[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]

بهسازی خاک‌های ریزدانه منطقه آزاد اروند خرمشهر با آهک و سرباره کوره فولاد برای استفاده در خاکریزی

زهرا حسین‌زاده، ابراهیم اصغری کلجاهی، حدیثه منصوری؛
دانشگاه تبریز، دانشکدهٔ علوم زمین

تاریخ: دریافت ۹۸/۱۲/۱۷ پذیرش ۹۹/۰۴/۳۰

چکیده

خاک منطقه آزاد اروند خرمشهر ریزدانه چسبنده است و نمی‌توان در خاکریزی‌ها از آن استفاده کرد. از طرفی مصالح مناسب برای این منظور (خاک درشت دانه) در فواصل دورتری قرار دارد که استفاده از آن مستلزم صرف هزینهٔ هنگفتی است. در این راستا سعی بر بهسازی خاک منطقه با آهک و سرباره کوره فولادسازی است. در این تحقیق، بهسازی خاک ریزدانه این منطقه با افزودن آهک و سرباره بررسی شده است. بدین‌منظور بعد از نمونه‌برداری از خاک و انجام آزمایش‌های شناسایی و تراکم، مقادیر متفاوتی از سرباره (۱۰ و ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی خاک) و آهک (۲ و ٤ و ٦ درصد وزنی خاک خشک) به خاک افزوده شده و بعد از عمل آوری به مدت ۲۸ روز، با انجام آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ، تراکم، مقاومت فشاری تک‌محوری و CBR اشباع و غیراشباع، تأثیر این مواد در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی خاک بررسی شده است. طبقه بندی خاک محل بر اساس طبقه‌بندی یونیفاید، CL است و شاخص خمیری آن حدود ۲۵ درصد و مقدار یون سولفات آن بیش از ۰/۵ درصد است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزودن سرباره و آهک در مقادیر مختلف به خاک منطقه، خواص فیزیکی و مکانیکی خاک به‌طور چشم‌گیری بهبود می‌یابد، به‌طوری‌که شاخص خمیری خاک کاهش یافته و مقاومت فشاری و مقدار CBR افزایش می‌یابد. هم‌چنین در آزمایش تراکم وزن مخصوص خاک افزایش و درصد رطوبت بهینه کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر آهک بر خاک رس نسبت به سرباره زیادتر است و سرباره در مقادیر کم‌تر از ۳۵ درصد تأثیر چشم‌گیری در مقاومت فشاری خاک ندارد.

*نویسنده مسئول e-asghari@tabrizu.ac.ir

اگرچه در نتایج آزمایش‌های CBR غیراشباع در مقادیر سرباره بیش از ۲۰ درصد، افزایش چشم‌گیری در باربری دیده می‌شود. براساس پژوهش‌های قبلی، به‌دلیل وجود یون سولفات نسبتاً زیاد در خاک، استفاده از آهک به تنهایی مناسب نبوده و سرباره می‌تواند علاوه بر بهبود فیزیکی شرایط خاک، به‌صورت شیمیایی از تشکیل کانی‌های حجیم در اثر واکنش آهک با سولفات خاک (مثل کانی اترینگیت) جلوگیری کند.

واژه‌های کلیدی: منطقه آزاد اروند، بهسازی خاک، آهک، سرباره کوره فولاد، CBR

مقدمه

خاک‌های ریزدانه چسبنده مشکلات مختلفی نظیر چسبندگی، تورم، انقباض، ترک خوردگی در اثر خشک شدن، نشست زیاد تحت سربار، باربری کم، مقاومت فشاری و برشی کم و ناپایداری روی شیب‌ها ایجاد می‌کنند. این مشکلات محدودیت‌هایی را برای استفاده از این نوع خاک‌ها برای خاکریزی و یا ساخت پروژه‌های ژئوتکنیکی به‌همراه دارد [۱]. خاک‌های رسی به‌طور عمده، اگر حاوی کانی‌های متورم شونده مانند اسمکتیت و یا ایلیت باشند، ممکن است موجب بروز مشکلات و خساراتی شوند، به‌ویژه زمانی که این خاک‌ها به‌طور متوالی مرطوب و خشک می‌شوند. کاهش مقاومت برشی و ظرفیت باربری شدیدی با افزایش رطوبت در این خاک‌ها رخ می‌دهد [۲]. خواص مهندسی خاک‌های ریزدانه را می‌توان با افزودن برخی مواد بهبود داد. اخیراً بهسازی خاک‌های ریزدانه با استفاده از محصولات جانبی صنعتی (مثل سرباره و خاکستر بادی) مطرح شده که از نظر اقتصادی و حفظ محیط زیست راه حل مناسبی است [۳]. یکی از روش‌های بهسازی خاک‌های رسی، استفاده از آهک همراه با سرباره کوره ذوب آهن است. سرباره یک مادهٔ پوزولانی است که می‌توان در تثبیت خاک از آن استفاده کرد. این ماده اساساً ترکیبی از سیلیکون و آلومینیوم است و زمانی که با آهک و آب مخلوط می‌شود به‌صورت توده‌ای سخت سیمانی شده در می‌آید که می‌تواند مقاومت فشاری زیادی ایجاد کند [٤]. سربارهٔ مواد زاید کارخانجات فولادسازی است که دپوی آنها نیاز به فضای زیادی دارد. تخصیص این فضا می‌تواند هزینه‌هایی را به‌همراه داشته باشد. از طرف دیگر نبود سنگ‌دانه یا خاک درشت‌دانه در بسیاری از مناطق ایران از جمله جنوب خوزستان، پروژه‌های عمرانی را با مشکل مواجه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]

