



Semnan University



Research Article

A Comparative Study on the Effect of Cement Kiln Dust, Fly Ash, and Ground Granulated Blast Furnace Slag on Compaction Characteristics and California Bearing Ratio of Clay Soils

Sadegh Ghavami^{ORCID}

Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-07-14

Revised: 2024-08-28

Accepted: 2024-08-28

Keywords:

Cement kiln dust; Fly ash;
Ground granulated blast
furnace slag;

Compaction parameters;
California bearing ratio.

ABSTRACT

The objective of this study is to compare the effectiveness of industrial wastes including cement kiln dust (CKD), fly ash (FA), and ground granulated blast furnace slag (GGBFS) for stabilization of clay soils. To chemically stabilize the soil, optimal amounts of CKD (10%-20%), class C FA (20%-25%) and GGBFS (20%-30%) have been suggested. Considering the soil pH value with different percentages of additives, the amount of each additive was considered the same (20%) for better comparison. Standard compaction and California Bearing Ratio (CBR) tests were conducted on the mixtures. To investigate the microstructural effect of additives, the samples were subjected to scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) analysis. Results showed that CKD and FA decreased maximum dry density and increased optimum moisture content. Meanwhile, GGBFS decreased optimum moisture content of the samples and increased maximum dry density. The CBR in soil stabilized with CKD, FA, and GGBFS was 21.7, 13.3, and 15.7 times that of pure soil, respectively. According to the results of the SEM and XRD analysis, the increase in strength in the stabilized soil is caused by pozzolanic reactions and creation of cementation products, and as a result, binding of soil particles and stabilizers and filling of the pores. The higher the amount of free lime in the stabilizer, the greater the increase in soil strength. In practical projects, factors such as delay time (the time between the first contact of the additive and water and the final compaction of the mixture) and moisture content that affect the strength parameters should be considered. Also, environmental issues, such as potential of these additives to enter groundwater, are important.

* Corresponding author.

E-mail address: ghavamijamal@sut.ac.ir

How to cite this article: Ghavami, S. (2024). A Comparative Study on the Effect of Cement Kiln Dust, Fly Ash, and Ground Granulated Blast Furnace Slag on Compaction Characteristics and California Bearing Ratio of Clay Soils. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 10(2), 57-70.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2024.34756.1680>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



مقاله پژوهشی

مقایسه تأثیر پسماندهای صنعتی (غبار کوره سیمان، خاکستر بادی و سرباره کوره آهن‌گدازی) بر پارامترهای تراکمی و نسبت باربری کالیفرنیا در خاک‌های رسی

صادق قوامی جمال

استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۲۴	هدف از این تحقیق، مقایسه تأثیر پسماندهای صنعتی شامل غبار کوره سیمان (CKD)، خاکستر بادی (FA) و سرباره کوره آهن‌گدازی (GGBFS) بر تثبیت خاک‌های رسی است.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷	برای تثبیت شیمیایی خاک‌ها، مقدار بهینه CKD، ۲۰-۱۰ درصد، خاکستر بادی رده C، ۲۰-۲۵ درصد و GGBFS، ۲۰-۳۰ درصد پیشنهاد شده است. با در نظر گرفتن مقدار pH خاک با درصد‌های مختلف مواد افزودنی، مقدار افزودنی‌ها برای مقایسه بهتر، یکسان و برابر با ۲۰ درصد انتخاب شد. آزمایش‌های تراکم استاندارد و نسبت باربری کالیفرنیا بر نمونه‌ها انجام شد. جهت بررسی اثر ریزساختاری مواد افزودنی، نمونه‌ها تحت آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و پراش پرتوی ایکس (XRD) قرار گرفتند. نتایج نشان داد که غبار کوره سیمان و خاکستر بادی موجب کاهش دانسیته خشک حداکثر و افزایش درصد رطوبت بهینه خاک می‌شوند. در حالی که سرباره کوره آهن‌گدازی، درصد رطوبت بهینه نمونه را کاهش و دانسیته خشک حداکثر را افزایش داد. نسبت باربری کالیفرنیا در خاک تثبیت‌شده با CKD، FA و GGBFS به ترتیب ۲۱/۷، ۱۳/۳ و ۱۵/۷ برابر خاک خالص بود. منطبق بر نتایج آنالیز SEM و XRD، افزایش مقاومت در خاک تثبیت‌شده، ناشی از واکنش‌های پوزولانی و ایجاد محصولات سیمان‌تاسیون و در نتیجه اتصال ذرات خاک و تثبیت‌کننده‌ها و پُر شدن فضاهای خالی می‌باشد. هر چه میزان آهک آزاد در تثبیت‌کننده بیشتر باشد، افزایش مقاومت در خاک، بیشتر خواهد بود. در پروژه‌های اجرایی، عواملی مانند زمان تأخیر (زمان بین اولین تماس ماده افزودنی با آب و کوبیدن نهایی مخلوط) و میزان رطوبت که بر پارامترهای مقاومت تأثیر می‌گذارند، باید در نظر گرفته شوند. همچنین مسائل زیست‌محیطی مانند قابلیت واکنش‌پذیری و نفوذ این مواد به آب‌های زیرزمینی، حائز اهمیت است.
پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷	
واژگان کلیدی:	
غبار کوره سیمان، خاکستر بادی، سرباره کوره آهن‌گدازی، تراکم، نسبت باربری کالیفرنیا.	

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ghavamijamal@sut.ac.ir

استناد به این مقاله: قوامی جمال، صادق. (۱۴۰۳). مقایسه تأثیر زائدات صنعتی (غبار کوره سیمان، خاکستر بادی و سرباره کوره آهن‌گدازی) بر پارامترهای تراکمی و نسبت باربری کالیفرنیا در خاک‌های رسی. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱۰(۲)، ۵۷-۷۰.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2024.34756.1680>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱. مقدمه

سیمان به خاک‌های مختلف منجر به افزایش قابل توجه پارامترهای مقاومتی می‌شود. طاه‌ها و همکاران (۲۰۰۱) نسبت باربری کالیفرنیا^۴ (CBR) در خاک ریزدانه تثبیت‌شده با ۹ درصد غبار کوره سیمان را ۱۸/۷ برابر خاک خالص گزارش کردند.

خاکستربادی (FA)، خاکستر به جا مانده از احتراق زغال‌سنگ پودر شده در کوره در نیروگاه‌هایی با سوخت زغال‌سنگ است. اگر خاکستربادی، به عنوان یک ماده پسماند، به خوبی مدیریت نشود، می‌تواند منجر به مشکلات زیست‌محیطی و بهداشتی جدی شود. با این حال، بسیاری از ویژگی‌های خاکستربادی مانند مقاومت برشی زیاد و خصوصیات پوزولانی، نقش مهمی در بهبود خواص خاک در کاربردهای ژئوتکنیک ایفا می‌کند.

