

Experimental Investigating the Effect of Ground Granulated Blast Furnace Slag and Cracking Catalyst Residue on the Strength and Consolidation Parameters of Soft Clay Soil

Hassan Sharafi^{1*}, Ali Kolahi², Reza Fathi²

1- Associate Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran
2- Ph.D. Student of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

ABSTRACT

The use of industrial wastes and by-products in soil stabilization to reduce costs and environmental pollution has gained significant attention in recent years. Ground granulated blast furnace slag and cracking catalyst residue are industrial waste materials that can be a valuable alternative to conventional traditional materials due to their suitable chemical, mineralogical, and physical properties. In this study, to investigate the effect of ground granulated blast furnace slag and cracking catalyst residue on the strength and consolidation parameters of soft clay soil, 1%, 2%, 3%, 4%, and 5% ground granulated blast furnace slag by total dry weight of soil along with 5%, 10%, 15%, and 20% cracking catalyst residue by total dry weight of soil have been used. This resulted in 20 different mixing designs, which were evaluated in three curing periods of 7, 28, and 90 days by performing direct shear, California bearing ratio, and one-dimensional consolidation tests. The results showed that the effect of Ground granulated blast furnace slag and cracking catalyst residue increases cohesion, internal friction angle, and bearing ratio and decreases compaction index, and swelling of the stabilized soil. Also, the optimal mixing design comprised 20% cracking catalyst residue and 3% Ground granulated blast furnace slag, which exhibited the greatest improvement in soil strength and consolidation parameters. Additionally, by performing microstructural and chemical analyses on samples, it was determined that the presence of additives reduces porosity and increases pozzolanic reactions.

ARTICLE INFO

Receive Date: 23 November 2024
Revise Date: 17 January 2025
Accept Date: 06 April 2025

Keywords:

Soil Stabilization
Soft Clay Soil
Ground Granulated Blast
Furnace Slag
Cracking Catalyst Residue
California Bearing Ratio

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.474562.3501

*Corresponding author: Hassan Sharafi.
Email address: h_sharafi@razi.ac.ir.

بررسی آزمایشگاهی تاثیر سرباره کوره آهن گدازی و کاتالیست پسماند کراکینگ بر پارامترهای مقاومتی و تحکیمی خاک رس نرم

حسن شرفی^{۱*}، علی کلاهی^۲، رضا فتحی^۲

۱- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

۲- دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

چکیده

استفاده از پسماندها و محصولات فرعی صنایع در تثبیت خاک با هدف کاهش هزینه‌ها و آلودگی‌های زیست محیطی در سالیان اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. سرباره کوره آهن گدازی و کاتالیست پسماند کراکینگ از جمله پسماندهای صنعتی می‌باشند که به دلیل خواص شیمیایی، کانی شناختی و فیزیکی مناسب می‌توانند جایگزین ارزشمندی برای مصالح سنتی متعارف باشند. در پژوهش حاضر به منظور بررسی اثر سرباره کوره آهن گدازی و کاتالیست پسماند کراکینگ بر پارامترهای مقاومتی و تحکیمی خاک رس نرم، از سرباره کوره آهن گدازی در مقادیر ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد وزن خشک خاک در کنار کاتالیست پسماند کراکینگ در مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزن خشک خاک استفاده شده است. ترکیب حالات مختلف، منجر به تهیه ۲۰ طرح اختلاط گردید که در سه دوره عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روز با انجام آزمایش‌های برش مستقیم، نسبت باربری کالیفرنیا و تحکیم یک بعدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اثر توام سرباره کوره آهن گدازی و کاتالیست پسماند کراکینگ موجب افزایش چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و نسبت باربری و کاهش شاخص فشردگی و تورم خاک مورد تثبیت می‌گردد. همچنین بهینه‌ترین طرح اختلاط شامل ۲۰ درصد کاتالیست پسماند کراکینگ و ۳ درصد سرباره کوره آهن گدازی می‌باشد که بیشترین تاثیر را بر بهبود پارامترهای مقاومتی و تحکیمی خاک داشت. همین‌طور با انجام آنالیزهای ریزساختار و شیمیایی مشخص گردید که حضور افزودنی‌ها موجب کاهش تخلخل و افزایش واکنش‌های پوزولانی می‌گردد.

کلمات کلیدی: تثبیت خاک، خاک رس نرم، سرباره کوره آهن گدازی، کاتالیست پسماند کراکینگ، نسبت باربری کالیفرنیا.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.474562.3501	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.474562.3501	۱۴۰۴/۱۰/۳۰	۱۴۰۴/۰۱/۱۷	۱۴۰۴/۰۱/۱۷	۱۴۰۳/۱۰/۲۸	۱۴۰۳/۰۹/۰۲
حسن شرفی			*نویسنده مسئول:			
h_sharafi@razi.ac.ir			پست الکترونیکی:			

۱- مقدمه

امروزه با گسترش زندگی شهری و نیاز به احداث سازه‌های بلند مرتبه، بزرگراه‌ها، مراکز تجاری، صنعتی و ... استفاده حداکثری و بهینه از تمامی ظرفیت‌های موجود، اهمیت بیشتری پیدا کرده است. اغلب به دلیل وجود خاک‌های مساله‌دار و یا خاک‌هایی با ظرفیت باربری پایین، امکان بهره‌برداری از بسترهای طبیعی وجود ندارد و یا هزینه‌های مالی بالایی را به پروژه‌های مورد احداث تحمیل می‌نماید.

در حال حاضر راهکارهای متداولی به منظور بهسازی خاک، مانند تثبیت شیمیایی وجود دارد. استفاده از مصالح متعارف مانند سیمان و آهک در تثبیت شیمیایی با وجود تأثیر مثبت، به دلیل هزینه‌های مالی بالا و همچنین مصرف منابع طبیعی، مورد انتقادات بسیاری قرار دارد. همچنین گاه‌ها استفاده از این مصالح موجب بروز رفتار ترد و شکننده در خاک مورد تثبیت می‌گردد [۱]. قابل ذکر است فرآیند تولید این مصالح سهم زیادی در آلودگی محیط زیست دارند به گونه‌ای که از نظر آماری حدود ۷٪ از انتشار CO₂ در جهان ناشی از صنعت تولید سیمان می‌باشد [۲]. به همین جهت بررسی‌های زیادی برای جایگزین نمودن مصالح اقتصادی‌تر، با اثرات مخرب زیست‌محیطی کمتر جهت بهسازی خاک‌ها صورت پذیرفته است که از نمونه آن‌ها می‌توان به استفاده از پسماندها و محصولات فرعی اشاره نمود [۳-۹]. تنگ^۱ و همکاران (۲۰۲۴) مشخص نمودند که استفاده از پسماند کاربید کلسیم^۲ می‌تواند موجب بهبود مقاومت تک محوری، تورم، رفتار برش سه محوری، و کاهش تراکم‌پذیری خاک گردد [۱۰]. همچنین یوسفی و همکاران (۲۰۲۳) به جهت راه‌حلی در کاهش مصرف سیمان از مواد پسماند مانند خاک اره در بهسازی خاک ماسه‌ای استفاده نمودند و با انجام آزمایش تک محوری به این نتیجه رسیدند که حضور خاک اره موجب بهبود مقاومت فشاری تک محوری خاک مورد تثبیت می‌گردد [۱۱].

سرباره کوره آهن‌گدازی از پسماندهای صنعتی می‌باشد که از ناخالصی‌های موجود در سنگ آهن تهیه شده و در طی فرآیند جداسازی آهن از سنگ آهن تولید می‌شود. این محصول ترکیبی از سیلیکات‌ها و اکسیدهای فلزی پیچیده است که پس از سرد شدن ناخالصی‌ها باقی می‌ماند. استفاده از این پسماند جهت تثبیت خاک توسط چندین محقق مورد بررسی قرار گرفته است.

شکیل و همکاران (۲۰۲۵) با انجام آزمایش‌های حدود اثر برگ، تراکم، پتانسیل تورم و برش مستقیم به ارزیابی اثر حضور دو پسماند سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر نیشکر بر رفتار مکانیکی خاک متورم شونده پرداختند. نتایج نشان داد که با حضور مقادیر بهینه این دو افزودنی (سرباره به میزان ۳ درصد و خاکستر نیشکر تا میزان ۱۲ درصد) رطوبت بهینه خاک افزایش یافته، در حالی که حداکثر وزن مخصوص خشک خاک کاهش یافت. همچنین چسبندگی در شرایط غرقاب شده ۲۷ درصد و در شرایط غرقاب نشده ۳۱ درصد کاهش یافت، در حالی که زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب ۱۰۶ درصد و ۱۱۱ درصد افزایش یافت. همینطور مقاومت برشی افزایش یافته و پتانسیل تورم و شاخص خمیری کاهش یافت [۱۲]. پرهیزکار و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی اثرات سرباره کوره آهن‌گدازی، آهک و خاکستر بادی بر بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک گچی پرداختند. نمونه‌های خاک گچی با آهک و سرباره به نسبت‌های ۰ تا ۱۶ درصد مخلوط شدند. این نمونه‌ها در مدت زمان ۱ تا ۹۰ روز عمل‌آوری گردیدند و سپس تحت آزمایش مقاومت فشاری تک محوری، آنالیزهای ریزساختاری و طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس قرار گرفتند. نتایج نشان داد که حضور این افزودنی‌ها سبب بروز واکنش‌های پوزولانی گردیده است که در نهایت موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده می‌گردد با این حال، مقدار این افزایش به طور قابل توجهی به میزان افزایش محتوای آهک در مخلوط‌ها بستگی داشت به عبارتی می‌توان گفت که آهک نقش یک محرک و تسریع‌کننده را دارد [۱۳]. بیگی و خزایی (۲۰۲۴) اثرات سرباره کوره آهن‌گدازی، آهک و سیلیکات سدیم بر خاک رس نرم را مورد بررسی قرار دادند. چهل و پنج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری با استفاده از درصدهای مختلف از سرباره، سیلیکات سدیم (عامل تسهیل‌کننده) و ۶ درصد آهک انجام گردید. نمونه‌ها به مدت ۷، ۲۸ و ۹۰ روز تحت عمل‌آوری قرار گرفتند. همچنین، سه آزمایش تحکیم بر روی نمونه‌های تثبیت شده با درصد بهینه آهک و سرباره کوره آهن‌گدازی و ۱، ۱/۵ و ۲/۵ درصد سیلیکات سدیم انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از مخلوط سرباره، آهک و سیلیکات سدیم باعث بهبود مقاومت فشاری تک محوری خاک شده و این اثر با گذشت زمان افزایش یافت. علاوه بر این، میزان نشست