می‌کند و هزینه‌های ساخت طرح‌های عمرانی را در این مناطق افزایش می‌دهد. در صورتی که بتوان از سرباره به‌عنوان سنگدانه استفاده کرد، می‌توان صرفه جویی‌های زیادی انجام داد. این امر از نظر زیست‌محیطی نیز اهمیت به‌سزایی دارد به‌طوری‌که به حفظ منابع مصالح طبیعی (منابع شن و ماسه)، کمک می‌کند [۵]. هر سال در سرتاسر جهان مقادیر عظیمی از مواد باطله‌ای صنعتی تولید می‌شود. مقدار زیادی از مواد باطله صنعتی در سایت‌های دفن زباله دور ریخته می‌شوند. اگر به درستی بررسی شود، به‌کارگیری مقداری از این مواد در خاکریزی برای راه‌سازی مناسب است [٦]. در اثر اختلاط خاک با سرباره و آهک، ذرات خاک سفت و فلوکوله شده که به‌دنبال آن سطح کانی‌های رس کاهش یافته و در نهایت منجر به کاهش آب قابل جذب به‌وسیلهٔ کانی‌های رسی می‌شود [۷].

برای بهسازی خاک رس از دیرباز از آهک استفاده می‌شود، ولی وجود مقدار زیاد سولفات در خاک موجب می‌شود که خاک بهسازی شده با آهک دوام زیادی نداشته باشد. در صورتی که به چنین خاکی علاوه بر آهک، مقداری مواد دیگر مثل سرباره کوره فولاد افزوده شود، علاوه بر خنثی کردن اثر سولفات، می‌تواند موجب افزایش بیش از پیش مقاومت و ظرفیت باربری خاک شود. آهک اصولاً برای تثبیت خاک‌های ریزدانه با شاخص خمیری (PI) بزرگ‌تر از ۱۰ درصد مناسب است. تجربه نشان داده است خاک‌هایی که pH آنها کم‌تر از ۷ است و یا حاوی مقدار بیش از یک درصد مواد آلی هستند و هم‌چنین دارای بیش از ۰/۵ درصد سولفات قابل حل در خاک باشند، واکنش خوبی با آهک ندارند [۸].

وجود سولفات در خاک اصلاح شده با آهک سبب تشکیل بلورهای اترینگیت (هیدروکسید سولفات آلومینیوم کلسیم آبدار) و ترکیب کلوئیدی C-A-S-S-H و رشد آنها بر روی صفحات رس و در نتیجه افزایش تورم خاک می‌شود. حضور سرباره و آب‌گیری آن در چنین شرایطی سبب تشکیل ژل C-S-H و اترینگیت می‌شود. بنابراین سولفات کلسیم بر اثر تشکیل اترینگیت به‌سرعت مصرف می‌شود. در این حالت بلورهای اترینگیت تشکیل شده به جای نشستن روی ذرات رس و افزایش درصد تورم خاک، روی ذرات سرباره تمرکز و رشد می‌کنند [۹].

طبق نظر مکارچیان و نادری [۱۰] اضافه کردن سرباره به خاک رس تثبیت شده با آهک،

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]

هنگامی که سولفات در محیط وجود دارد، می‌تواند باعث کاهش اثرات نامطلوب سولفات شده و مقاومت خاک را افزایش دهد. البته وجود رطوبت کافی برای تکمیل واکنش هیدراتاسیون سرباره و واکنش پوزولانی خاک و آهک، امری ضروری است، زیرا در غیر این صورت، وجود سرباره می‌تواند نتیجه عکس داشته و سبب کاهش مقاومت شود. هم‌چنین در صورت استفاده از سرباره و وجود رطوبت کافی برای تکمیل این واکنش‌ها، وجود سولفات نه تنها مضر نیست، بلکه باعث افزایش مقاومت می‌شود. بنابراین توجه به‌وجود رطوبت کافی در محیط در هنگام بهسازی خاک لازم است. استفاده هم زمان از آهک و سرباره موجب می‌شود تا اختلاف بین مقاومت خشک و اشباع به‌طور چشم‌گیری کاهش یابد. شاخص خمیری خاک در تورم نمونه‌ها تأثیرگذار است، به‌طوری‌که با کاهش شاخص خمیری نمونه‌های تثبیت شده، از میزان تورم نمونه‌ها به‌شدت کاسته می‌شود. طولانی شدن زمان عمل‌آوری نیز باعث تأثیر بیش‌تر مصالح تثبیت‌کننده در اصلاح خواص کائولینیت شده است [۱۱].