FA حاوی برخی مواد آلمینی و سیلیسی است که در واکنش شیمیایی با آب، سیمان تشکیل می‌دهند و این ماده معمولاً به عنوان یک عامل تثبیت‌کننده برای مصالح اساس و زیراساس در نظر گرفته می‌شود (احمرالزمان، ۲۰۱۰؛ وانگ و همکاران ۲۰۱۹). طبق استاندارد ASTM C618، خاکستربادی با توجه به ترکیبات شیمیایی به دو رده C و F تقسیم می‌شود. خاکستربادی رده C معروف به خاکستربادی «با کلسیم زیاد» است زیرا به صورت معمول حاوی بیش از ۲۰ درصد CaO (آهک) می‌باشد. خاکستربادی رده F کمتر از ۱۰ درصد آهک دارد. خاکستربادی رده C به دلیل خواص سیمان‌شدگی زیاد می‌تواند به تنهایی به عنوان یک ماده تثبیت‌کننده به کار گرفته شود. خاکستربادی رده F بهتر است به همراه عامل سیمان‌تاسیون (آهک، غبار کوره سیمان و سیمان) در تثبیت خاک استفاده شود (قوامی و رجبی، ۲۰۲۱). مطالعات نشان داده است که خاکستربادی موجب افزایش پارامترهای مقاومت برشی خاک (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) می‌شود که این افزایش در خاکستربادی

ساخت، بازسازی و توسعه زیرساخت‌ها، برخی از فرآیندهای مورد نیاز برای پاسخگویی به نیازهای روزافزون جامعه بشری است. با این حال، این فرآیندها مستقیماً به دلیل در دسترس نبودن خاک‌های مناسب در ساختگاه‌های مورد نظر، با محدودیت مواجه می‌شوند. فقدان خاک مناسب (که اغلب دارای مقاومت کم و تراکم‌پذیری زیاد هستند) در مکان‌های مورد نظر به این معنی است که خاک با خصوصیات لازم یا باید جایگزین شود (که صرفه اقتصادی ندارد) و یا خاک موجود در محل، جهت رسیدن به پارامترهای مورد نیاز بهسازی شود (قوامی و حسینی‌فانی، ۲۰۲۳). تثبیت شیمیایی، اغلب برای بهبود پارامترهای مقاومتی خاک‌های رسی با تغییر در خصوصیات فیزیکی- شیمیایی آنها به کار می‌رود. محدودیت‌هایی مانند هزینه زیاد تولید و دسترسی به تثبیت‌کننده‌های شیمیایی مرسوم، مانند سیمان و آهک، و از طرفی مسائل زیست‌محیطی ناشی از تولید و کاربرد این مواد، موجب شده است تا استفاده از مصالح جایگزین مورد توجه محققین قرار گیرد. از جمله این مصالح می‌توان به پسماندهای صنعتی، مانند غبار کوره سیمان^۱، خاکستربادی^۲ و سرباره کوره آهن‌گدازی^۳ اشاره کرد.

غبار کوره سیمان (CKD)، ضایعات ریز، جامد و بسیار قلیایی است که توسط دستگاه‌های کنترل آلودگی هوا از گازهای خروجی کوره سیمان جمع‌آوری می‌شود (جهانبخش و همکاران، ۲۰۲۰؛ عموزاده عمران، ۲۰۲۳). وجود کلسیم اکسید (آهک آزاد) و ترکیبات قلیایی در ساختار شیمیایی CKD و ریزی ذرات آن موجب شده که از این ماده در تثبیت خاک‌ها استفاده شود. مطالعات انجام شده توسط الحُمیدی و همکاران (۲۰۱۷، ۲۰۲۴)، قوامی و همکاران (۲۰۲۱) و عیسی و همکاران (۲۰۲۲) نشان می‌دهد که افزودن غبار کوره

³- Ground granulated blast furnace slag (GGBFS)

⁴- California Bearing Ratio (CBR)

¹- Cement kiln dust (CKD)

²- Fly ash (FA)

همان گونه که مرور ادبیات فنی نشان می‌دهد، غبار کوره سیمان، خاکستربادی و سرباره کوره آهن‌گدازی به صورت جداگانه جهت بهبود پارامترهای ژئوتکنیک خاک‌های مختلف استفاده شده‌اند ولی تأثیر آنها بر یک نوع خاک مشخص، مقایسه نشده است. در این تحقیق، به منظور مقایسه بهتر عملکرد این پسماندهای صنعتی در تثبیت شیمیایی خاک، به منظور استفاده در راه‌سازی، پارامترهای تراکمی و نسبت باربری کالیفرنیا در خاک رسی تثبیت‌شده با مقادیر یکسان FA، CKD و GGBFS اندازه‌گیری می‌شود. به‌علاوه، در انتها، جهت تحلیل ریزساختاری و مکانیزم تثبیت شیمیایی هر یک از این افزودنی‌ها، نتایج آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و پراش پرتو ایکس (XRD) بر نمونه‌ها ارائه می‌گردد.

۲. مصالح

در این تحقیق، از خاک رس کائولینیت^۱ تهیه شده از شرکت صنایع خاک چینی ایران استفاده شد. نتایج آزمون دانه‌بندی خاک بر اساس استاندارد ASTM D422-63 نشان می‌دهد که بیش از ۹۰ درصد ذرات خاک از الک ۲۰۰ عبور می‌کنند (شکل ۱). پس از انجام آزمایش حدود اتربرگ بر اساس استاندارد ASTM D4318، حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری خاک رس کائولینیت، به ترتیب ۲۹/۵، ۲۱/۵ و ۸ به‌دست آمد. بنابراین، این خاک بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS)، خاک رسی با پلاستیسیته کم (CL) است. با انجام آزمایش تراکم استاندارد بر اساس استاندارد ASTM D698، دانسیته خشک حداکثر، 17 kN/m^3 و درصد رطوبت بهینه ۱۶/۲ به‌دست آمد. همچنین، وزن مخصوص دانه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D854، ۲/۶۵ است. ترکیبات شیمیایی موجود در خاک با استفاده از آنالیز طیف‌نگاری

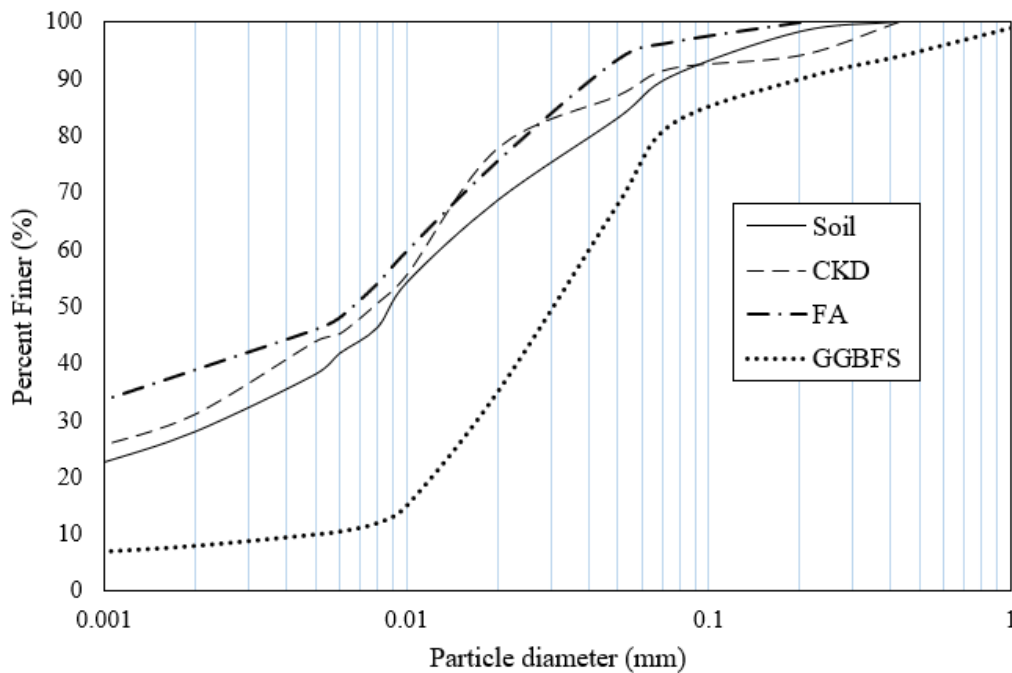
رده C بیشتر از خاکستربادی رده F است (توران و همکاران، ۲۰۲۲). ادیل و همکاران (۲۰۰۶) و شیرخانلو و همکاران (۲۰۲۱) نیز افزایش CBR در نمونه‌های خاک تثبیت‌شده با خاکستربادی را گزارش کرده‌اند.