¹ Tang

² Calcium Carbide Residue

نمونه‌های تثبیت شده افزایش داشته و به طور همزمان، نسبت تخلخل کاهش یافت. همچنین، نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس بر روی نمونه‌ها نشان داد که افزایش مقاومت نمونه‌های تثبیت شده ناشی از واکنش‌های هیدراتاسیون و کاهش تخلخل موجود در نمونه‌ها می‌باشد [۱۴]. ژنگ^۳ و همکاران (۲۰۲۳) اثر آهک و سرباره کوره آهن‌گدازی بر خاک حاوی اسید فسفریک و خاک عاری از اسید فسفریک را بررسی کردند. به همین منظور آزمایش‌های خستگی، تراکم و مقاومت فشاری تک محوری روی نمونه‌ها انجام گرفت و نتایج نشان داد که ترکیب آهک و سرباره تأثیر مناسبی بر خاک حاوی اسید فسفریک دارد به نحوی که مقاومت و مدول الاستیک دینامیکی آن افزایش یافت [۱۵]. ابالیلا^۴ و همکاران (۲۰۲۲) اثر آهک و سرباره کوره آهن‌گدازی را بر خاک بدون سولفات و حاوی سولفات مطالعه کردند. در این مطالعه، یک بررسی چند مقیاسی شامل مقاومت فشاری تک محوری و انبساط خطی جهت ارزیابی عملکرد آن‌ها انجام گرفت. نتایج نشان داد که حضور آهک و سرباره بر بهبود مقاومت فشاری خاک بدون سولفات و حاوی سولفات مؤثر است [۱۶]. داری^۵ و همکاران (۲۰۲۱) با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری در دوره‌های زمانی ۱ تا ۲۸ روز و نسبت باربری کالیفرنیا نشان دادند که افزودن آهک و سرباره کوره آهن‌گدازی به خاک رس منجر به افزایش قابل توجه مقاومت فشاری تا ۲۸ روز می‌شود. همچنین دریافتند که نسبت باربری اشباع خاک نیز پس از تثبیت به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد همینطور تجزیه و تحلیل‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و پراش اشعه ایکس بر خاک رس تثبیت شده نشان داد که حضور افزودنی‌ها موجب بروز واکنش‌های پوزولانی و در نتیجه افزایش مقاومت می‌گردد [۱۷]. بهرا^۶ و سنپاتی^۷ (۲۰۲۱) در پژوهش خود نشان دادند که افزودن سرباره کوره آهن‌گدازی و گرد سنگ به خاک مبنسط شونده می‌تواند نسبت باربری خشک و مقاومت فشاری خاک مبنسط شونده را بهبود بخشد [۱۸]. زمانیان و همکاران (۲۰۲۲) به مقایسه رفتار خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سرباره کوره آهن‌گدازی که با محلول هیدروکسید سدیم در نقش محرک و تسریع کننده ترکیب گردیده و خاک ماسه‌ای که با سیمان تثبیت گردیده است پرداختند و آزمایش‌های تک محوری و کشش برزیلی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج نشان داد که در نسبت‌های یکسان، سرباره کوره آهن‌گدازی مقاومت فشاری و کششی بسیار بیشتری نسبت به سیمان ایجاد می‌کند [۱۹]. ساجدی و احمدی (۲۰۲۱) با ترکیب مخلوط‌های خاک (از نوع مصالح رودخانه‌ای) و سرباره کوره آهن‌گدازی در مقادیر متفاوت و مقایسه آن با مخلوط خاک و آهک توسط آزمایش‌های تراکم و نسبت باربری کالیفرنیا دریافتند که مخلوط ۷۰ درصد سرباره با ۳۰ درصد خاک، بهترین‌ترین مخلوط می‌باشد و نسبت باربری این نمونه در حالت اشباع و خشک نسبت به مخلوط خاک و آهک به ترتیب ۶۲ درصد و ۳۰ درصد افزایش یافته است [۲۰].

اکثر مطالعات فوق، همواره با هدف ایجاد یک شرایط مناسب جهت بروز و بهبود واکنش‌های پوزولانی و افزایش راندمان تثبیت از یک عامل محرک و تسریع‌گر استفاده نمودند. کاتالیست پسماند کراکینگ، در اغلب پالایشگاه‌های موجود در سراسر جهان تولید می‌شود و دارای خواص شیمیایی، کانی شناختی و فیزیکی همگن است. این ویژگی‌های مناسب، استفاده مجدد از آن را در صنایع مختلف به ویژه در تثبیت خاک فراهم می‌کند. کاتالیست پسماند کراکینگ واکنش‌پذیری بسیار خوبی را از نظر رفتار پوزولانی نشان می‌دهد زیرا حاوی مقادیر زیادی از سیلیس و آلومینای فعال است. کاربرد این پسماند در پژوهش‌های مختلفی بررسی گردیده است و در تمامی موارد، عملکرد آن مناسب توصیف شده است، بنابراین می‌توان آن را به عنوان یک افزودنی جدید در تثبیت خاک در نظر گرفت [۲۱].

الخفاجی^۸ و همکاران (۲۰۱۸) با افزودن سیمان پرتلند معمولی و کاتالیست پسماند کراکینگ به خاک رس نرم دریافتند که استفاده از کاتالیست پسماند کراکینگ می‌تواند مقاومت خاک رس را افزایش دهد به نحوی که نمونه تثبیت شده پس از ۲۸ روز، در مقایسه با نمونه تثبیت شده با سیمان مقاومت بالاتری داشت. همچنین نتایج آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که حضور ۳۰ درصد کاتالیست پسماند کراکینگ سبب بروز واکنش‌های شیمیایی مشابه با نمونه‌های تثبیت شده با سیمان می‌گردد [۲۲]. کوری^۹ و شاه^{۱۰}

³ Zheng

⁴ Ebailila

⁵ Darsi

⁶ Behera

⁷ Senapati

⁸ Al-khafaji

⁹ Kori

(۲۰۲۲) با هدف بهبود خصوصیات مهندسی نوعی خاک ماسه‌ای و تبدیل آن به مواد پرکننده پایدار، از سیمان پرتلند معمولی و پسماندهای صنعتی از جمله کاتالیست پسماند کراکینگ در مقادیر مختلف استفاده نمودند. نتایج نشان داد که حضور ۱۴ درصد کاتالیست پسماند کراکینگ بیشترین مقاومت را به نمونه‌های تثبیت شده می‌دهد [۲۳].

با توجه به نیاز روزافزون به محصولات فولادی و پتروشیمی، افزایش هرلحظه تولید این محصولات منجر به افزایش تولید پسماندهایی مانند سرباره کوره آهن‌گدازی و کاتالیست پسماند کراکینگ می‌گردد به همین خاطر استفاده از این پسماندهای صنعتی در زمینه‌های مختلف مانند تثبیت خاک می‌تواند امری مفید در جهت کاهش هزینه‌ها و آلودگی‌های زیست محیطی شود. پژوهش‌های محدودی به بررسی تاثیر سرباره کوره آهن‌گدازی و کاتالیست پسماند کراکینگ بر پارامترهای مقاومتی و به ویژه تحکیمی خاک رس نرم پرداخته‌اند و همینطور تاثیر همزمان این دو افزودنی بر رفتار خاک تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. در این پژوهش اثر مقادیر مختلف از سرباره کوره آهن‌گدازی و کاتالیست پسماند کراکینگ بر پارامترهای مقاومتی، تحکیمی و ریزساختار خاک رس نرم با هدف معرفی طرح اختلاطی بهینه بررسی شده است. همچنین تاثیر دوره‌های عمل‌آوری بر نمونه‌های تثبیت شده بررسی گردیده است.

