیمر یکنواخت‌تر و کوچک‌تر است، در حالی که در نمونه‌های سیمان پرتلند، حفرات بزرگ و غیر یکنواختی وجود دارد که موجب تمرکز شکست در این نواحی می‌شود. همچنین، اندازه حفره‌ها در نمونه‌های تثبیت شده با ژئوپلیمر تقریباً یکنواخت و کوچک است، در حالی که در نمونه‌های سیمان پرتلند ابعاد این حفره‌ها یکسان نبوده و حفره‌های بزرگی قابل مشاهده است. تصاویر همچنین نشان دهنده سطحی پیوسته هستند که ذرات روی آن توزیع شده‌اند و جدایی در سطح احساس نمی‌شود، در حالی که در تصویر سطح پیوستگی کمتری مشاهده می‌شود. یکی از دلایل ایجاد این سطح یکنواخت در نمونه‌های تثبیت شده ممکن است حضور آهن باشد.



شکل ۸: تصاویر SEM نمونه‌ها در مقیاس ۲۰ و ۱۰ میکرومتر، الف) خاک تثبیت شده با سیمان ب) خاک تثبیت شده با سرباره ذوب آهن ج) خاک تثبیت شده با سرباره فولاد

Fig. 8. SEM images of samples at 20 and 10 μm scales, a) cement-stabilized soil b) GGBFS-stabilized soil c) steel slag-stabilized soil

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی تثبیت آلودگی خاک به فلزات سنگین سرب و روی با استفاده از دو نوع چسب سیمان ژئوپلیمری و سیمان پرتلند معمولی پرداخته است. هدف اصلی تحقیق، ارزیابی پتانسیل سیمان ژئوپلیمری به عنوان جایگزینی پایدار برای سیمان پرتلند در فرایند تثبیت آلاینده‌ها بود. نتایج به دست آمده از آزمایش ICP نشان دهنده سطح بالایی از آلودگی در نمونه‌های خاک مورد بررسی است. این مقادیر به طور قابل توجهی بالاتر از حد استانداردهای محیط‌زیستی هستند. در این تحقیق، با توجه به غلظت بالای سرب، تثبیت کننده‌های مورد استفاده با چالش مواجه شدند تا توانایی خود را در تثبیت آلاینده‌ها در غلظت‌های بالا نشان دهند.

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن سیمان باعث افزایش جزئی در درصد رطوبت بهینه شده اما وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش پیدا می‌کند. این تغییرات نشان می‌دهد که سیمان به دلیل ماهیت خود، نیاز به آب بیشتری برای رسیدن به تراکم بهینه دارد، اما در عین حال، ساختار خاک را کمتر متراکم می‌کند. در مورد سرباره ذوب آهن، افزایش وزن مخصوص و درصد رطوبت بهینه نشان

می‌دهد که این ماده به تراکم بیشتر خاک کمک کرده و نیاز به آب بیشتری برای دستیابی به تراکم بهینه دارد. به‌طور کلی، این نتایج نشان می‌دهد که هر ماده به‌واسطه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خود تأثیرات متفاوتی بر تراکم‌پذیری و درصد رطوبت بهینه خاک دارد.

باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش تک‌محوری، مشخص شد که سیمان پرتلند در مقایسه با سیمان ژئوپلیمری مقاومت کمتری در تثبیت خاک‌های آلوده به یون سرب از خود نشان می‌دهد. این نتایج به‌ویژه به دلیل غلظت بالای یون سرب در خاک‌های مورد مطالعه است که می‌تواند فرایند سیمانی‌شدن خاک را مختل کند. این یافته‌ها به تأیید نتایج تحقیقات گذشته پرداخته و نشان می‌دهد که یون سرب می‌تواند به طور قابل توجهی در فرایند سیمانی‌شدن اختلال ایجاد کند که در نهایت منجر به کاهش مقاومت و کارایی سیمان پرتلند در تثبیت این نوع خاک‌ها می‌شود. از سوی دیگر، سیمان ژئوپلیمری با ساختار شیمیایی متفاوت و ویژگی‌های مکانیکی برتر، به نظر می‌رسد که به طور مؤثری در مقابله با چالش‌های مرتبط با یون سرب و تثبیت خاک‌های آلوده به فلزات سنگین عملکرد بهتری داشته باشد. این ویژگی‌های مثبت سیمان ژئوپلیمری می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین مناسب برای سیمان پرتلند در فرایند تثبیت و جامدسازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین مورد استفاده قرار گیرد.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سیمان ژئوپلیمری در مقایسه با سیمان پرتلند، مقاومت اولیه بالاتری از خود نشان می‌دهد و می‌تواند گزینه مناسبی برای مواقعی باشد که نیاز به تثبیت سریع آلودگی خاک وجود دارد. شرایط عمل‌آوری نشان داد که سیمان ژئوپلیمری به‌ویژه در محیط‌های مرطوب ممکن است عملکرد بهینه‌ای نداشته باشد و نتایج نشت آلاینده‌ها از آن به حد استاندارد نرسید. در این شرایط، سیمان معمولی با توجه به مقاومت بالاتر و عملکرد بهتری که در محیط‌های مرطوب از خود نشان می‌دهد، می‌تواند گزینه بهتری برای تثبیت آلودگی باشد. بنابراین، انتخاب بین سیمان ژئوپلیمری و سیمان پرتلند باید بر اساس شرایط خاص محیطی و نیاز به سرعت تثبیت انجام شود. درحالی‌که سیمان ژئوپلیمری برای تثبیت سریع مناسب است، سیمان پرتلند به دلیل عملکرد بهتر در محیط‌های مرطوب ممکن است انتخاب بهتری در چنین شرایطی باشد.