شالابی[1] و همکاران [۲]، با انجام آزمایش به این نتیجه رسیدند که افزایش مقدار سرباره، موجب کاهش خاصیت خمیری، پتانسیل تورم و چسبندگی ذرات خاک شده و زاویهٔ اصطکاک داخلی را افزایش می‌دهد. هم‌چنین مقدار CBR با افزایش سرباره به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. طبق نظر اکینومی[2] [۱۲] اصلاح مقاومت خاک با افزودن ۸ درصد سرباره به خاک انجام می‌شود. افزودن ۸ درصد سرباره به خاک باعث افزایش ٤٠ درصدی CBR و رسیدن مقاومت فشاری محصور نشده به ٦٦/٧ کیلونیوتن بر مترمربع می‌شود. این در حالی است که حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری به‌ترتیب ٦/٣، ٤/٠ و ٢/٣ درصد کاهش می‌یابند. تبادل کاتیونی بین خاک و سرباره به‌عنوان عامل اصلی بهبود خواص مهندسی خاک در اثر افزودن سرباره در نظر گرفته شده است. وی هم‌چنین نشان داد که افزودن سرباره فولاد به خاک‌های لاتریتی، حدود اتربرگ و درصد رطوبت بهینه را کاهش و وزن مخصوص خشک خاک را افزایش می‌دهد. آنها هم‌چنین نشان دادند که مقدار CBR اشباع و

1. Shalabi
2. Akinwumi

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]

غیراشباع، مقاومت فشاری تک‌محوری و نفوذپذیری خاک با افزایش درصد سرباره افزایش می‌یابد.

بیلگن[1] و کاواک[2] [۱۳]، بهسازی مصالح خاکریزی را با استفاده از آهک و سرباره بررسی کردند. نتایج آزمایش‌های آنها نشان می‌دهد که مقدار CBR مخلوط سرباره و آهک و رس پس از ۲۸ روز عمل‌آوری نمونه‌ها، تا ٤٦ برابر بیش‌تر شده است. آنها هم‌چنین نشان دادند که مقاومت فشاری محصور نشده برای نمونه مخلوط رس، سرباره و آهک در مقایسه با نمونه رس- آهک بیش‌تر است. در پژوهش گناوالا[3] و همکاران [۷]، افزودن مقداری سرباره و آهک، ضمن کاهش حد روانی و افزایش حد خمیری، شاخص خمیری خاک کاهش می‌یابد.

در منطقهٔ آزاد اروند در شمال خرمشهر، چندین پروژه بزرگ در حال احداث است که برای خاکریزی محوطه و احداث جاده‌های داخلی با کمبود مصالح مناسب خاکریزی مواجه هستند. خاک‌های منطقه عموماً ریزدانه است و مناسب برای این منظور نیست. روش رایج برای زیرسازی جاده‌ها، استفاده از خاک‌های درشت دانه و مخلوط است ولی فاصله چنین منابعی تا منطقه آزاد اروند خیلی زیاد است و هزینه‌های سنگینی در بر دارد. شایان ذکر است که در پروژهٔ مجتمع فولاد جهان آرا اروند در سال ۱۳۹۷ به‌صورت محدود از آهک و سرباره فولاد خوزستان برای بهسازی خاک محل استفاده شده است.

در این مقاله هدف بررسی بهسازی خاک ریزدانه منطقه آزاد اروند با آهک و سرباره است تا بتوان در خاکریزی‌ها و محوطه سازی‌ها استفاده کرد.

مواد و روش‌ها

در تحقیق حاضر پس از بازدیدهای صحرایی منطقه، از خاک‌های ریزدانه منطقه آزاد اروند نمونه برداری شده است. در این راستا نمونه‌برداری از پنج نقطه در محدودهٔ مجتمع فولاد جهان آرا انجام شده و سپس نمونه‌ها مخلوط شده و یک نمونه معدل به‌عنوان خاک پایه برای آزمایش‌های بهسازی خاک استفاده شده است. سرباره‌ای که در این تحقیق استفاده

1. Bilgen
2. Kavak
3. Gonawala et al.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]

شده است، از سرباره کارخانه فولاد خوزستان (اهواز) است. اندازهٔ ذرات سرباره متفاوت است و در این تحقیق سرباره استفاده شده عبوری الک شمارهٔ ٤ (معادل ٤/٧٥ میلی‌متر) بوده است. هم‌چنین از آهک شکفته کارخانه هفتکل خوزستان استفاده شده است.

در مرحلهٔ اول آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی جهت شناسایی خصوصیات خاک پایه در آزمایشگاه انجام شده و در مرحله دوم، خاک پایه طبق جدول ۱ با مقادیر مختلف آهک شکفته و سرباره مخلوط شده و پس از عمل‌آوری به‌مدت ۲۸ روز، با انجام آزمایش‌های تعیین تعیین حدود اتربرگ (ASTM D4318) [١٤]، آزمایش تراکم (ASTM D698) [١٥]، آزمایش تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری (ASTM D2166) [١٦] و آزمایش ظرفیت باربری کالیفرنیا یا CBR (ASTM D1883) [١٧]، مقاومت و رفتار خاک پس از بهسازی بررسی شده است.

جدول ۱. برنامه اختلاط خاک با سرباره و آهک برای بررسی بهسازی خاک

مقدار سرباره ٪	مقدار آهک ٪	مقدار خاک محل ٪
۱۰	۲	۸۸
	٤	۸٦
	٦	۸٤
۲۰	۲	۷۸
	٤	۷٦
	٦	۷٤
۳۰	۲	٦۸
	٤	٦٦
	٦	٦۸