۲- مواد و روش کار

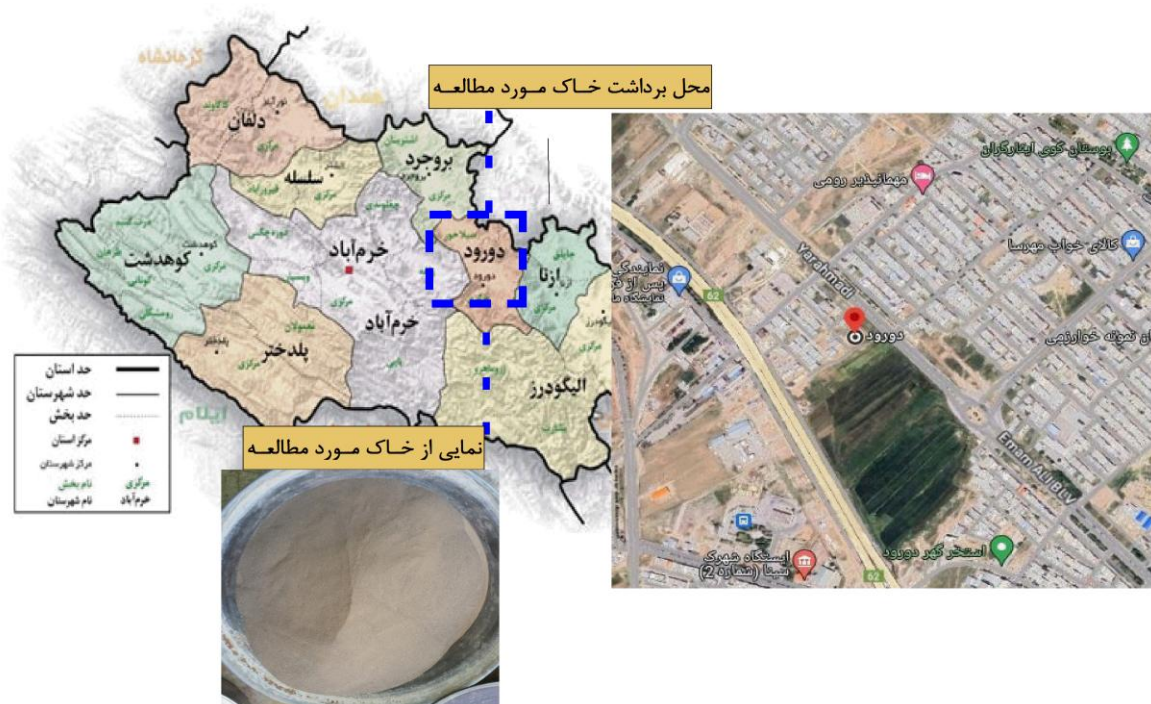
در این پژوهش از خاک به عنوان ماده مورد تثبیت و سرباره کوره آهن‌گدازی و کاتالیست پسماند کراکینگ به عنوان ماده تثبیت کننده استفاده شده است. در ادامه ویژگی‌های خاک و تثبیت کننده‌های مورد استفاده بیان می‌گردد.

۲-۱- خاک

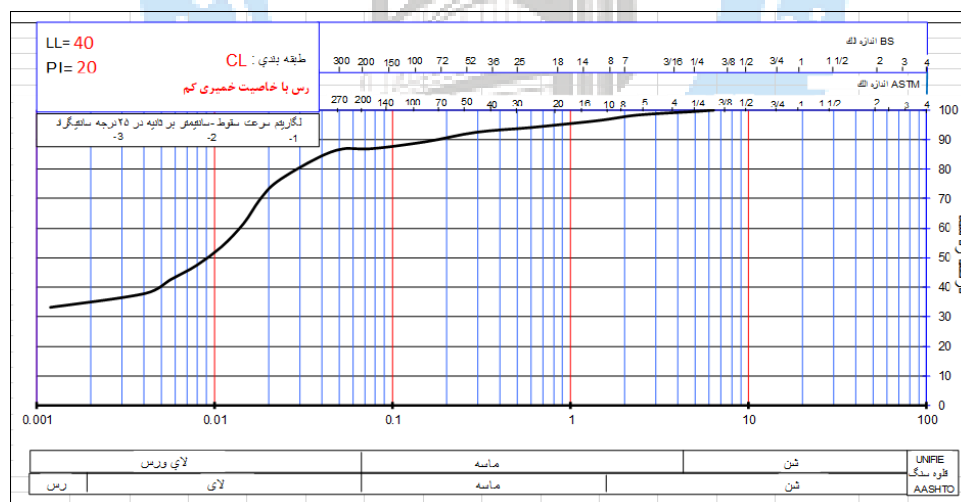
خاک مورد استفاده در این پژوهش از استان لرستان، شهرستان دورود، بلوار شهید حاج مرتضی یاراحمدی شیرازی از لایه‌های زیرسطحی با عمق تقریبی ۴/۵ متر نمونه‌برداری شده است. محل برداشت خاک مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است. به منظور تعیین مشخصات فنی خاک مورد مطالعه، آزمایش‌های دانه‌بندی و هیدرومتري (ASTM D422)، حدود اتربرگ (ASTM D4318)، چگالی ویژه ذرات (ASTM D854) و تراکم (ASTM D698) انجام گرفت [۲۴-۲۷]. مشخصات فنی خاک مورد مطالعه در جدول ۱ ذکر گردیده است. همچنین در تصویر شماره ۲، نمودار دانه‌بندی خاک مورد مطالعه نمایش داده شده است.

جدول ۱: مشخصات فنی خاک مورد مطالعه

CL	USCS	طبقه بندی خاک
۴۰	LL (%)	حد روانی
۲۰	PL (%)	حد خمیری
۲۰	PI (%)	شاخص خمیری
۲/۶۵	Gs	چگالی ویژه ذرات جامد
۲/۰۸	γ_d (gr/cm ³)	حداکثر دانسیته خشک خاک
۱۳/۲	%	رطوبت بهینه



شکل ۱: محل برداشت خاک مورد مطالعه



شکل ۲: نمودار دانه بندی خاک مورد مطالعه

۲-۲- سرباره کوره آهن گدازی^{۱۱}

در این پژوهش سرباره کوره آهن گدازی از شرکت فولاد خوزستان تهیه گردید. این سرباره به صورت کلوخه نمونه برداری شده و پس از آسیاب نمودن، از الک شماره ۲۰۰ عبور داده شد. مطابق شکل ۳ سرباره به صورت پودر می باشد. نتایج آنالیز شیمیایی سرباره کوره آهن گدازی در جدول ۲ ارائه گردیده است.

جدول ۲: آنالیز شیمیایی سرباره کوره آهن گدازی

ترکیب	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	CaO	Fe ₂ O ₃	P
درصد وزنی	۰/۳	۴/۵۶	۲/۴۸	۲۲/۱۷	۰/۳۵	۳۷/۷۲	۲۸/۵۶	۰/۲۵



شکل ۳: نمایی از سرباره کوره آهن گدازی مورد استفاده

۲-۳- کاتالیست پسماند کراکینگ^{۱۲}

در این پژوهش از کاتالیست پسماند حاصل از کراکینگ سیال نفتی شرکت پالایش نفت آبادان استفاده شده است. این ماده از الک شماره ۲۰۰ عبور داده شده و سپس مورد استفاده قرار گرفت. ترکیبات شناسایی شده موجود در کاتالیست پسماند کراکینگ در جدول ۳ ارائه گردیده است. همچنین در شکل ۴ تصویری از این افزودنی نشان داده شده است.

جدول ۳: آنالیز شیمیایی کاتالیست پسماند کراکینگ

ترکیب	Na ₂ O	TiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
درصد وزنی	۰	۰	۰/۶۹	۴۴/۱۷	۳۵/۴۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۳۷

¹¹ Ground Granulated Blast Furnace Slag

¹² Cracking Catalyst Residue



شکل ۴: نمایی از کاتالیست پسماند کراکینگ مورد استفاده

۲-۴- مطالعات آزمایشگاهی

به منظور بررسی اثر سرباره کوره آهن‌گدازی و کاتالیست پسماند کراکینگ بر پارامترهای مقاومتی و تحکیمی خاک رس نرم، از سرباره کوره آهن‌گدازی در مقادیر ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد وزن خشک خاک در کنار کاتالیست پسماند کراکینگ در مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزن خشک خاک در سه دوره عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه استفاده شده است. ترکیب حالات مختلف، منجر به تهیه ۲۰ طرح اختلاط گردید. به منظور سهولت در نامگذاری ترکیبات مورد نظر، برای هر یک از مصالح نماد مشخصی در نظر گرفته شد. به همین منظور نمونه شاهد عاری از مواد افزودنی با نماد CS^{13} ، سرباره کوره آهن‌گدازی با نماد GG و کاتالیست پسماند کراکینگ نیز با نماد Ca نامگذاری شدند. مشخصات طرح اختلاط در جدول ۴ ارائه گردیده است. با توجه به اینکه حضور مواد افزودنی می‌تواند بر حداکثر وزن مخصوص خشک خاک و رطوبت بهینه اثرگذار باشد، از این‌رو به منظور انجام کلیه آزمایشات در شرایط تراکم یکسان، برای هر طرح اختلاط آزمایش تراکم (ASTM D698) انجام گردید. نتایج حاصل از آزمایش تراکم در جدول ۴ بیان شده است.

در این پژوهش آزمایش‌های ژئوتکنیکی انجام شده شامل آزمایش برش مستقیم (ASTM D3080)، نسبت باربری کالیفرنیا (ASTM D1883) و تحکیم یک بعدی (ASTM D2435) می‌باشد [۲۸-۳۰]. همچنین به منظور بررسی ریزساختار و آنالیز شیمیایی، عکسبرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس انجام گردید. اختلاط مصالح در این پژوهش به صورت دستی با استفاده از کاردک بر روی یک سینی آهنی یک‌دست و تمیز انجام گرفت [۳۱-۳۲]. به این شکل که در ابتدا با رعایت درصدهای وزنی و رطوبت بهینه هر طرح، خاک با سرباره کوره آهن‌گدازی ترکیب گردیده سپس کاتالیست پسماند کراکینگ به مخلوط اضافه شد و اختلاط ادامه یافت تا جایی که مخلوط به دست آمده کاملاً یکنواخت باشد در ادامه رطوبت به مخلوط اضافه شده و ترکیب گردید. در بخش‌های بعدی نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام هر آزمایش بیان می‌گردد.