نتایج نشان داد که سیمان ژئوپلیمری تولید شده با سرباره فولاد توانست به طور قابل توجهی یون‌های فلزات سنگین مانند سرب و روی را در ساختار جامد تثبیت کند. آزمایش‌ها نشان دادند که این چسب پتانسیل بالایی در کاهش انتشار آلاینده‌ها دارد. همچنین باید توجه داشت که نشت آلاینده‌ها از نمونه‌های حاوی سیمان ژئوپلیمری با سرباره ذوب‌آهن از حد استاندارد بیشتر بود. این مسئله نشان‌دهنده اهمیت انتخاب دقیق مواد پایه برای تولید سیمان ژئوپلیمری است. استفاده از سرباره ذوب‌آهن به‌عنوان ماده پایه ممکن است تأثیر منفی بر عملکرد و نشت آلاینده‌ها داشته باشد؛ لذا، انتخاب مواد پایه مناسب برای تولید سیمان ژئوپلیمری، به‌ویژه در زمینه استفاده از سرباره‌ها و سایر مواد افزودنی، برای دستیابی به عملکرد و مقاومت مطلوب و کاهش نشت آلاینده‌ها ضروری است.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه خوارزمی به جهت پشتیبانی در انجام این تحقیق صمیمانه تشکر می‌نمایم.

مراجع

- [1] A.R. Goodarzi, and M.H. Zandi, Assessing geo-mechanical and leaching behavior of cement-silica-fume-stabilized heavy metal-contaminated clayey soil, *Environmental Earth Sciences*, 75 (2016).
- [2] H. M. Cota, and D. Wallenstein, *Hazardous waste management*. Second Edition (2004).
- [3] V.R. Ouhadi, R.N. Yong, and M. Deiranlou, Enhancement of Cement-Based Solidification/Stabilization of cement-based solidification/stabilization of a lead-contaminated smectite clay. *Journal of Hazardous Materials*, 403 (2021).
- [4] Y.J. Du, , M.L. Wei, K.R. Reddy, and H.L. Wu, Effect of carbonation on leachability, strength and microstructural characteristics of KMP binder stabilized Zn and Pb contaminated soils. *Chemosphere*, 144 (2016): 1033–1042.
- [5] M. Niu, G. Li, Y. Wang, Q. Li, L. Han, and Z. Song, Comparative study of immobilization and mechanical properties of sulfoaluminate cement and ordinary Portland cement with different

heavy metals. *Construction and Building Materials*, 193 (2018): 332–343.

- [6] G. Dermont, M. Bergeron, G. Mercier, and M. Richer-Lafleche, Metal-Contaminated soils: Remediation practices and treatment technologies. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 12(3) (2008): 188–209.
- [7] D. Dermatas, et al. Stabilization or solidification of lead-contaminated soil using RHA. *Journal of Hazardous Materials*, 271(4) (2018): 238–243.
- [8] N. Phanija, and R.V.P. Chavali, Solidification/stabilization of copper-contaminated soil using phosphogypsum. *Innovative Infrastructure Solutions*. 6, 145 (2021).
- [9] V. Illera, F. Garrido, S. Serrano, and M.T. García-González, Immobilization of the heavy metals Cd, Cu and Pb in an acid soil amended with gypsum- and lime-rich industrial by-products. *European Journal of Soil Science*, 55(1) (2004): 135–145.
- [10] N.B. Singh, and B. Middendorf, Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*, 237 (2020): 117455.
- [11] Y.H.M., Amran, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, and M. El-Zeadani, Clean production and properties of geopolymer concrete; A review. *Journal of Cleaner Production*, 251 (2020).
- [12] Y. Pan, J. Rossabi, C. Pan, and X. Xie, Stabilization/solidification characteristics of organic clay contaminated by lead when using cement. *Journal of Hazardous Materials*, 362 (2019): 132–139.
- [13] Y.C. Huang, J., Chen, A.R. Tian, H.L. Wu, Y.Q. Zhang, and Q. Tang, Mechanical properties of fiber and cement reinforced heavy metal-contaminated soils as roadbed filling. *Journal of Central South University*, 27(7) (2020): 2003–2016.
- [14] A.C.F. Chiu, R. Akese, , I.M. Moumouni, and Y. Xiao, Laboratory assessment of rice husk ash (RHA) in the solidification/stabilization of heavy metal contaminated slurry. *Journal of Hazardous Materials*, 371 (2019) 62–71.
- [15] J. Liu, F. Zha, L. Xu, B. Kang, X. Tan, Y. Deng, and C. Yang, Mechanism of stabilized/solidified heavy metal contaminated soils with cement-fly ash based on electrical resistivity measurements. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 141 (2019): 85–94.
- [16] J. Li, shan, L. Chen, B. Zhan, L. Wang, C.S. Poon, and D.C.W. Tsang, Sustainable stabilization/solidification of arsenic-containing soil by blast slag and cement blends. *Chemosphere*, 271 (2021): 129868.
- [17] M.B. Karakoç, I. Türkmen, M.M., Maraş, F. Kantarci, R. Demirboğa, and M.U. Toprak, Mechanical properties and setting time of ferrochrome slag based geopolymer paste and mortar. *Construction and Building Materials*, 72 (2014) 283–292.
- [18] T. Suwan, Categories and types of raw materials using in geopolymer cement production: An overview. *Solid State Phenomena*, 280 (2018): 481–486.
- [19] E. Kishar, D. Ahmed, and N. Nabil, Geopolymer Cement Based on Alkali Activated Slag. *Journal of Scientific Research in Science*, 34 (2018): 538–552.
- [20] V. Nikolić, M. Komljenović, N. Džunuzović, and Z. Miladinović, The influence of Pb addition on the properties of fly ash-based geopolymers. *Journal of Hazardous Materials*, 350 (2018): 98–107.