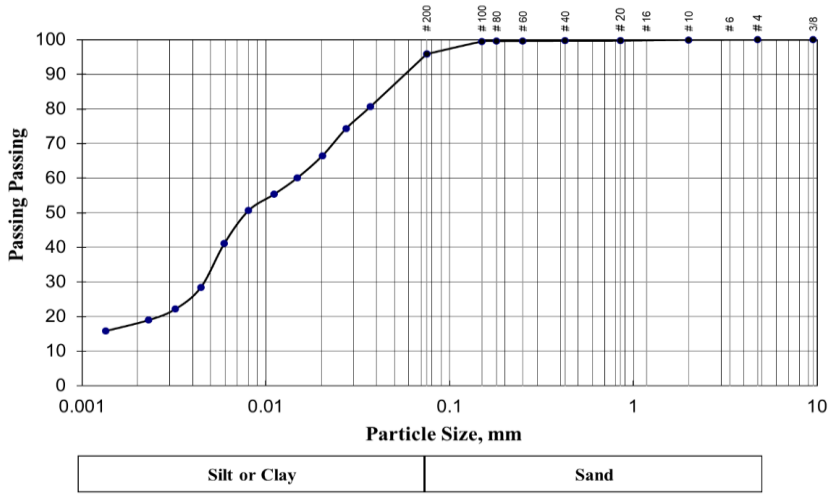
نتایج

ابتدا نتایج آزمایش‌های انجام شده روی خاک پایه و مصالح و سپس نتایج آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های بهسازی شده با آهک و سرباره ارائه شده است.

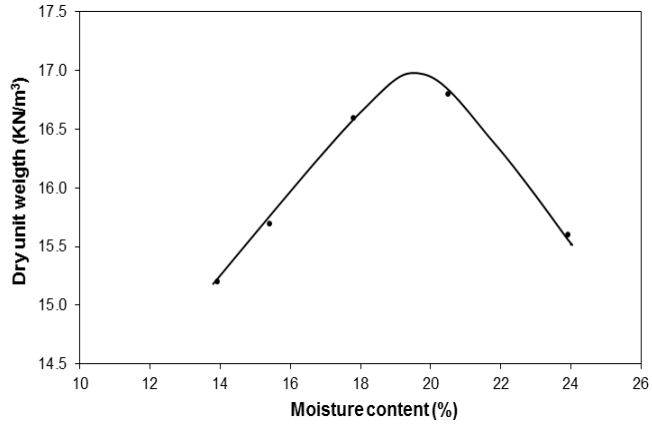
۱. مشخصات خاک پایه و مصالح

خاک پایهٔ استفاده شده بیش از ۹۵ درصد مواد ریزدانه داشته و شاخص خمیری (PI) آن حدود ۲۵ درصد است. این خاک بر اساس طبقه‌بندی یونیفاید CL و بر اساس طبقه‌بندی

آشتو A-7 است. در شکل ۱ نمودار دانه‌بندی خاک پایه نشان داده شده است. مقدار چگالی ویژه ذرات جامد خاک (Gs) ۲/٦٤ و مقدار مواد حل شونده موجود در خاک ۹/٦ درصد است. شکل ۲ نتایج آزمایش تراکم به‌روش استاندارد (پروکتور) را نشان می‌دهد. مقدار رطوبت بهینه این خاک ۱۹/۲ درصد و وزن مخصوص خشک حداکثر آن ۱۷/۰ کیلونیوتن بر متر مکعب است.



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی خاک پایه



شکل ۲. نمودار تراکم خاک پایه به‌روش تراکم استاندارد یا پروکتور (ASTM D698)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]

خاک محل مقدار یون سولفات قابل حل نسبتاً زیادی دارد و بر اساس آزمایش‌های انجام شده مقدار آن بین ۰/۵ تا بیش از ٤ درصد اندازه‌گیری شده است [۱۸].

سرباره کارخانه فولاد اهواز دارای دانه‌بندی متفاوتی است و از حالت دانه‌ریز تا قطعاتی تا اندازهٔ ۳۰ سانتی‌متر دیده می‌شود. در شکل ۳ تصویری از سرباره و آهک شکفته استفاده شده نشان داده شده است. آزمایش سایش لس آنجلس (به‌روش A) بر ذرات سرباره درشت به‌منظور تعیین مقاومت ذرات انجام شده که میزان افت وزنی (سایش) بعد از ۱۰۰ دور حدود ٤ درصد و بعد از ۵۰۰ دور حدود ۱۷ درصد است که نشان‌گر مقاوم بودن ذرات سرباره است. سرباره استفاده شده در این تحقیق از الک شمارهٔ ٤ عبور داده شده است (شکل ۳).

شکل ۳. تصاویری از سرباره کارخانهٔ فولاد خوزستان (عکس بالا) و آهک هفتکل (عکس پایین) استفاده شده

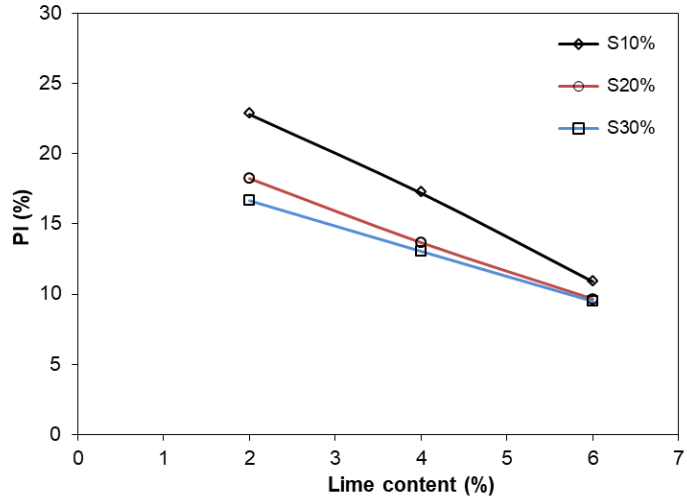
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]