جدول ۴: مشخصات طرح‌های اختلاط و نتایج آزمایش تراکم

نمونه	درصد وزنی کاتالیست (%)	درصد وزنی سرباره (%)	درصد وزنی رس (%)	حداکثر دانسیته خشک (gr/cm^3)	رطوبت بهینه (%)
CS	۰	۰	۱۰۰	۲/۰۸	۱۳/۲
GG1+Ca5	۵	۱	۹۴	۲/۱۱	۱۰/۸
GG1+Ca10	۱۰	۱	۸۹	۲/۱۳	۱۰/۳
GG1+Ca15	۱۵	۱	۸۴	۲/۱۲	۱۰/۶
GG1+Ca20	۲۰	۱	۷۹	۲/۰۹	۱۲/۹
GG2+Ca5	۵	۲	۹۳	۲/۱۲	۱۰/۳

¹³ Control Sample

GG2+Ca10	۱۰	۲	۸۸	۲/۱۵	۹/۸
GG2+Ca15	۱۵	۲	۸۳	۲/۱۴	۱۰/۵
GG2+Ca20	۲۰	۲	۷۸	۲/۱۱	۱۱
GG3+Ca5	۵	۳	۹۲	۲/۱۰	۱۱/۳
GG3+Ca10	۱۰	۳	۸۷	۲/۱۳	۹/۸
GG3+Ca15	۱۵	۳	۸۲	۲/۱۶	۹/۴
GG3+Ca20	۲۰	۳	۷۷	۲/۱۵	۹/۷
GG4+Ca5	۵	۴	۹۱	۲/۱۳	۱۰/۱
GG4+Ca10	۱۰	۴	۸۶	۲/۱۱	۱۰/۸
GG4+Ca15	۱۵	۴	۸۱	۲/۱۵	۹/۶
GG4+Ca20	۲۰	۴	۷۶	۲/۱۷	۹/۳
GG5+Ca5	۵	۵	۹۰	۲/۱۷	۹
GG5+Ca10	۱۰	۵	۸۵	۲/۱۹	۸/۶
GG5+Ca15	۱۵	۵	۸۰	۲/۱۵	۱۰/۱
GG5+Ca20	۲۰	۵	۷۵	۲/۱۴	۱۰/۲

۲-۴-۱- آزمایش برش مستقیم

در این پژوهش جهت ساخت نمونه‌های برش مستقیم، با در نظر گرفتن حداکثر وزن مخصوص خشک هر طرح، مخلوط‌های موجود از مصالح در سه لایه به ضخامت یکسان در قالب‌هایی به ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر × ۱۰۰ میلی‌متر با ضخامت ۲۰ میلی‌متر متراکم گردیدند (شکل ۵). جهت پیوستگی بیشتر لایه‌های نمونه، پس از تراکم هر لایه، سطح آن توسط تیغ خراش داده شد. در نهایت جهت جلوگیری از تغییرات رطوبت، نمونه‌های ساخته شده داخل کیسه‌های پلاستیکی قرار گرفته و به مدت ۷، ۲۸ و ۹۰ روز در دمای محیط (24°C) نگهداری گردیدند. پس از گذراندن دوره‌های عمل‌آوری نمونه‌های ساخته شده مطابق استاندارد ASTM D3080 در شرایط زهکشی شده و تحت تنش‌های نرمال ۲۰، ۴۰ و ۸۰ کیلوپاسکال تحت آزمایش قرار گرفتند. در شکل ۶ نمایی از دستگاه برش مستقیم مورد استفاده نشان داده شده است.



شکل ۵: نمونه‌های در حال ساخت آزمایش برش مستقیم



شکل ۶: دستگاه آزمایش برش مستقیم

۲-۴-۲- آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا

جهت ساخت نمونه‌های آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا، در ابتدا مخلوط‌های موجود از مصالح با رعایت حداکثر وزن مخصوص خشک هر طرح مطابق با روش تراکم ASTM D698 در قالب CBR¹⁴ (قطر ۱۵/۲ و ارتفاع ۱۷/۷ سانتی‌متر) در سه لایه و هر لایه با ۵۶ ضربه چکش ۲/۵ کیلوگرمی متراکم گردیدند. سپس نمونه‌های ساخته شده به مدت ۷، ۲۸ و ۹۰ روز در داخل کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شده و در دمای محیط (24°C) نگهداری گردیدند. پس از اتمام دوره‌های عمل‌آوری، نمونه‌ها به مدت ۹۶ ساعت در آب مستغرق شده و در نهایت در دستگاه CBR (شکل ۷) مطابق استاندارد ASTM D1883 با نرخ اعمال بار ۱/۲۷ mm/min تحت آزمایش قرار گرفتند.

¹⁴ California Bearing Ratio



شکل ۷: دستگاه آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا

۲-۴-۳- آزمایش تحکیم یک بعدی

نحوه ساخت نمونه‌های تحکیم یک بعدی مطابق روش ساخت نمونه‌های آزمایش برش مستقیم بوده و در رینگ تحکیم با قطر ۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۰ میلی‌متر انجام گرفت و نمونه‌های ساخته شده به مدت ۲۸، ۷ و ۹۰ روز تحت شرایط مشابه نگهداری گردیدند. سپس با گذراندن دوره‌های عمل‌آوری نمونه‌های ساخته شده داخل دستگاه تحکیم (شکل ۸) قرار گرفته و مطابق استاندارد ASTM D2435 تحت آزمایش قرار گرفتند.



شکل ۸: دستگاه آزمایش تحکیم یک بعدی

۳- بحث و نتیجه گیری

۳-۱- نتایج آزمایش برش مستقیم

نتایج آزمایش برش مستقیم در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. همانگونه که از شکل ۹ مشخص است، حضور سرباره کوره آهن‌گدازی و کاتالیست پسماند کراکینگ باعث افزایش مقاومت برشی نمونه‌های تثبیت شده می‌گردد. به طور کلی نتایج نشان می‌دهد که با حضور سرباره کوره آهن‌گدازی به میزان ۳٪ و همچنین حضور کاتالیست پسماند کراکینگ به میزان ۲۰٪ که بیانگر طرح اختلاط GG3+Ca20 می‌باشد، بیشترین اثر بهسازی بر پارامترهای مقاومت برشی حاصل گردیده است. مطابق شکل ۱۰ در این طرح اختلاط، زاویه اصطکاک داخلی از مقدار ۵ درجه مربوط به نمونه شاهد به ۱۲/۶۸ درجه پس از ۷ روز، ۱۵/۵ درجه پس از ۲۸ روز و ۱۶/۵۵ درجه پس از ۹۰ روز رسیده است. همچنین مطابق شکل ۱۱ چسبندگی از مقدار ۱۴ kpa مربوط به نمونه شاهد به ۴۰/۵ kpa پس از ۷ روز، ۴۴/۴ kpa پس از ۲۸ روز و ۵۱/۸ kpa پس از ۹۰ روز رسیده است.

قابل ذکر است که با افزایش مقادیر سرباره از ۳٪ به ۴٪ و ۵٪ پارامترهای مقاومت برشی به نسبت ۳٪ سرباره کاهش یافته‌اند. در نتیجه با توجه به بیشترین اثر بهسازی در طرح اختلاط GG3+Ca20، جهت بهینه‌سازی و حصول اطمینان از حداکثر رشد مقاومتی، طرح اختلاط با ۲۵٪ کاتالیست با حضور ۳٪ سرباره (GG3+Ca25) صورت پذیرفته است که نتایج نشان می‌دهد در طرح اختلاط GG3+Ca25 در مدت زمان ۹۰ روز به نسبت طرح اختلاط GG3+Ca20، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب حدود ۱۵٪ و ۹٪ کاهش یافته است.

این افزایش پارامترهای مقاومت برشی در درصد‌های وزنی یکسان از سرباره کوره آهن‌گدازی با افزایش مقدار کاتالیست پسماند کراکینگ تا مقدار ۲۰٪ به طور عمده مربوط به چسبندگی خاک مورد مطالعه می‌باشد که با توجه به ماهیت واکنش‌های پوزولانی و تشکیل ژل‌های کلسیم سیلیکات هیدرات (CSH¹⁵) و کلسیم آلومینات هیدرات (CAH¹⁶) مطابق رابطه‌های ۱ و ۲ حاصل گردیده است. بر اساس نتایج می‌توان گفت که با توجه به ظرفیت خاک و همچنین حضور سرباره کوره آهن‌گدازی از حیث ترکیبات شیمیایی واکنش پذیر در فرآیند هیدراتاسیون، استفاده کمتر از مقدار ۲۰٪ کاتالیست پسماند کراکینگ، عدم بازدهی بهینه را به همراه دارد.