سرباره کوره آهن‌گدازی (GGBFS) یک محصول جانبی است که هنگام جدا کردن آهن از ناخالصی‌های موجود در سنگ آهن در کوره‌های ذوب آهن ایجاد می‌شود. این سرباره اصولاً از سیلیکات‌ها و آلومینوسیلیکات‌های کلسیم تشکیل شده که همزمان با آهن در شرایط مذاب در داخل کوره تولید می‌شوند. سرباره مذاب در دمای حدود 1500°C با پاشیدن آب، سرد شده و مصالحی دانه‌ای ماسه‌مانند شیشه‌ای به وجود می‌آید. در صورتی که این ماده آسیاب گردد (با اندازه کمتر از ۴۵ میکرون) به پوزولان سرباره دانه‌ای آسیاب‌شده آهن‌گدازی تبدیل می‌شود. با توجه به افزایش نرخ تولید فولاد در جهان، میزان GGBFS در حال افزایش است (ارنبرگ، ۲۰۱۰) که با توجه به مشکلات ناشی از حجم زیاد تولید آن، از جمله محدودیت مکان برای دفن زباله (داس و همکاران، ۲۰۰۷)، نیاز روزافزونی برای یافتن استراتژی‌های سازگار با محیط زیست برای استفاده از این مواد وجود دارد (باقری و همکاران، ۲۰۱۲). از این‌رو، تکنیک بهبود خصوصیات خاک با استفاده از GGBFS، مورد توجه مهندسين ژئوتکنیک قرار گرفته است (یادو و تریپاتی، ۲۰۱۳؛ توماس و همکاران، ۲۰۱۸؛ ژائو و همکاران، ۲۰۲۳). یادو و تریپاتی (۲۰۱۳) افزایش مقاومت فشاری محصور نشده (UCS) و CBR در نمونه‌های تثبیت‌شده با GGBFS را مشاهده کردند. در پژوهشی دیگر، ۲۰ درصد GGBFS موجب افزایش UCS در خاک رسی از ۳۷ به ۸۰۳ کیلوپاسکال و افزایش ۱۹۹٪ و ۱۵۰٪ در چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک پس از ۲۸ روز عمل‌آوری گردید (توماس و همکاران، ۲۰۱۸).

^۱- Kaolinite

Ash Resources و سربراره کوره آهن‌گدازی تهیه شده از کارخانه ذوب آهن اصفهان هستند. ترکیبات شیمیایی این مصالح در جدول ۱ و اندازه توزیع ذرات در شکل ۱ نشان داده شده است. وزن مخصوص CKD، FA و GGBFS به ترتیب ۲/۵۴، ۲/۲۲ و ۲/۸۹ است.

فلوئورسانس اشعه ایکس (XRF) به دست آمد که در جدول ۱ ارائه شده است. مواد پسماند صنعتی به عنوان تثبیت‌کننده در این تحقیق، غبار کوره سیمان، تهیه شده از کارخانه سیمان مازندران (جمع‌آوری شده از بگ هاوس)، خاکستربادی رده C، محصول آفریقایی جنوبی و تهیه شده از شرکت



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مصالح استفاده شده

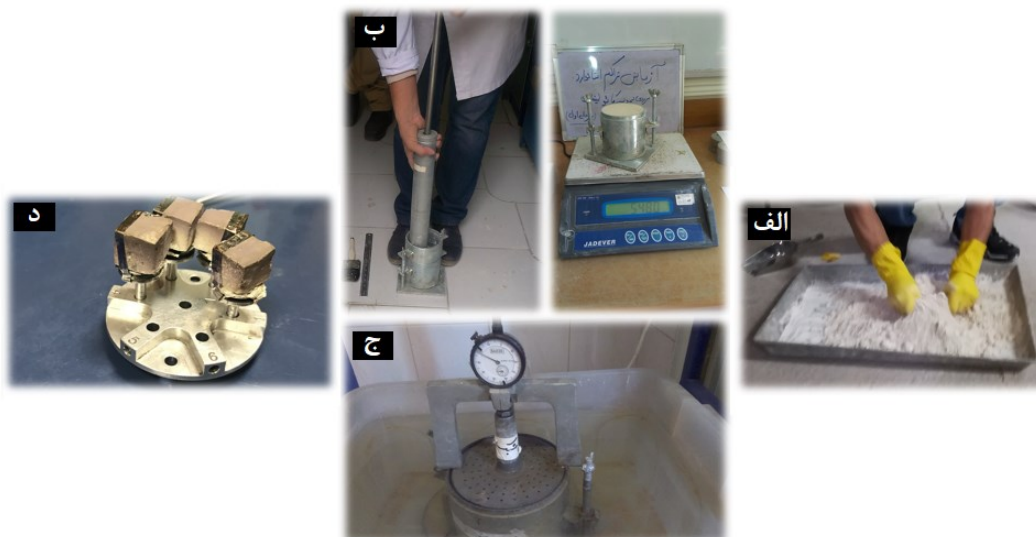
جدول ۱. ترکیبات شیمیایی مصالح مورد استفاده

Chemical Compound	Soil	CKD	FA	GGBFS
SiO ₂	72.5	13.4	41.5	36.6
Al ₂ O ₃	18.07	3.8	15.4	11.6
Fe ₂ O ₃	0.36	2.9	6.6	0.7
CaO	1.15	45.8	25.3	38.4
MgO	0.61	1.1	3.2	8.1
SO ₃	0.06	11.8	2.8	0.7
K ₂ O	0.39	3.81	0.5	1.1
Na ₂ O	0.25	0.69	0.9	0.5
Other	0.61	0.3	0.6	1
Loss on ignition	6	16.4	3.2	1.3

۳. آزمایش‌ها

همکاران، ۲۰۲۱؛ توران و همکاران، ۲۰۲۲) و ۲۰ تا ۳۰ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی (دایالان، ۲۰۱۶؛ توماس و همکاران، ۲۰۱۸؛ مجتبی و همکاران، ۲۰۱۸) پیشنهاد شده است. بنابراین، pH مخلوط خاک با درصدهای مختلف افزودنی با استفاده از روش توصیه شده در ASTM D6276 تعیین شد که شامل مخلوط کردن جامدات با آب دیونیزه، تکان دادن پرپودیک نمونه‌ها و سپس آزمایش با pH سنج پس از یک ساعت است. اگر مخلوط خاک-آهک-آب به نقطه‌ای برسد که به pH مخلوط آهک-آب نزدیک شود (مقدار ۱۲/۴)، فرض می‌شود که آهک کافی برای ارضای تبادل یونی و واکنش-های دیگر در دسترس است. حداقل مقدار FA، CKD و GGBFS برای رسیدن به این pH، طبق جدول ۲ به ترتیب، ۱۵، ۲۰ و ۲۰ درصد به دست آمد. به منظور مقایسه بهتر تأثیر افزودنی‌ها (از نظر بهبود خصوصیات مهندسی) و میزان مصرف آنها (از نظر هزینه و مسائل زیست‌محیطی)، مقدار هر کدام از افزودنی‌ها ۲۰ درصد (نسبت به وزن خشک خاک) در نظر گرفته شد که در محدوده پیشنهاد شده توسط محققین پیشین نیز قرار می‌گیرد.