۲. نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ خاک بهسازی شده

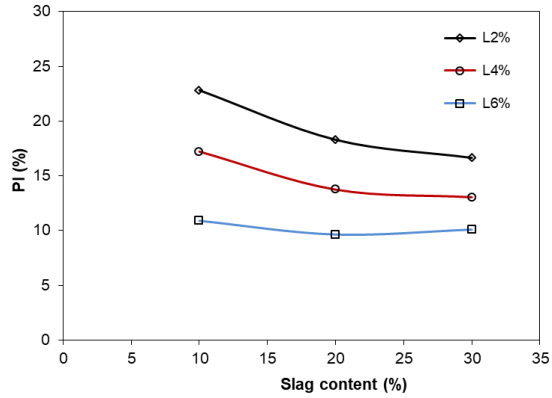
برای بررسی تأثیر آهک و سرباره بر حدود اتربرگ خاک، نمونه‌هایی با مقادیر آهک و سرباره مندرج در جدول ۱ تحت رطوبت بهینه ساخته شده و به‌مدت ۲۸ روز برای عمل‌آوری در داخل کیسه پلاستیکی نگه‌داری شده و سپس آزمایش شده است. شایان ذکر است که اختلاط خاک با سرباره و آهک در حالت خشک انجام شده و بعد از اطمینان از اختلاط همگن، رطوبت لازم افزوده شده و دوباره کامل به‌هم زده شد تا مخلوط یکنواختی ایجاد شود. برای اطمینان، هر آزمایش دو بار انجام شده و نتایج میانگین استفاده شده است. تأثیر آهک بر شاخص خمیری خاک (PI) با مقادیر مختلف سرباره در شکل ٤ آورده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد آهک میزان PI خاک کاهش می‌یابد.

هم‌چنین در شکل ۵ نحوهٔ تأثیر سرباره بر شاخص خمیری خاک نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که همانند تأثیر آهک، با افزایش مقدار سرباره، میزان PI خاک کاهش یافته و تغییرات پس از ۲۰٪ سرباره اندک است.



شکل ٤. تأثیر آهک بر شاخص خمیری نمونه‌های بهسازی شده با مقادیر مختلف سرباره

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]



شکل ۵. تأثیر سرباره بر شاخص خمیری نمونه‌های بهسازی شده با مقادیر مختلف آهک

۳. نتایج آزمایش‌های تراکم خاک بهسازی شده

آزمایش تراکم به‌روش استاندارد روی نمونه خاک پایه با مقادیر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد سرباره انجام شده که نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های تراکم به‌روش استاندارد خاک پایه مخلوط با سرباره

مخلوط	وزن مخصوص خشک حداکثر (kN/m^3)	درصد رطوبت بهینه
۹۰% خاک + ۱۰% سرباره	۱۷/۲	۱۸/۹
۸۰% خاک + ۲۰% سرباره	۱۷/۸	۱۷/۱
۷۰% خاک + ۳۰% سرباره	۱۹/۷	۱٤/۵

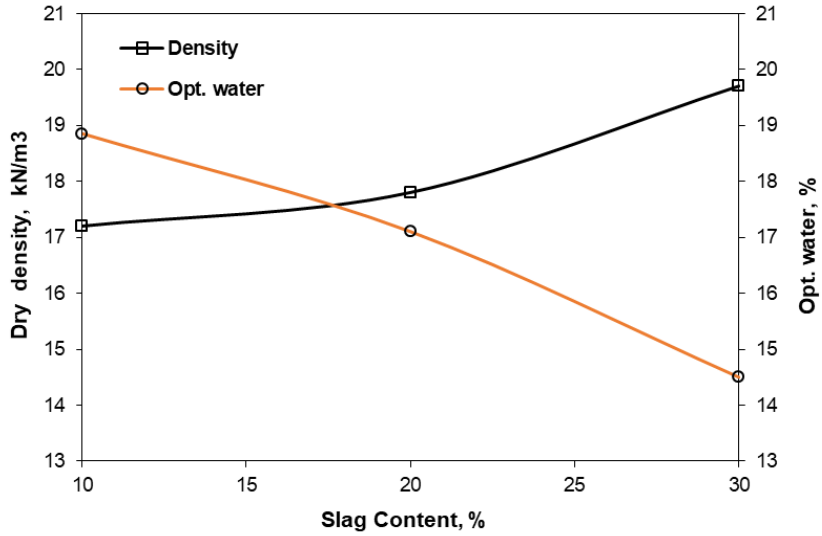
چنان‌که در شکل ٦ دیده می‌شود با افزایش مقدار سرباره، مقدار دانسیتهٔ خشک خاک افزایش یافته و درصد رطوبت بهینه خاک کاهش می‌یابد. این تغییرها حاکی از بهبود نسبی کیفیت خاک محل است.