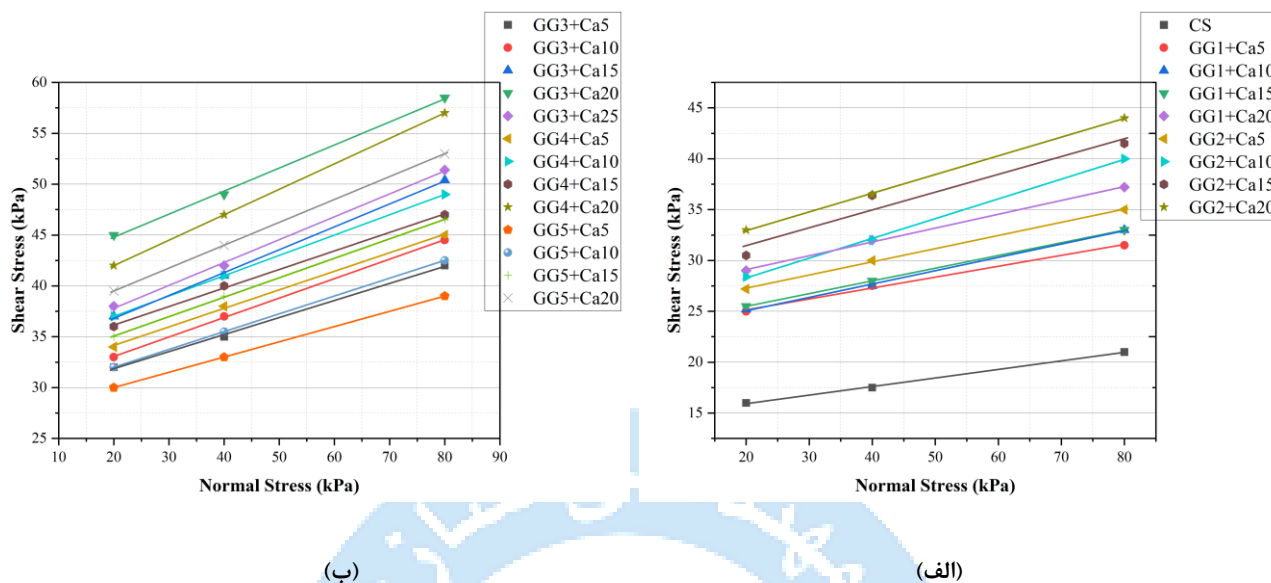


در ادامه با افزایش مقدار کاتالیست پسماند کراکینگ به بیش از مقدار ۲۰٪ پارامترهای مقاومتی خاک کاهش یافتند که این کاهش در اثر تجمع و ایجاد کلوخه‌هایی تحت تاثیر ذرات مازاد افزودنی می‌باشد. کلوخه‌های ایجاد شده موجب افزایش فضای خالی بین ذرات (تخلخل) گردیده است. در نتیجه با افزایش و اعمال بار، این ساختار ایجاد شده، در هم شکسته و منجر به ایجاد روندی معکوس در رفتار نمونه‌های تثبیت شده می‌گردد.

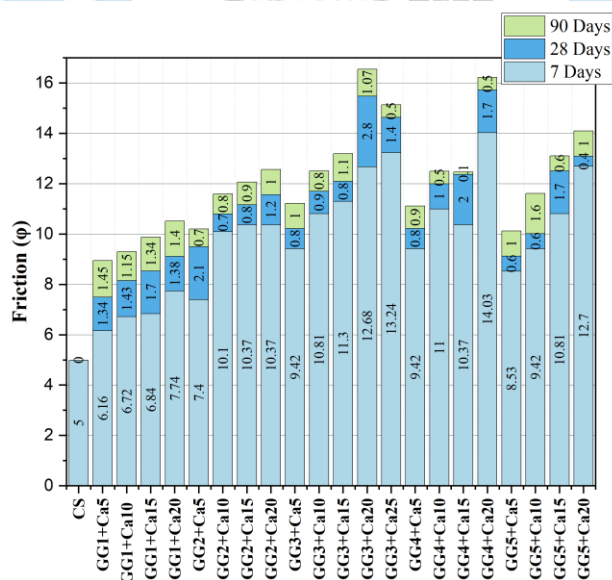
همچنین در درصد‌های وزنی یکسان کاتالیست پسماند کراکینگ، با افزایش درصد وزنی سرباره کوره آهن‌گدازی تا مقدار ۳٪، پارامترهای مقاومت برشی خاک مورد مطالعه افزایش یافته است. مطابق با رابطه ۱ و ۲، کلسیم مورد نیاز واکنش از ترکیبات سرباره کوره آهن‌گدازی به چرخه واکنش ورود پیدا می‌کند. همچنین سرباره کوره آهن‌گدازی حاوی درصد وزنی بالایی از اکسید آهن می‌باشد، که این ترکیب با توجه به ظرفیت شیمیایی خود میل به واکنش پذیری کمتری دارد. از طرف دیگر با افزایش میزان سرباره به بیش از ۳٪، جذب آب نمونه حاوی افزودنی‌ها، کاهش پیدا می‌کند، این کاهش جذب آب موجب اختلال در واکنش‌های پوزولانی می‌گردد، که این اختلال مانع از تشکیل ژل‌های CSH و CAH می‌شود. که نتیجه این امر کاهش پارامترهای مقاومت برشی در نسبت‌های بیش از ۳٪ سرباره کوره آهن‌گدازی می‌باشد.

¹⁵ Calcium Silicate Hydrate

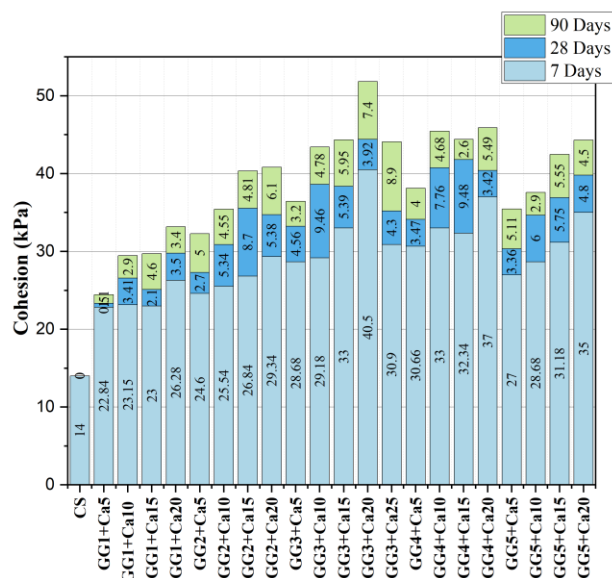
¹⁶ Calcium Aluminate Hydrate



شکل ۹: تنش برشی پس از ۷ روز عمل آوری (الف) نمونه‌های حاوی ۱ و ۲ درصد سرباره و مقادیر مختلف کاتالیست (ب) نمونه‌های حاوی ۳ تا ۵ درصد سرباره و مقادیر مختلف کاتالیست



شکل ۱۰: تغییرات زاویه اصطکاک داخلی با حضور درصد‌های مختلف افزودنی پس از دوره‌های عمل آوری مختلف

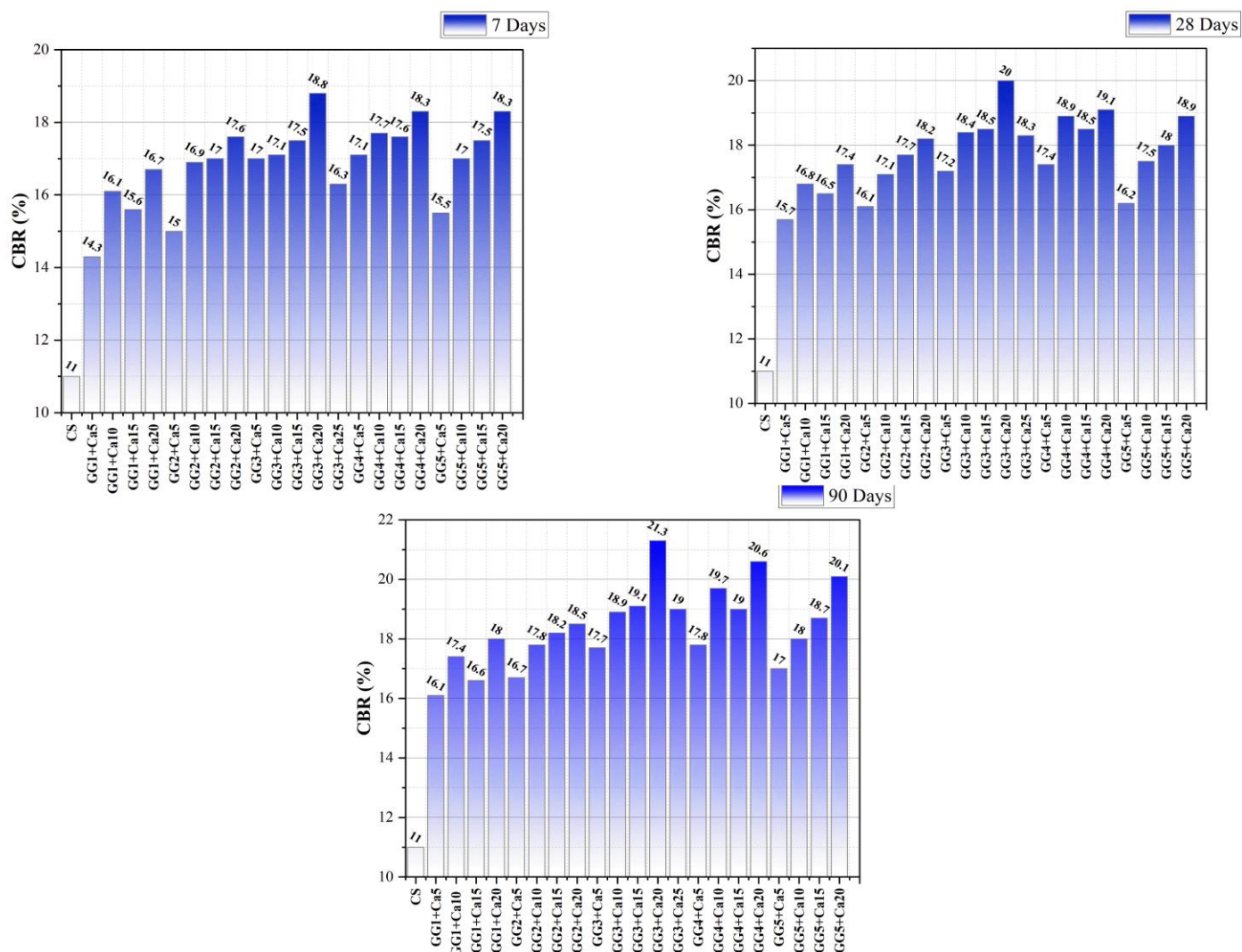


شکل ۱۱: تغییرات چسبندگی با حضور درصد‌های مختلف افزودنی پس از دوره‌های عمل‌آوری مختلف