برای مقایسه بهتر عملکرد تثبیت‌کننده‌ها، مقادیر یکسان از هر کدام برای افزودن به خاک در نظر گرفته می‌شود. با بررسی واکنش‌های شیمیایی انجام شده در تثبیت شیمیایی خاک‌ها، می‌توان دریافت که یون‌های Ca^{2+} و OH^- که می‌توانند با سیلیکات‌ها و آلومینات‌های موجود در خاک و یا افزودنی‌ها واکنش پوزولانی دهند، آزاد می‌شوند. وقتی مقدار آهک در خاک افزایش یابد، pH مخلوط خاک بالا رفته و می‌تواند به حدود ۱۲/۴ برسد که این مقدار، pH آب-آهک اشباع است. در این درجه بازی از محیط، انحلال‌پذیری سیلیکات‌ها و آلومینات‌ها به طور گسترده‌ای افزایش می‌یابد. بنابراین، تا زمانی که کلسیم باقیمانده کافی از آهک در سیستم وجود داشته باشد و pH به اندازه کافی بالا بماند، واکنش پوزولانی ادامه خواهد داشت که این امر موجب تثبیت خاک می‌شود (ماللا و همکاران، ۲۰۰۴). به منظور تثبیت شیمیایی خاک، مقادیر بهینه (۱۰ تا ۲۰ درصد) غبار کوره سیمان (اسماعیل، ۲۰۱۳؛ شمارا، ۲۰۱۷)، ۲۰ تا ۲۵ درصد خاکستر بادی رده C (جوکجا، ۲۰۰۱؛ شیرخانلو و



شکل ۲. الف) مخلوط کردن خاک و مواد افزودنی، ب) آزمایش تراکم، ج) آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا، د) نمونه‌های آماده شده جهت انجام آنالیز میکروسکوپ الکترونی

آزمایش، آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با بزرگنمایی ۲۰۰۰ و پراش پرتوی ایکس (XRD) بر نمونه‌ها انجام شد. ابتدا نمونه‌ها در قالب تک‌محوری با توجه به رطوبت بهینه و دانسیته خشک حداکثر که از آزمایش تراکم به‌دست آمد، بازسازی و به مدت ۷ روز درون کیسه نایلونی درون محفظه نگهداری شدند. سپس، نمونه‌ها از قالب خارج شده و مکعبی در حدود یک سانتی‌متر مکعب از وسط آنها تهیه گردید (شکل ۲-د) و آنالیز SEM در مرکز متالورژی رازی با دستگاه مدل VEGA\TESCAN-LMU بر نمونه‌ها انجام شد. برای آنالیز XRD، این نمونه‌ها به صورت پودر همگن آسیاب شدند. سپس الگوهای XRD با استفاده از تابش $Cu-K\alpha$ با ولتاژ ورودی ۴۰ کیلو ولت و جریان ۳۰ میلی‌آمپر در محدوده 2θ از ۵ تا ۸۰ درجه به‌دست آمد.

برای ساخت نمونه‌ها، پس از اضافه کردن مواد افزودنی به خاک، با دست به صورت همگن مخلوط شدند تا به یک رنگ یکنواخت برسند (شکل ۲-الف). برای به‌دست آوردن پارامترهای تراکمی (دانسیته خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه) که بر خصوصیات مهندسی خاک مانند مقاومت، تراکم‌پذیری و نفوذپذیری مؤثر هستند، آزمایش تراکم منطبق بر استاندارد ASTM D698 بر نمونه‌های تثبیت‌شده انجام شد (شکل ۲-ب). جهت تعیین نسبت باربری کالیفرنیا در شرایط اشباع، نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM D1883، در قالب آزمایش با انرژی مشابه آزمون تراکم استاندارد کوبیده شدند و پس از ۷ روز عمل‌آوری، تحت بارگذاری قرار گرفتند (شکل ۲-ج). آزمایش‌ها سه بار بر هر نمونه انجام شد و مقدار میانگین نتایج گزارش شده است. به منظور بررسی مکانیزم تأثیر افزودنی‌ها بر خاک مورد

جدول ۲. مقادیر pH نمونه‌ها

Additive content (%)	Additive type		
	CKD	FA	GGBFS
5	12.24	12.12	12.16
10	12.38	12.25	12.31
15	12.43	12.30	12.38
20	12.49	12.41	12.44
25	12.52	12.43	12.49

برای خاک حاوی FA رسید. کاهش MDD را می‌توان ناشی از کمتر بودن وزن مخصوص CKD و FA نسبت به خاک دانست. دلیل افزایش OMC، افزایش سطح مخصوص ذرات نمونه‌های تثبیت شده به دلیل بیشتر شدن مقدار مصالح ریزتر است. همانطور که از منحنی دانه‌بندی مصالح (شکل ۱) مشخص است، درصد ریزدانه در CKD و FA بیشتر از خاک رس است. این افزایش در مقدار رطوبت باعث می‌شود که آب جای ذرات جامد را گرفته و دانسیته خشک حداکثر کاهش یابد. روند

۴. بیان و تحلیل نتایج

۴-۱. آزمایش تراکم استاندارد

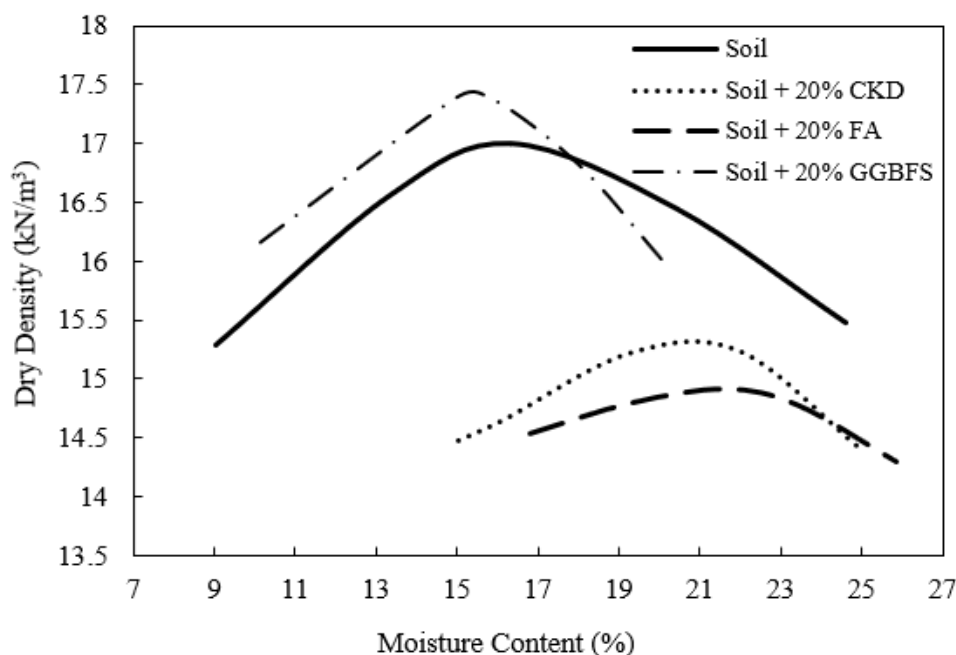
شکل ۳، منحنی‌های تراکم خاک خالص و خاک تثبیت شده که از آزمایش تراکم استاندارد به‌دست آمده‌اند را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزودن CKD و FA به خاک، دانسیته خشک حداکثر^۱ کاهش و درصد رطوبت بهینه^۲ افزایش می‌یابد. دانسیته خشک حداکثر خاک از ۱۷ به ۱۵/۳ کیلونیوتن بر متر مکعب برای خاک حاوی CKD و ۱۴/۹ کیلونیوتن بر متر مکعب