٤. نتایج آزمایش‌های مقاومت تک‌محوری نمونه‌های بهسازی شده

برای بررسی اثرات بهسازی آهک و سرباره، خاک پایه با مقادیر تعیین شده سرباره و آهک مخلوط شده و سپس نمونه‌سازی شده و عمل‌آوری شده است. برای ساخت نمونه از قالب فلزی دو تکه به قطر ۵ سانتی‌متر و به ارتفاع ۱۰ سانتی متر استفاده شد. بدین منظور مخلوط خاک و مواد افزودنی با رطوبت بهینه و در ۵ لایه در قالب ریخته شده و هر لایه با ۵

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]

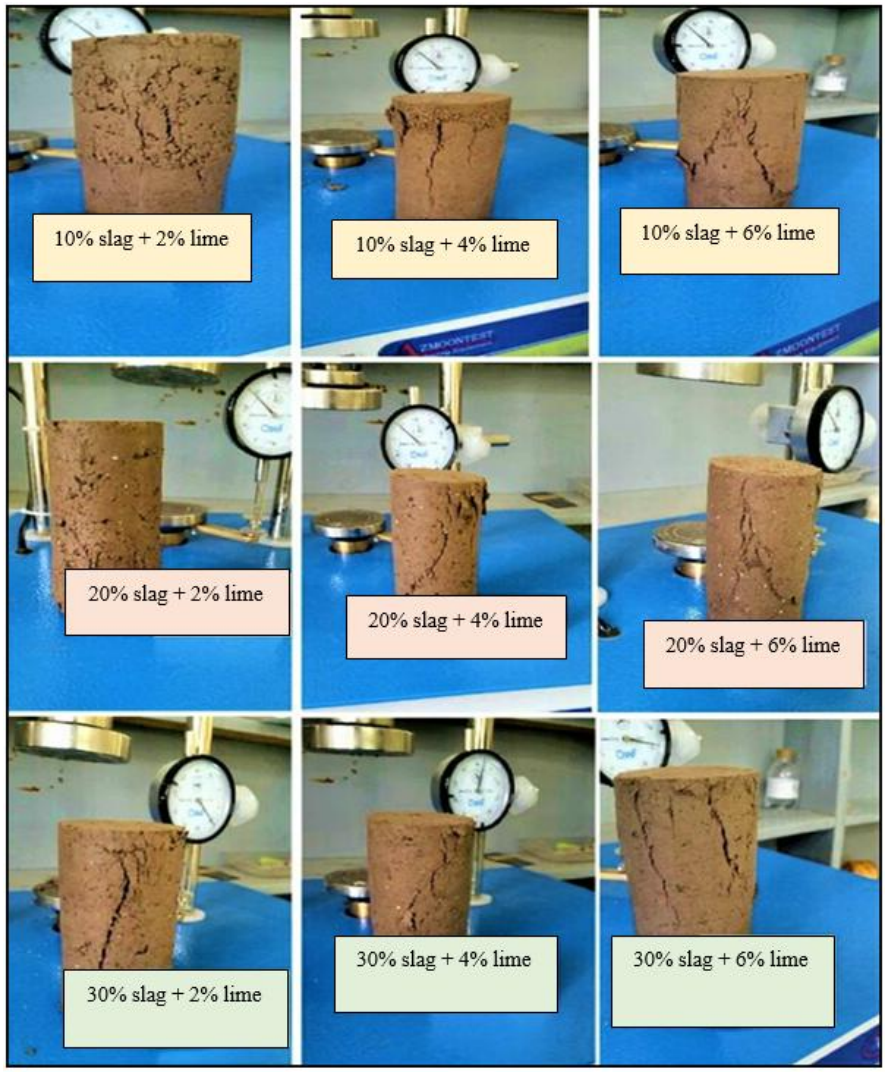
تا ٦ ضربه با یک کوبه استوانه‌ای شکل نیم کیلویی متراکم شد. این تعداد ضربه با سعی و خطا حاصل شده بود به‌نحوی که با این تعداد ضربه دانسیته نمونه به‌مقدار مورد نظر می‌رسید. نمونه‌ها بعد از یک روز از داخل قالب دو تکه خارج شده به‌مدت ۲۸ روز در داخل پلاستیک مقاوم کاملاً مسدود، در جایی مرطوب نگه‌داری شدند تا با رطوبت بهینه عمل آوری شوند. شایان ذکر است که برای اطمینان از نتایج، هر آزمایش دو بار تکرار شده و نتیجه به‌صورت میانگین این آزمایش‌ها در نظر گرفته شده است. در شکل ۷ تصویری از نمونه‌های آزمایش‌های تک‌محوری فشاری نشان داده شده است.



شکل ٦. نمودار تغییر دانسیته خشک و رطوبت بهینه خاک در آزمایش تراکم به‌روش استاندارد

هم‌چنین برای بررسی تأثیر سرباره و آهک به تنهایی، تعداد سه نمونه با مقادیر سرباره ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد به‌ترتیب با علامت‌های S10، S20 و S30 و تعداد سه نمونه با مقادیر آهک ۲، ٤ و ٦ درصد به‌ترتیب با علامت‌های L2، L4 و L6 ساخته شده و به‌مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شدند. شکل ۸ تأثیر مقادیر مختلف آهک را بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک نشان می‌دهد که گویای آن است که با افزایش مقدار آهک، مقاومت تک‌محوری فشاری خاک افزایش می‌یابد. در شکل ۹ نیز تأثیر مقادیر مختلف سرباره بر مقاومت فشاری