۳-۲- نتایج آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا

نتایج آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا، برای مدت زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روز در شکل ۱۲ ارائه گردیده است. مطابق با نتایج ارائه شده، حضور توام سرباره کوره آهن‌گدازی و کاتالیست پسماند کراکینگ در تمامی طرح‌های اختلاط، موجب افزایش نسبت باربری شده است. حداکثر میزان نسبت باربری در طرح اختلاط GG3+Ca20 مشاهده گردید به نحوی که پس از گذشت ۹۰ روز، نسبت باربری از ۱۱٪ مربوط به نمونه شاهد به ۲۱/۳٪ رسیده است. همچنین در سایر طرح‌های اختلاط با ۱، ۲، ۴ و ۵ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی بیشترین مقدار نسبت باربری مربوط به حضور ۲۰٪ کاتالیست پسماند کراکینگ می‌باشد.

قابل ذکر است که برای کلیه طرح‌های اختلاط با گذشت ۷ روز، میزان نسبت باربری به طور میانگین ۱۶/۹٪ بدست آمده است. همچنین میانگین نسبت باربری نمونه‌های ۲۸ روز و ۹۰ روز نیز به ترتیب ۱۷/۷٪ و ۱۸/۴٪ ثبت گردیده است. بنابراین می‌توان گفت به طور متوسط در ۷ روز ابتدایی، نمونه‌های تثبیت شده حدود ۹۲٪ درصد از مقاومت ۹۰ روز را کسب کرده‌اند. این مقدار نسبت به مقاومت ۲۸ روز در حدود ۹۶٪ می‌باشد. به عبارتی با افزایش دوره‌های عمل‌آوری از سرعت رشد نسبت باربری نمونه‌های تثبیت شده کاسته شده است که این موضوع نشان از سرعت بالای واکنش افزودنی‌ها در روزهای ابتدایی با خاک دارد.

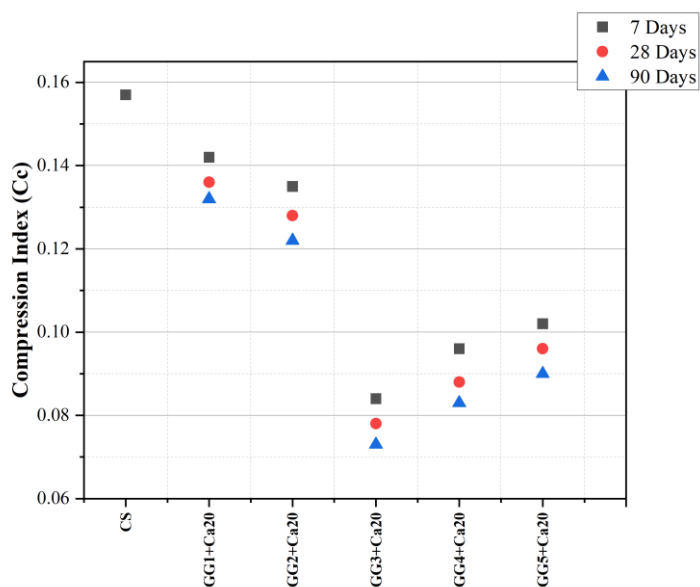


شکل ۱۲: مقادیر CBR نمونه‌های تثبیت شده پس از دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روز

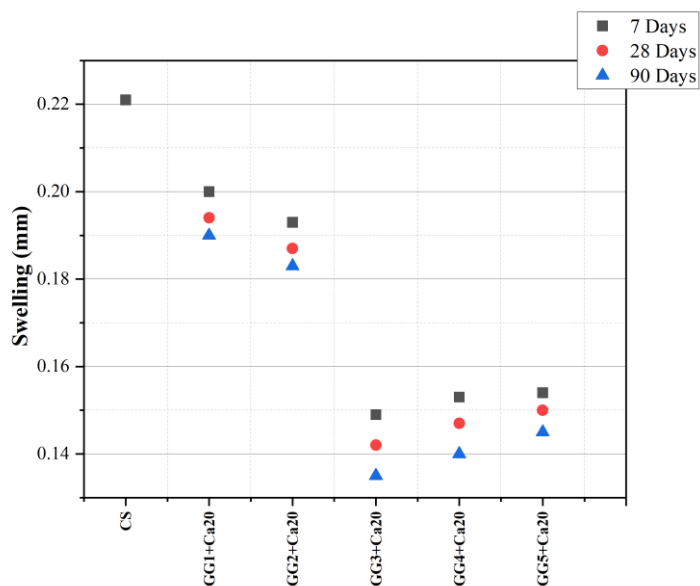
۳-۳- نتایج آزمایش تحکیم یک بعدی

آزمایش تحکیم یک بعدی با هدف تعیین شاخص فشردگی و تورم، در مدت زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روز بر روی نمونه‌هایی که بهترین پاسخ را در آزمایش‌های برش مستقیم و نسبت باربری کالیفرنیا ثبت کرده‌اند، صورت پذیرفت. هدف از این کار، تعیین طرح اختلاط بهینه‌ای است که بهترین پاسخ را از حیث پارامترهای ژئوتکنیکی در آزمایش‌های برش مستقیم، نسبت باربری کالیفرنیا و تحکیم به همراه دارد.

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب نمایانگر شاخص فشردگی و تورم نمونه‌های تثبیت شده می‌باشند. مطابق نتایج، شاخص فشردگی و تورم در طرح اختلاط GG3+Ca20 در تمامی دوره‌های عمل‌آوری کمتر از سایر طرح‌های اختلاط می‌باشد. به نحوی که پس از دوره عمل‌آوری ۹۰ روزه شاخص فشردگی به نسبت نمونه شاهد از ۰/۱۵۷ به ۰/۰۷۳ و تورم از ۰/۲۲۱ میلی‌متر به ۰/۱۳۵ میلی‌متر کاهش یافت. به عبارتی شاخص فشردگی و تورم نسبت به نمونه شاهد به ترتیب حدود ۵۴٪ و ۳۹٪ کاهش یافتند. به همین دلیل این نتیجه دریافت می‌گردد که طرح اختلاط GG3+Ca20 بهینه‌ترین رفتار تحکیمی و تورمی را نسبت به سایر طرح‌های اختلاط دارد.



شکل ۱۳: تغییرات شاخص فشردگی نمونه‌های تثبیت شده پس از دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روز

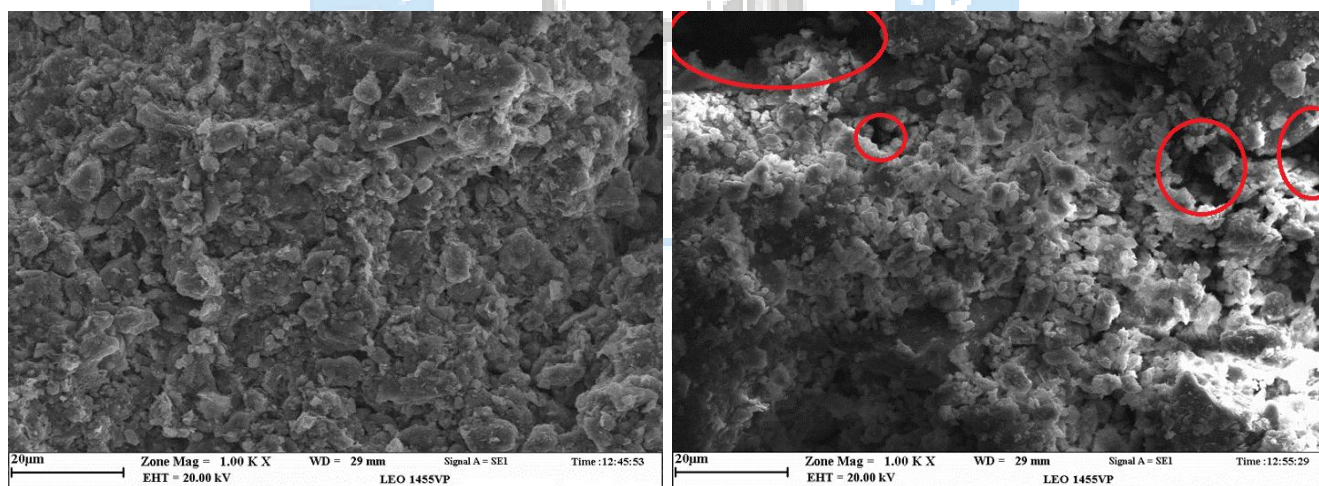


شکل ۱۴: تغییرات تورم نمونه‌های تثبیت شده پس از دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روز

۳-۱- نتایج عکسبرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس

به منظور بررسی اثر فرآیند تثبیت بر ریزساختار و ماهیت شیمیایی خاک تثبیت شده، بر روی نمونه شاهد و نمونه با طرح اختلاط GG3+Ca20 پس از دوره عمل‌آوری ۹۰ روز، که بهترین رفتار را در آزمایش‌های انجام شده به ثبت رسانده است، عکسبرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM¹⁷) و آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDAX¹⁸) صورت پذیرفت. نتایج عکسبرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در شکل ۱۵ (الف) دایره‌های قرمز رنگ نشان دهنده فضاهای خالی در بین ذرات خاک در نمونه تثبیت نشده می‌باشند. حضور همین فضاهای خالی می‌تواند از دلایل کاهش مقاومت و رفتار نامناسب خاک‌ها باشد. با تثبیت خاک مورد مطالعه در شکل ۱۵ (ب) مشاهده می‌شود که فضاهای خالی موجود در نمونه کاهش یافته، پیوستگی میان ذرات ایجاد شده و بافت یکنواختی تشکیل شده است که در نتیجه موجب افزایش مقاومت و بهبود رفتار نمونه‌های تثبیت شده می‌گردد.