² - Optimum moisture content (OMC)

¹ - Maximum dry density (MDD)

ذرات آن با خاک منجر به افزایش MDD تا ۱۷/۴ کیلونیوتن بر متر مکعب شد. همچنین GGBFS، درصد رطوبت بهینه خاک را از ۱۶/۲ به ۱۵/۴ کاهش داد. چنین روندی در تحقیقات یادو و تریپاتی (۲۰۱۳) و توماس و همکاران (۲۰۱۸) نیز مشاهده شده است.

افزایش OMC و کاهش MDD با افزودن غبار کوره سیمان، در مطالعات الخُمیدی و همکاران (۲۰۱۷) و اسماعیل (۲۰۱۳) و با افزودن خاکستر بادی، در مطالعات توران و همکاران (۲۰۲۲) و شیرخانلو و همکاران (۲۰۲۱) نیز گزارش شده است. با توجه به بیشتر بودن وزن مخصوص GGBFS نسبت به خاک، جایگزینی



شکل ۳. منحنی‌های تراکم نمونه‌ها

که نشان می‌دهد مصالح مناسبی برای اساس و زیراساس نمی‌باشد و برای خاک بستر دارای کیفیت بسیار ضعیف است (تارون و ردی، ۲۰۱۷).

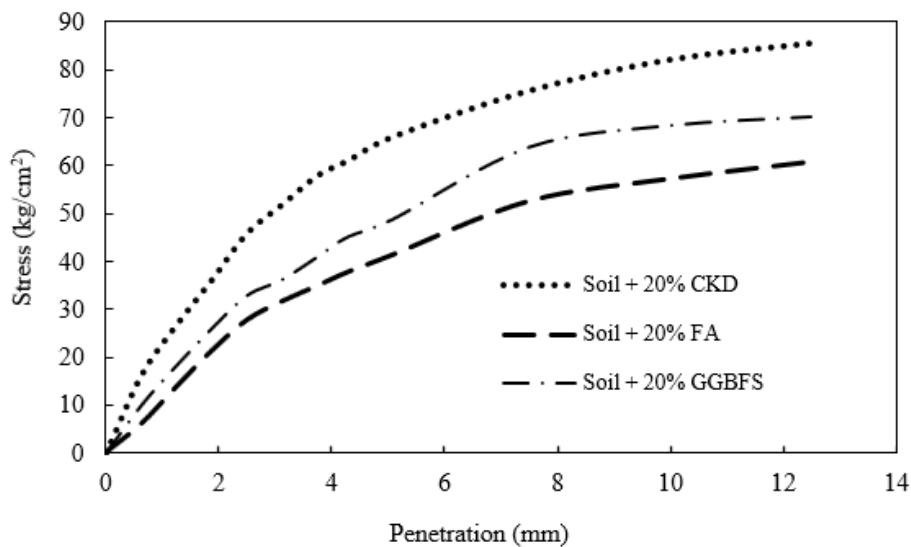
با افزودن CKD، FA و GGBFS به خاک، CBR به ترتیب به ۶۵، ۴۰ و ۴۷ درصد می‌رسد. افزایش CBR، ناشی از واکنش‌های پوزولانی و ایجاد محصولات سیمانتاسیون و در نتیجه اتصال ذرات خاک و تثبیت-کننده‌ها و پر شدن فضاهای خالی می‌باشد. هنگامی که مصالح حاوی کلسیم اکسید (CaO) به خاک رس اضافه می‌شود، در نتیجه برهم‌کنش بین CaO و آب، یون‌های Ca^{2+} و OH^- به سیستم خاک- تثبیت‌کننده وارد می‌شوند.



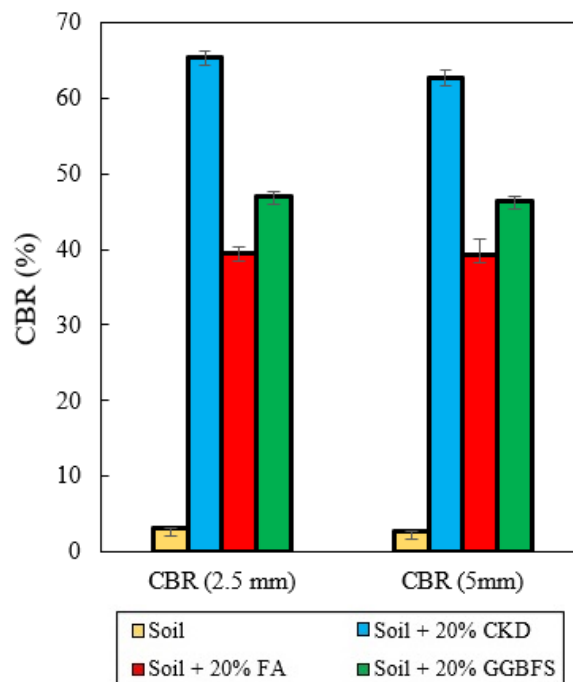
۴-۲. آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)

منحنی تنش- نفوذ به‌دست آمده از آزمایش CBR برای هر یک از نمونه‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. تقسیم مقدار فشار لازم برای نفوذ ۲/۵ و ۵ میلی‌متر در خاک به مقدار فشار لازم برای نفوذ ۲/۵ و ۵ میلی‌متر در آزمون استاندارد به ترتیب به عنوان مقدار CBR (2.5mm) و CBR (5mm) گزارش می‌شود که در شکل ۵ ارائه گردیده است. از آنجا که در همه آزمون‌ها، مقدار CBR (2.5mm) از CBR (5mm) بیشتر بود، مقدار CBR به عنوان مقدار نهایی CBR در نظر گرفته می‌شود. مقدار CBR خاک خالص، ۳ به‌دست آمد

مقایسه تأثیر پسماندهای صنعتی (غبار کوره سیمان، خاکستر بادی و سربره کوره آهن گدازی) بر پارامترهای تراکمی ...