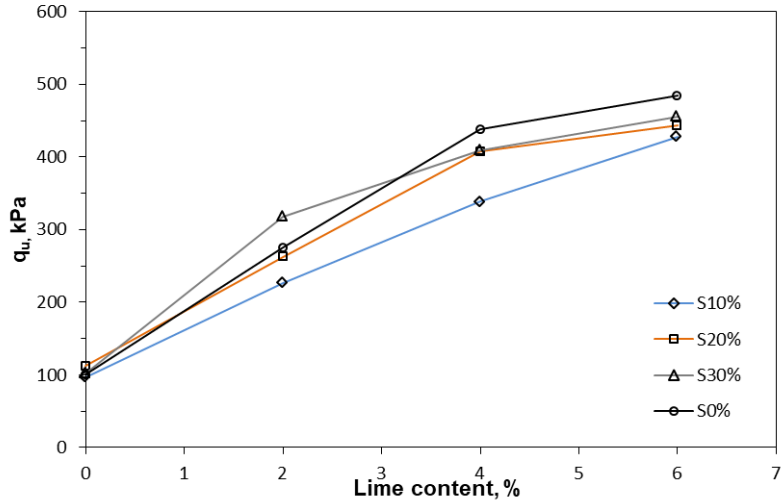
تک‌محوری خاک نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار سرباره، افزایش چندانی در مقاومت فشاری خاک دیده نمی‌شود.



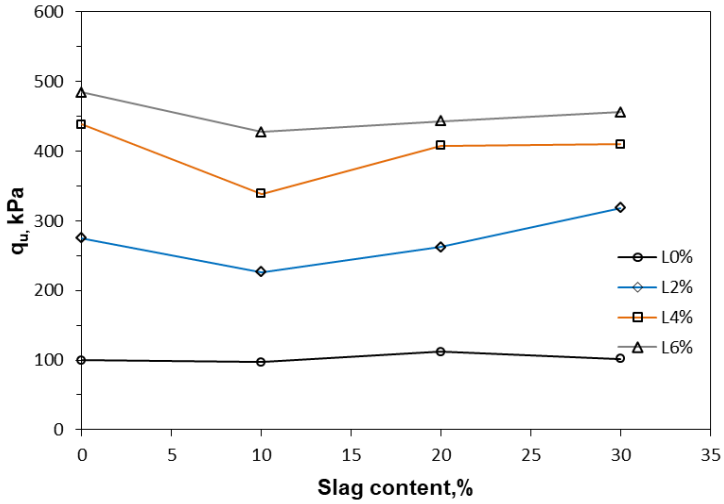
شکل ۷. تصاویری از نمونه‌های آزمایش تک‌محوری خاک بهسازی شده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]



شکل ۸. اثر مقادیر مختلف آهک بر مقاومت فشاری نمونه‌های بهسازی شده با مقادیر مختلف سرباره



شکل ۹. اثر مقادیر مختلف سرباره بر مقاومت فشاری نمونه‌های بهسازی شده با مقادیر مختلف آهک

در شکل ۱۰ نمودار تنش- کرنش تاثیر آهک بر نمونه‌های بهسازی شده با مقادیر مختلف سرباره و در شکل ۱۱ نمودار تنش- کرنش تاثیر سرباره بر نمونه‌های بهسازی شده با مقادیر

متفاوت آهک ارائه شده است. چنانکه دیده می‌شود، منحنی مربوط به سرباره با آهک صفر درصد تقریباً مماس بر منحنی تنش- کرنش خاک خالص است. هم‌چنین با افزودن آهک به نمونه‌های ساخته شده با مقادیر متفاوت سرباره، آهک به تنهایی توانسته میزان مقاومت خاک را به‌مقدار چشم‌گیری افزایش دهد. این نکته بیان‌گر تأثیر زیاد آهک نسبت به سرباره بر مقاومت تک محوری خاک است.