نتایج حاصل از آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس که بیانگر میزان و نوع عناصر موجود در نمونه می‌باشد، در شکل ۱۶ (الف) و (ب) ارائه گردیده است. با مقایسه شکل ۱۶ (الف) نمونه شاهد و (ب) نمونه با طرح اختلاط GG3+Ca20 می‌توان به افزایش سیلیس (Si)، کلسیم (Ca) و آلومینیوم (Al) در نمونه تثبیت شده پی برد این عناصرها به وفور در افزودنی‌های استفاده شده وجود دارد و این موضوع می‌تواند تایید کننده واکنش‌های پوزولانی و تشکیل ژل‌های CSH و CAH باشد. همچنین تشکیل سطح پیوسته در نمونه تثبیت شده را می‌توان ناشی از افزایش حضور آهن (Fe) دانست زیرا این عنصر انعطاف‌پذیری بالایی دارد. همینطور افزایش سایر عناصر مانند اکسیژن (O)، منیزیم (Mg) و پتاسیم (K) در نمونه تثبیت شده مشاهده می‌گردد.



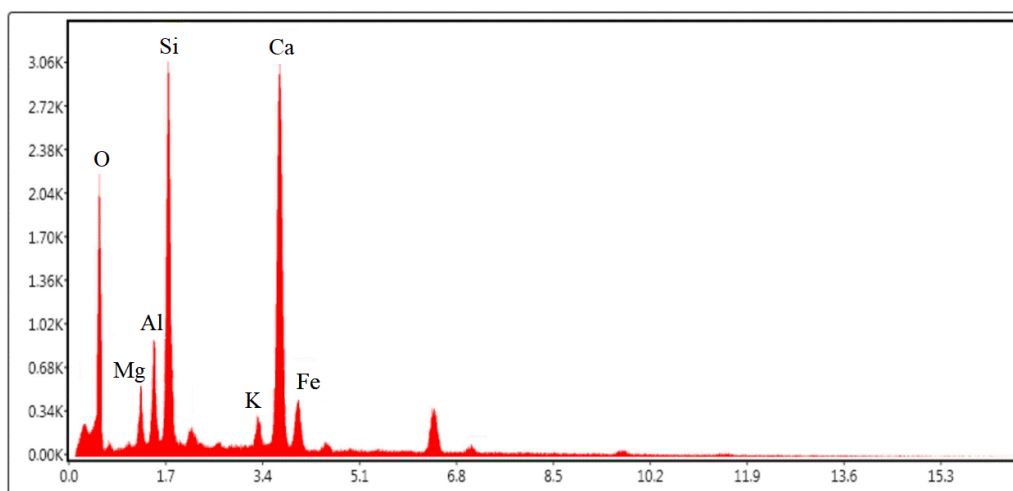
(ب)

(الف)

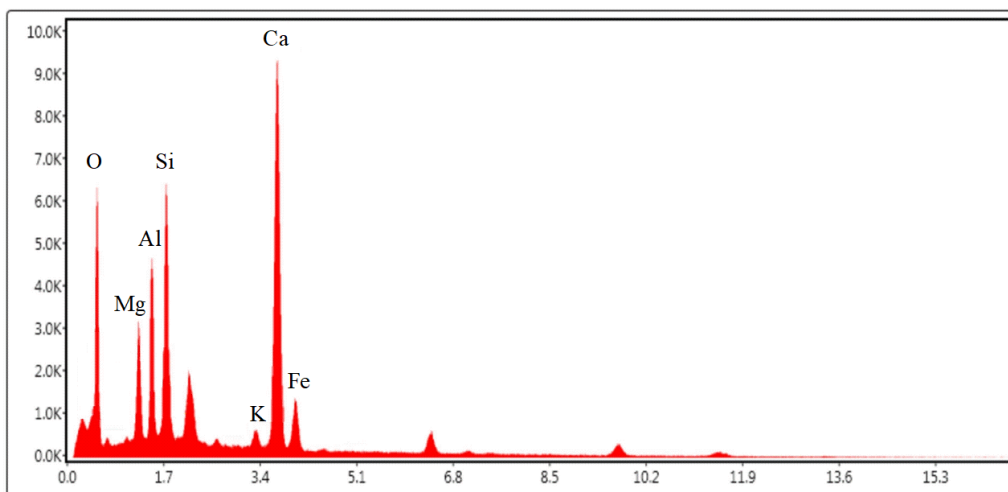
شکل ۱۵: تصاویر عکسبرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (الف) نمونه شاهد (ب) نمونه با طرح اختلاط GG3+Ca20 پس از ۹۰ روز عمل‌آوری

¹⁷ scanning electron microscope

¹⁸ Energy-dispersive X-ray spectroscopy



(الف)



(ب)

شکل ۱۶: نتایج آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (الف) نمونه شاهد (ب) نمونه با طرح اختلاط GG3+Ca20 پس از ۹۰ روز عمل آوری

۴- جمع بندی

در این پژوهش به بررسی اثرات سرباره کوره آهن‌گدازی و کاتالیست پسماند کراکینگ بر خاک رس نرم پرداخته شد. به طور کلی این دو افزودنی از پسماندهای صنعتی می‌باشند که به طور گسترده در صنایع فولاد و پالایشگاهی تولید می‌گردند. از دلایل انتخاب این دو افزودنی می‌توان به دسترسی راحت، هزینه‌های پایین و کاهش خطرات و آسیب‌های زیست‌محیطی اشاره نمود که موجب می‌گردد استفاده از آن‌ها در تثبیت خاک در مقیاس گسترده امکان‌پذیر باشد. به طور کلی از این پژوهش نتایج زیر دریافت گردیده است:

(۱) اثر توام سرباره کوره آهن‌گدازی و کاتالیست پسماند کراکینگ موجب افزایش خصوصیات مقاومتی (چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و نسبت باربری) و کاهش شاخص فشردگی و تورم خاک رس نرم مورد مطالعه شده است.

(۲) بهینه‌ترین طرح اختلاط، حاوی ۲۰ درصد کاتالیست پسماند کراکینگ و ۳ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی (GG3+Ca20) می‌باشد که بیشترین میزان بهبود در پارامترهای مقاومتی و تحکیمی در حضور این مقادیر از افزودنی مشاهده گردید.

(۳) این بهبود رفتار خاک در حضور افزودنی‌ها با توجه به ماهیت واکنش‌های پوزولانی در ارتباط با کلسیم، سیلیس و آلومینای موجود در نمونه تثبیت شده و تشکیل ژل‌های CSH و CAH می‌باشد و با افزایش مقدار افزودنی‌ها به بیش از میزان بهینه جذب آب نمونه‌های تثبیت شده کاهش پیدا می‌کند و موجب اختلال در واکنش‌های پوزولانی می‌گردد همچنین ذرات مازاد افزودنی در داخل نمونه تجمع نموده و کلوخه‌هایی تشکیل می‌دهند که موجب افزایش فضای خالی بین ذرات (تخلخل) می‌گردد. در نتیجه با افزایش و اعمال بار، این ساختار ایجاد شده، در هم شکسته و منجر به ایجاد روندی معکوس در رفتار نمونه‌های تثبیت شده می‌گردد.

(۴) به طور کلی نتایج نشان از تاثیر مثبت دوره‌های عمل‌آوری بر رفتار نمونه‌های تثبیت شده دارد. قابل ذکر است که در روزهای ابتدایی (۷ روز) افزودنی‌ها سرعت واکنش بیشتری با خاک داشتند به طوری که در آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا به طور متوسط در ۷ روز ابتدایی، نمونه‌های تثبیت شده حدود ۹۲٪ درصد از مقاومت ۹۰ روزه را کسب کرده‌اند. این مقدار نسبت به مقاومت ۲۸ روزه در حدود ۹۶٪ می‌باشد.

(۵) نتایج عکسبرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که در نمونه‌های تثبیت شده تخلخل کاهش یافته، پیوستگی میان ذرات ایجاد شده و بافت یکنواختی تشکیل شده است.