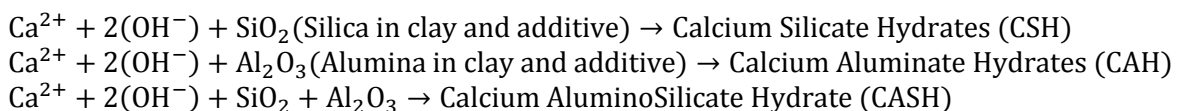
شکل ۴. نمودار تنش - نفوذ در آزمایش CBR در نمونه‌های تثبیت شده



شکل ۵. مقادیر CBR نمونه‌ها برای نفوذ ۲/۵ و ۵ میلی‌متر

مواد اتصال‌دهنده مانند کلسیم سیلیکات هیدرات (CSH)، کلسیم آلومینات هیدرات (CAH) و کلسیم آلومینا سیلیکات هیدرات (CASH) ایجاد می‌شود که موجب تسهیل در پیوند ذرات خاک می‌گردد.

انحلال سیلیس و آلومینای موجود در خاک رسی و تثبیت‌کننده به تدریج در نتیجه ورود یون‌های هیدروکسید به سیستم اتفاق می‌افتد. با واکنش کلسیم و هیدروکسید آزاد شده در معادله بالا با سیلیس و آلومینا،



است. الگوهای XRD نمونه‌های تثبیت‌شده نیز نشان‌دهنده وجود کوارتز، کائولینیت، کلسیت و محصولات سیمانی در نمونه‌ها می‌باشد که در شکل ۷ محصولات سیمانی تولید شده مشخص شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر قله‌ها در نمونه‌های تثبیت‌شده با CKD بیشتر از GGBFS و در GGBFS بیشتر از FA است که مؤید نتایج به‌دست آمده از آزمون CBR می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری

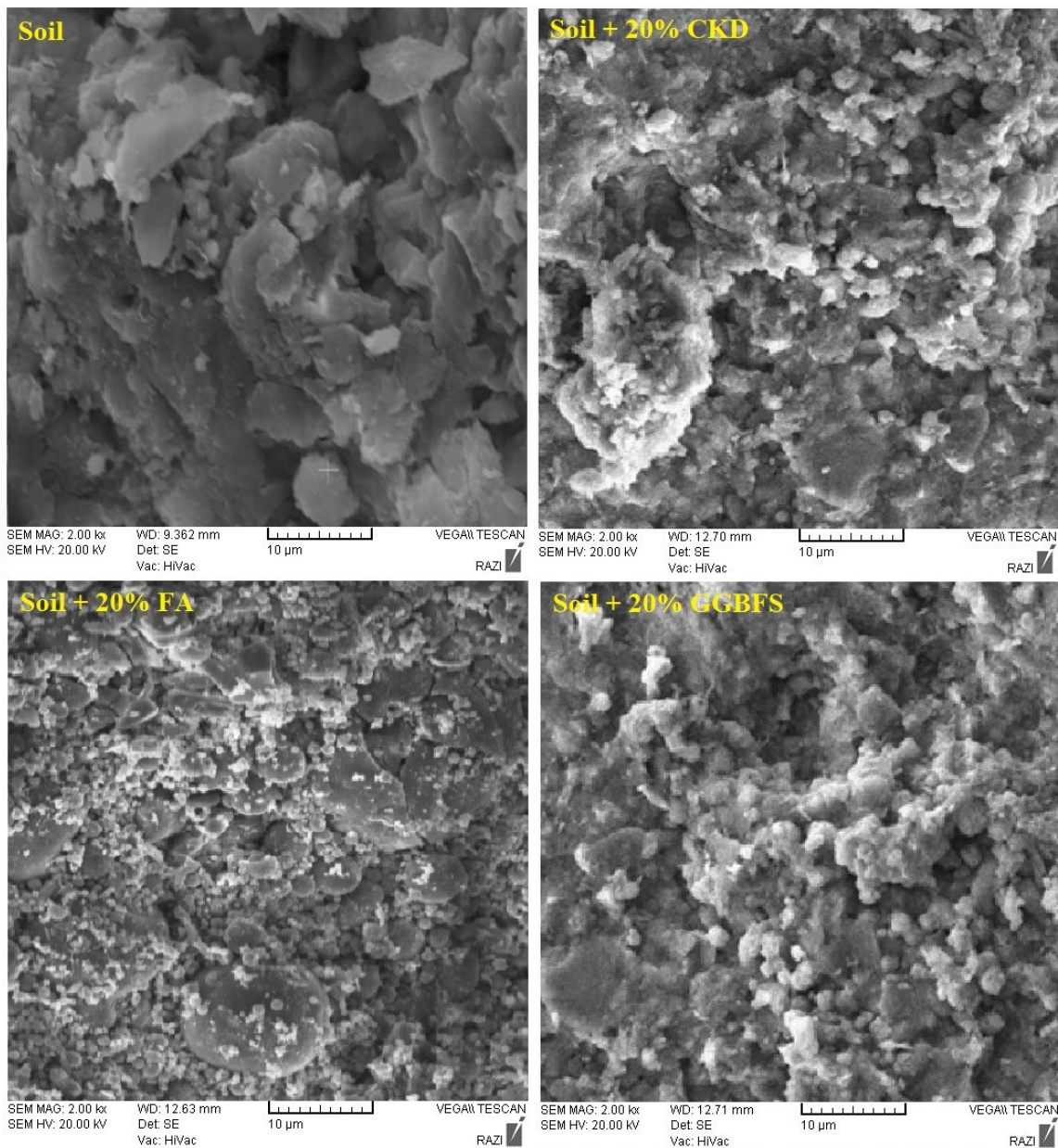
در این تحقیق، تغییرات پارامترهای تراکمی و مقاومتی خاک رس کائولینیت در اثر افزودن پسماندهای صنعتی مختلف شامل غبار کوره سیمان (CKD)، خاکسترزادی رده C (FA) و سرباره کوره آهن‌گدازی (GGBFS) مورد بررسی قرار گرفت. برای مقایسه بهتر عملکرد تثبیت‌کننده‌ها، مقادیر یکسان از هر کدام برای افزودن به خاک در نظر گرفته شد که این مقدار براساس نتایج آزمایش pH، ۲۰ درصد وزن خشک خاک تعیین گردید. نتایج نشان داد که CKD و FA، دانسیته خشک حداکثر را کاهش و درصد رطوبت بهینه را افزایش دادند و در مقابل، GGBFS موجب افزایش دانسیته خشک حداکثر و کاهش درصد رطوبت بهینه خاک شد. این روند را می‌توان ناشی از وزن مخصوص افزودنی‌ها و توزیع اندازه ذرات این مصالح دانست. وزن مخصوص غبار کوره سیمان و خاکسترزادی کمتر از خاک و وزن مخصوص سرباره کوره آهن‌گدازی بیشتر از خاک بود.

با توجه به اینکه مقدار کلسیم اکسید در CKD بیشتر از GGBFS و در GGBFS بیشتر از FA است، محصولات سیمان‌تاسیون بیشتری تولید شده و نمونه‌ها استحکام بیشتری خواهند داشت. بیست درصد غبار کوره سیمان، مقاومت خاک را حدود ۲۱/۷ برابر کرده است که همین مقدار افزودنی برای خاکسترزادی رده C و سرباره کوره آهن‌گدازی به ترتیب موجب افزایش ۱۳/۳ و ۱۵/۷ برابری مقاومت خاک شد. افزایش مقدار CBR خاک با غبار کوره سیمان، خاکسترزادی رده C و سرباره کوره آهن‌گدازی توسط محققین دیگر نیز گزارش شده است (طاها و همکاران، ۲۰۰۱؛ یادو و تریپاتی، ۲۰۱۳؛ شیرخانلو و همکاران، ۲۰۲۱؛ الخُمیدی و همکاران، ۲۰۲۴).