(۶) نتایج حاصل از آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس نشان داد در اثر حضور افزودنی‌ها مقادیر سیلیس (Si)، کلسیم (Ca) و آلومینیوم (Al) افزایش یافته که این موضوع می‌تواند تایید کننده واکنش‌های پوزولانی و تشکیل ژل‌های CSH و CAH باشد. همچنین در اثر حضور سرباره کوره آهن‌گدازی میزان عنصر آهن (Fe) افزایش یافته که به دلیل انعطاف‌پذیری این عنصر، سطحی پیوسته و یکنواخت در نمونه‌های تثبیت شده تشکیل گردیده است.

(۷) از نظر قیمت، هر کیلوگرم سرباره کوره آهن‌گدازی ۴۰۰۰ تومان معادل ۰/۰۵ دلار و هر کیلوگرم کاتالیست پسماند کراکینگ ۲۵۰۰ تومان معادل ۰/۰۳ دلار می‌باشد در صورتی که هر کیلوگرم سیمان ۱۸۰۰ تومان معادل ۰/۰۲۳ دلار است. از جنبه اقتصادی شاید در دیدگاه اول استفاده از سیمان جهت تثبیت خاک مقرون به صرفه و دارای اولویت باشد اما با در نظر گرفتن مسائل مخرب زیست محیطی ناشی از تولید سیمان و مصالح مشابه و همچنین تولید بالای پسماندهای سرباره کوره آهن‌گدازی و کاتالیست پسماند کراکینگ در ایران و اثرگذاری مناسب این پسماندها بر رفتار خاک مورد مطالعه، استفاده این مصالح را می‌توان گزینه مناسبی جهت جایگزینی سیمان و مصالح مشابه در نظر گرفت که موجب کاهش تولید CO₂ و هزینه‌های ناشی از مقابله با این گازها می‌گردد.

(۸) باید توجه داشت نتایج حاصل از این پژوهش، بر اساس آزمایش‌های انجام شده بر روی خاک رس نرم با مشخصات ارائه شده در این پژوهش می‌باشد و قابل تعمیم به یک منطقه و یا سایر خاک‌ها نمی‌باشد. در صورت تعمیم نتایج به یک منطقه نیازمند نمونه‌های بیشتر از اعماق و مکان‌های مختلف و انجام آزمایش‌های بیشتر می‌باشد. همچنین نتایج ارائه شده حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی می‌باشد و ممکن است نسبت به شرایط برجای خاک تفاوت داشته باشد.

۵- مراجع

- [1] Zabihi Samani, M., Dolati, P., Babaei, Z., & Daryabari, M. (2022). Investigation of clay of rey town improvement with glass fibers and its effect on reducing the settling of strip foundations. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 9(6), 81-107. doi: 10.22065/jsce.2021.300156.2535.
- [2] Amelsakhi, M., Yousefi, R., Amooei, A. A. & Karimi, A. (2022). Experimental Study on the Effect of Adding Polypropylene Fibers on Soil Stabilized by Cement and Zeolite Replacement. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(4), 1553-1572. doi: 10.22060/ceej.2021.19689.7236.

- [3] Maheepala, M. M. A. L. N., Nasvi, M. C. M., Robert, D. J., Gunasekara, C., & Kurukulasuriya, L. C. (2024). Mix optimization for expansive soil stabilized with a novel waste material-based geopolymerization approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 61(10), 2180-2205. doi: 10.1139/cgj-2023-0271.
- [4] Gupta, G., Sood, H., & Gupta, P. K. (2024). Economic and environmental assessment of industrial wastes stabilized clay and sand soil subgrades using experimental and theoretical approaches. *Construction and Building Materials*, 422, 135787. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135787.
- [5] Salimi, K., & Ghazavi, M. (2021). Soil reinforcement and slope stabilisation using recycled waste plastic sheets. *Geomechanics and Geoengineering*, 16(6), 497-508. doi: 10.1080/17486025.2019.1683620.
- [6] Naik, R., Kumar, S., & Saha, G. (2024). Novel framework for assessing economic viability and environmental impacts: Use of waste products in soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 411, 134329. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134329.
- [7] Yu, H., Joshi, P., Lau, C., & Ng, K. (2024). Novel application of sustainable coal-derived char in cement soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 414, 134960. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.134960.
- [8] Ohadian, A., Khayat, N., & Mokhberi, M. (2024). Microstructural analysis of marl stabilized with municipal solid waste and nano-MgO. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(8), 3258-3269. doi: 10.1016/j.jrmge.2023.09.038.
- [9] Ghazavi, M., & Alimohammadi, F. (2023). Shear behavior of waster tire chip-sand mixtures using direct shear tests. In *New Horizons in Earth Reinforcement* (pp. 345-350). CRC Press.
- [10] Tang, P., Javadi, A. A., & Vinai, R. (2024). Sustainable utilisation of calcium-rich industrial wastes in soil stabilisation: Potential use of calcium carbide residue. *Journal of Environmental Management*, 357, 120800. doi: 10.1016/j.jenvman.2024.120800.
- [11] Yousefi, R., Amooei, A. A., Karimi, A. and Amelsakhi, M. (2023). Environmental Effect of Adding Zeolite and Sawdust on the Unconfined Strength of Stabilized Soil by Cement. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(11), 4287-4306. doi: 10.22060/ceej.2022.20693.7502
- [12] Shakil, M., Nazar, S., Ameen, H. F. M., Shahzad, A., & Ahmad, F. (2025). A comparative study of ground granulated blast furnace slag and bagasse ash incorporation on enhancing mechanical properties of expansive soil. *Results in Engineering*, 25, 103569. doi: 10.1016/j.rineng.2024.103569
- [13] Parhizkar, A., Nazarpour, A., & Khayat, N. (2024). Investigation of geotechnical and microstructure characteristics of gypsum soil using ground granulated blast-furnace slag (GGBS), fly ash, and lime. *Construction and Building Materials*, 418, 135358. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135358.
- [14] Beygi, L., & Khazaei, J. (2024). Soft clay eco-friendly improvement by ground granulated blast furnace slag and quicklime. *Geotechnical and Geological Engineering*, 42(3), 2061-2074. doi: 10.1007/s10706-023-02661-9.
- [15] Zheng, P., Li, W., Ma, Q., & Xi, L. (2023). Mechanical properties of phosphogypsum-soil stabilized by lime activated ground granulated blast-furnace slag. *Construction and Building Materials*, 402, 132994. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132994.
- [16] Ebailila, M., Kinuthia, J., Oti, J., & Al-Waked, Q. (2022). Sulfate soil stabilisation with binary blends of lime-silica fume and lime-ground granulated blast furnace slag. *Transportation Geotechnics* 37, 100888. doi: 10.1016/j.trgeo.2022.100888.
- [17] Darsi, B. P., Molugaram, K., & Madiraju, S. V. H. (2021). Subgrade black cotton soil stabilization using ground granulated blast-furnace slag (GGBS) and lime, an inorganic mineral. *Environmental Sciences Proceedings*, 6(1), 15. doi: 10.3390/iecms2021-09390.
- [18] Behera, C. K., & Senapati, S. (2021). Soil Stabilization by Industrial Waste (GGBS and Stone Dust). *International Journal of Engineering Research and Technology* 10(9), 409-415. doi: 10.17577/IJERTV10IS090154.
- [19] Zamanian, M., Hassanvandian, M., & Noorzad, A. (2022). Stabilizing rammed earth walls as a sustainable construction method with eco-friendly material: a case study. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 9(10), 122-135. doi: 10.22065/jsce.2022.304317.2569.
- [20] Sajedi, S. F., & Ahmadi, M. (2021). Experimental evaluation of slag application of Ahvaz steel plant in fixing bed of east sixth bridge in Ahvaz. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(9), 277-288. doi: 10.22065/jsce.2020.221138.2089.
- [21] De Brito, J., Thomas, C., Medina, C., & Agrela, F. (2021). *Waste and Byproducts in Cement-Based Materials: Innovative Sustainable Materials for a Circular Economy*. Woodhead Publishing, 283-334 .

- [22] Zainab, S. A. K., Zainab, A. M., Jafer, H., Dulaimi, A. F., & Atherton, W. (2018). The effect of using fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) "as a cement replacement in soft soil stabilisation". *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(4), 522-533 .
- [23] Kori, S., & Shah, M. (2022). Assessment of Pozzolanic Reaction and Resulting Strength of Dune Sand Stabilized with Cement Supplementary Pozzolanic Waste Materials .*Journal of Civil, Construction and Environmental Engineering*, 7(6), 118-124.
- [24] ASTM Standard D 422, (2002). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [25] ASTM Standard D 4318, (2000). *Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [26] ASTM Standard D 854, (2002). *Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [27] ASTM Standard D 698, (2007). *Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort*. American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [28] ASTM Standard D 3080, (2011). *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [29] ASTM Standard D 1883, (1999). *Standard Test Method for California Bearing Ratio of Laboratory-Compacted Soils*. American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA .
- [30] ASTM Standard D 2435, (2011). *Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*. American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [31] Fathi, R., Elyasi, M., & Khazaei, J. (2024). Investigating and studying the effect of Montmorillonite Nanoclay on consolidation and strength behavior of soft and loose fine-grained soil (Case study: fine-grained soil of Kermanshah Faculty of Agriculture). *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 55(12), 2441-2472. doi: 10.22060/ceej.2023.22016.7880.
- [32] Akbari, H. R., Sharafi, H., & Goodarzi, A. R. (2021). Effect of polypropylene fiber and nano-zeolite on stabilized soft soil under wet-dry cycles. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(6), 1470-1482. doi: 10.1016/j.geotexmem.2021.06.001.