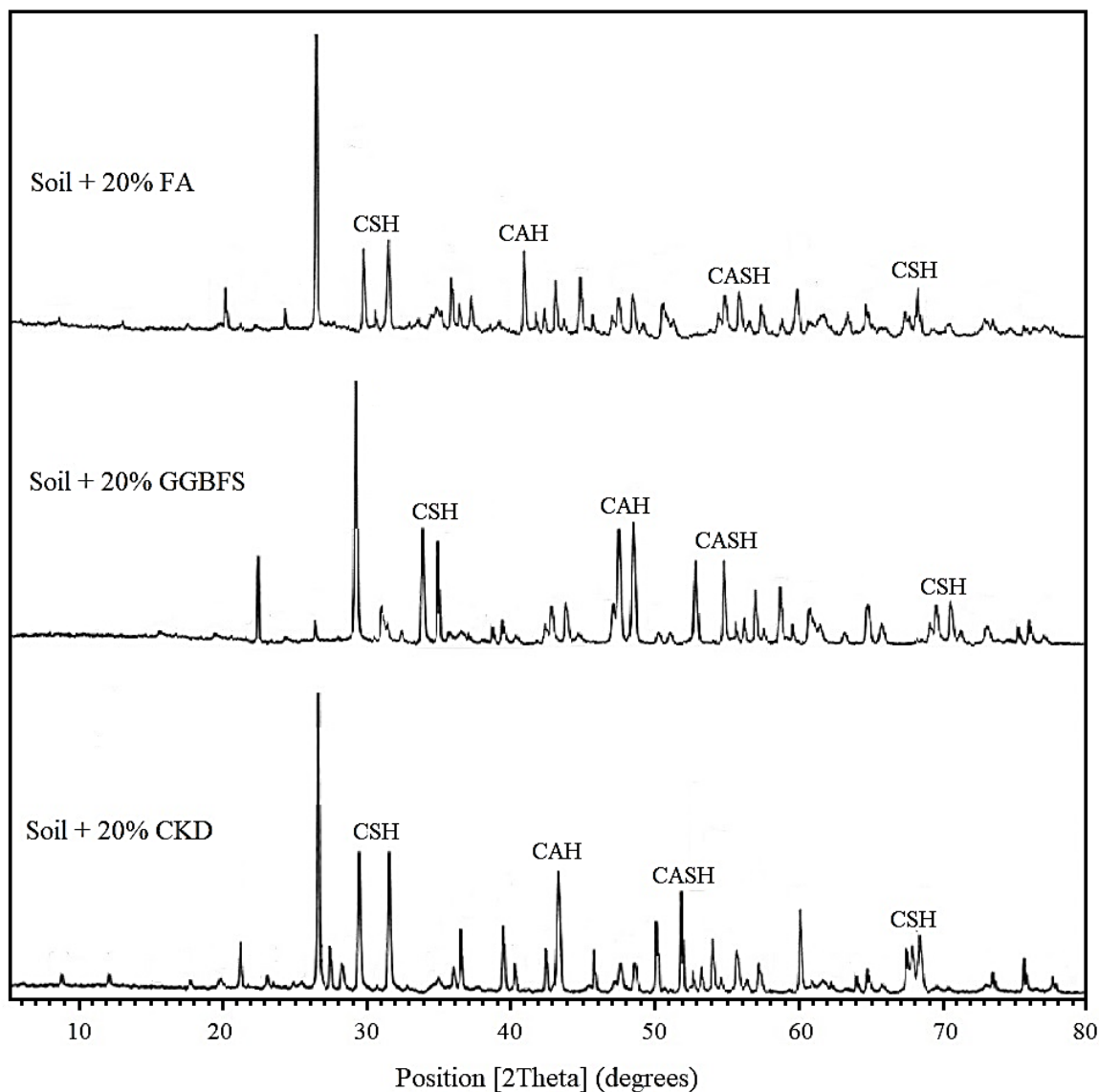
۳-۴. آنالیز شیمیایی

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از خاک خالص و خاک تثبیت‌شده با افزودنی‌های مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. از میکروگراف خاک رس کائولینیت مشخص است که ذرات رس آرایش ورقه‌ای و حفرات زیاد دارند. با افزودن CKD، FA و GGBFS به خاک، با انجام واکنش‌های شیمیایی شرح داده شده در بخش ۴-۲، محصولات سیمانی ایجاد شده (CSH، CAH و CASH)، فضای خالی بین ذرات را پر کرده و موجب اتصال ذرات خاک به یکدیگر می‌گردد که منجر به ایجاد ماتریس منسجم‌تری نسبت به نمونه خاک خالص خواهد شد. در تصاویر میکروسکوپی از نمونه تثبیت‌شده با FA، نقش پُرکنندگی ذرات ریز و کروی خاکسترزادی مشهود

مقایسه تأثیر پسماندهای صنعتی (غبار کوره سیمان، خاکستر بادی و سرپاره کوره آهن گدازی) بر پارامترهای تراکمی ...



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از خاک خالص و نمونه‌های تثبیت شده



شکل ۷. الگوهای XRD خاک تثبیت شده با غبار کوره سیمان (CKD)، سرباره کوره آهن‌گدازی (GGBFS) و خاکستر بادی (FA). در شکل، کلسیم سیلیکات هیدرات (CSH)، کلسیم آلومینات هیدرات (CAH) و کلسیم آلومینا سیلیکات هیدرات (CASH) نشان داده شده‌اند.

(CASH) ایجاد می‌شود که با پر شدن حفرات، موجب تسهیل در پیوند ذرات خاک می‌شوند. نتایج آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نیز ساختار متراکم‌تر و ماتریس منسجم‌تر نمونه‌های تثبیت شده را نسبت به خاک خالص نشان داد. منطبق بر نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) هر چه میزان آهک آزاد در

نسبت باریبری کالیفرنیا در خاک حاوی غبار کوره سیمان، خاکستر بادی و سرباره کوره آهن‌گدازی به ترتیب ۲۱/۷، ۱۳/۳ و ۱۵/۷ برابر خاک خالص به دست آمد. با انجام واکنش‌های پوزولانی، مواد اتصال‌دهنده مانند کلسیم سیلیکات هیدرات (CSH)، کلسیم آلومینات هیدرات (CAH) و کلسیم آلومینا سیلیکات هیدرات

تماس ماده افزودنی و آب و زمان کوبیدن نهایی مخلوط می‌باشد. افزایش زمان تأخیر به دلیل کاهش پتانسیل سیمان‌شدگی ذرات، منجر به کاهش مقاومت می‌گردد. از آنجا که حداکثر مقاومت اندازه‌گیری شده در مخلوط‌های خاک-افزودنی به میزان رطوبت بستگی دارد، کنترل میزان رطوبت در حین اجرا بسیار مهم است. در استفاده از تثبیت‌کننده‌های شیمیایی، مسائل و الزامات زیست‌محیطی نیز باید در نظر گرفته شود. به عنوان مثال، لازم است که قابلیت واکنش‌پذیری و نفوذ این مواد به آب‌های زیرزمینی بررسی گردد.

تثبیت‌کننده بیشتر باشد، مقادیر محصولات سیمانی تولید شده بیشتر خواهد بود که منجر به افزایش بیشتر مقاومت در خاک می‌گردد.

تثبیت شیمیایی خاک در محل، شامل ایجاد شیار در خاک و خرد کردن آن، پخش افزودنی شیمیایی، پخش آب، اختلاط خاک-ماده افزودنی-آب، کوبیدن و متراکم کردن خاک تثبیت‌شده و عمل آوردن آن است. از پارامترهای تأثیرگذار بر مقاومت خاک تثبیت‌شده، زمان تأخیر و میزان رطوبت است (شیرخانلو و همکاران، ۲۰۲۱؛ چم‌لینگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ محمد و همکاران، ۲۰۲۲؛ ما و همکاران ۲۰۲۳). زمان تأخیر، زمان بین اولین

۶. مراجع

- Ahmaruzzaman, M. 2010. "A review on the utilization of fly ash". *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3): 327-363.
- Al-Homidy, A. A., Abd El Aal, A. K., Nabawy, B. S. & Radwan, A. E. 2024. "Effect of adding cement kiln dust on the effective geotechnical properties of sand dunes in Najran-Sharourah, Kingdom of Saudi Arabia: a laboratory study". *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 26: 373-391.
- Al-Homidy, A. A., Dahim, M. H., & Abd El Aal, A. K. 2017. "Improvement of geotechnical properties of sabkha soil utilizing cement kiln dust". *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(4): 749-760.
- Amouzadeh Omrani, M. 2023. "Laboratory comparison of mechanical properties of emulsified cold recycled asphalt containing cement kiln dust and steel slag with recycled asphalt containing cement". *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 9(3): 57-79.
- Bagheri, A. R., Zanganeh, H. and Moalemi M. M. 2012. "Mechanical and durability properties of ternary concretes containing silica fume and low reactivity blast furnace slag". *Cement Concrete Compos.*, 34: 663-670.
- Chamling, P. K., Biswal, D. R. and Sahoo, U. C. 2021. "Effect of moulding water content on strength characteristics of a cement-stabilized granular lateritic soil". *Innovat. Infrastruct. Solut.*, 6(82).
- Çokça, E. 2001. "Use of class C fly ashes for the stabilization of an expansive soil". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 127(7): 568-573.
- Das, B., Prakash, S., Reddy, P. S. R. and Misra, V. N. 2007. "An overview of utilization of slag and sludge from steel industries". *Resour., Conserv. Recy.*, 50: 40-57.
- Dayalan, J. 2016. "Comparative study on stabilization of soil with ground granulated blast furnace slag (GGBS) and fly ash". *Int. Res. J. Eng. Tech.*, 3: 2198-2204.
- Edil, T. B., Acosta, H. A. and Benson, C. H. 2006. "Stabilizing soft fine-grained soils with fly ash". *J. Mater. Civ. Eng.*, 18(2): 283-294.
- Ehrenberg, A. 2010. "Granulated blast furnace slag state of the art and potentials for the future". The 6th European Slag Conference, Madrid.
- Eisa, M. S., Basiouny, M. E., Mohamady, A. and Mira, M. 2022. "Improving weak subgrade soil using different additives". *Mater.*, 15(13): 4462.
- Ghavami, S. and Rajabi, M. 2021. "Investigating the influence of the combination of cement kiln dust and fly ash on compaction and strength characteristics of high-plasticity clays". *J. Civ. Eng. Mater. Appl.*, 5(1): 9-16.
- Ghavami, S. and Hosseini Fani, M. 2023. "Compaction, hydraulic, and consolidation characteristics of reinforced clays with carpet waste". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 9(1): 107-118.

- Ghavami, S., Jahanbakhsh, H. and Moghadas Nejad, F. 2021. "Laboratory evaluation on the effectiveness of polypropylene fibers on the strength behavior of CKD-stabilized Soil". *Geotech. Geol.*, 17(1): 465-470.
- Ismail, H. 2013. "Cement kiln dust chemical stabilization of expansive soil exposed at El-Kawther Quarter, Sohag Region, Egypt". *Int. J. Geosci.*, 4(10): 1416-1424.
- Jahanbakhsh, H., Mobini, M., Ghavami, S. and Moghadas Nejad, F. 2020. "Investigation the effect of cement kiln dust on the mechanical properties of cement emulsified asphalt mortar containing GGBFS and fly ash for high-speed railway ballastless track". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 6(3): 47-67.
- Ma, S., Yao, Y., Bao, P. and Guo, C. 2023. "Effects of moisture content on strength and compression properties of foundation soils of cultural relics in areas flooded by the Yellow River". *Front. Mater.*, 10: 1186750.
- Mallela, J., Quintus, H. V. and Smith, K. L. 2004. "Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design". The National Lime Association.
- Muhmed, A., Mohamed, M. and Khan, A. 2022. "The impact of moisture and clay content on the unconfined compressive strength of lime treated highly reactive clays". *Geotech. Geolog. Eng.*, 40: 5869-5893.
- Mujtaba, H., Aziz, T., Farooq, K., Sivakugan, N. and Das, B. M. 2018. "Improvement in engineering properties of expansive soils using ground granulated blast furnace slag". *J. Geolog. Soc. India*, 92(3): 357-362.
- Sharma, R. K. 2017. "Laboratory study on stabilization of clayey soil with cement kiln dust and fiber". *Geotech. Geolog. Eng.*, 35(5): 2291-2302.
- Shirkhanloo, S., Najafi, M., Kaushal, V. and Rajabi, M. 2021. "A comparative study on the effect of class C and class F fly ashes on geotechnical properties of high-plasticity clay". *Civ. Eng.*, 2(4): 1009-1018.
- Taha, R., Al-Rawas, A., Al-Harthy, A. and Al-Siyabi, H. 2001. "Use of cement by-pass dust in soil stabilization". *Eng. J. Univ. Qatar*, 14: 61-76.
- Tharun, A. and Reddy, M. S. 2017. "Flexible pavement design and material characteristics". *Int. J. Magaz. Eng., Tech., Manag. Res.*, 4(3): 317-325.
- Thomas, A., Tripathi, R. K. and Yadu, L. K. 2018. "A Laboratory investigation of soil stabilization using enzyme and alkali-activated ground granulated blast-furnace slag". *Arab. J. Sci. Eng.*, 43: 5193-5202.
- Turan, C., Javadi, A. A. and Vinai, R. 2022. "Effects of class C and class F fly ash on mechanical and microstructural behavior of clay soil-A comparative study". *Mater.*, 15(5): 1845.
- Wang, D., Tawk, M., Indraratna, B., Heitor, A. and Rujikiatkamjorn, C. 2019. "A mixture of coal wash and fly ash as a pavement substructure material". *Transport. Geotech.*, 100265.
- Yadu, L. and Tripathi, R. K. 2013. "Effects of granulated blast furnace slag in the engineering behaviour of stabilized soft soil". *Proc. Eng.*, 51: 125-131.
- Zhao, G., Yan, D., Ren, G., Zhu, Z., Wu, T., Ding, S., Shi, M. and Fan, H. 2023. "Influence of ground granulated blast furnace slag on the dispersivity and mechanical property of dispersive soil". *Constr. Build. Mater.*, 409: 134036.