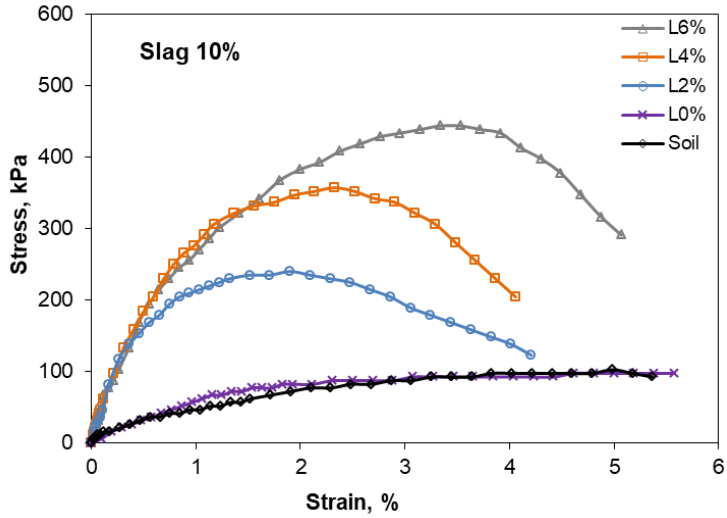
۵. نتایج آزمایش‌های CBR

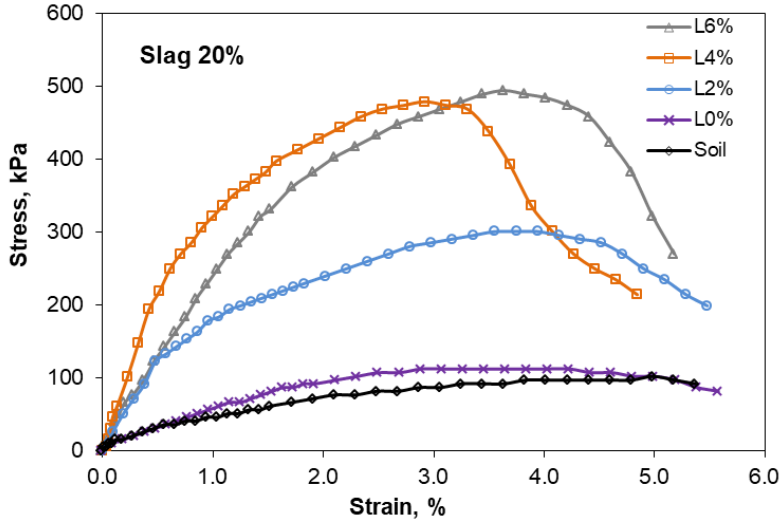
آزمایش CBR یا تعیین ظرفیت باربری کالیفرنیا روی نمونه‌های بهسازی شده در حالت رطوبت بهینه و اشباع با مقادیر مختلف آهک و سرباره انجام شده است. برای ساخت نمونه، مخلوط خاک با سرباره و آهک در ۵ لایه در قالب CBR ریخته شده و سپس مطابق ASTM D1883 نمونه سازی شد. در مواردی که نمونه آهک داشته، ۷ روز نگه‌داری شده و در سایر موارد مطابق استاندارد، نمونه‌های حالت غیراشباع بلافاصله بعد از ساخت نمونه و نمونه‌های حالت اشباع بعد از ٤ روز نگه‌داری در حوضچهٔ آب، آزمایش شده‌اند. شایان ذکر است که همه نمونه‌ها با وزن مخصوص خشک حداکثر ساخته شده و آزمایش شده‌اند.

به‌منظور تعیین مقدار سرباره و آهک مناسب، نمودار تغییرات CBR بر اساس درصد سرباره در حالت اشباع و غیراشباع در شکل ۱۲ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار آهک و سرباره، مقدار CBR افزایش می‌یابد. بر اساس شکل ۱۲ الف دیده می‌شود که سرباره به‌تنهایی حتی در مقادیر ۳۰ درصد نیز نمی‌تواند در مقدار CBR اشباع افزایش چشم‌گیری ایجاد کند، ولی با افزودن آهک باربری خاک افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند. با توجه به نمودار شکل ۱۲ ب دیده می‌شود که هرگاه مقدار سرباره از ۲۰ درصد فراتر رود، مقدار CBR در حالت رطوبت بهینه، افزایش ناگهانی پیدا می‌کند. هم‌چنین تورم نمونه‌ها در اثر اشباع شدن نمونه‌های CBR اندازه‌گیری شده و نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که تأثیر سرباره در کاهش مقدار تورم چشم‌گیر نیست ولی تأثیر آهک زیاد است. با افزودن آهک، مقدار تورم خاک از حدود ۲ درصد به کم‌تر از ۰/۵ درصد کاهش می‌یابد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

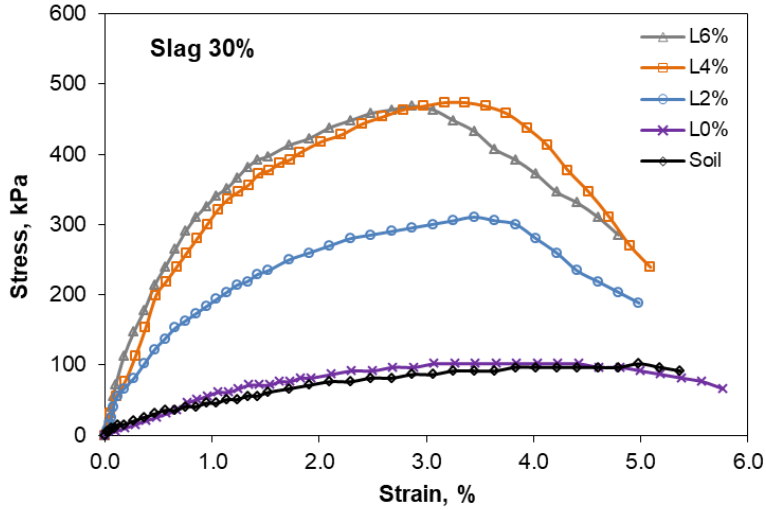




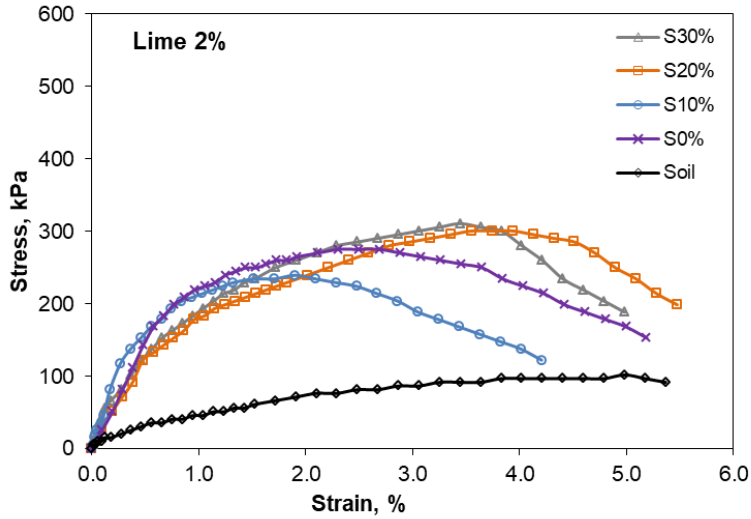
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]

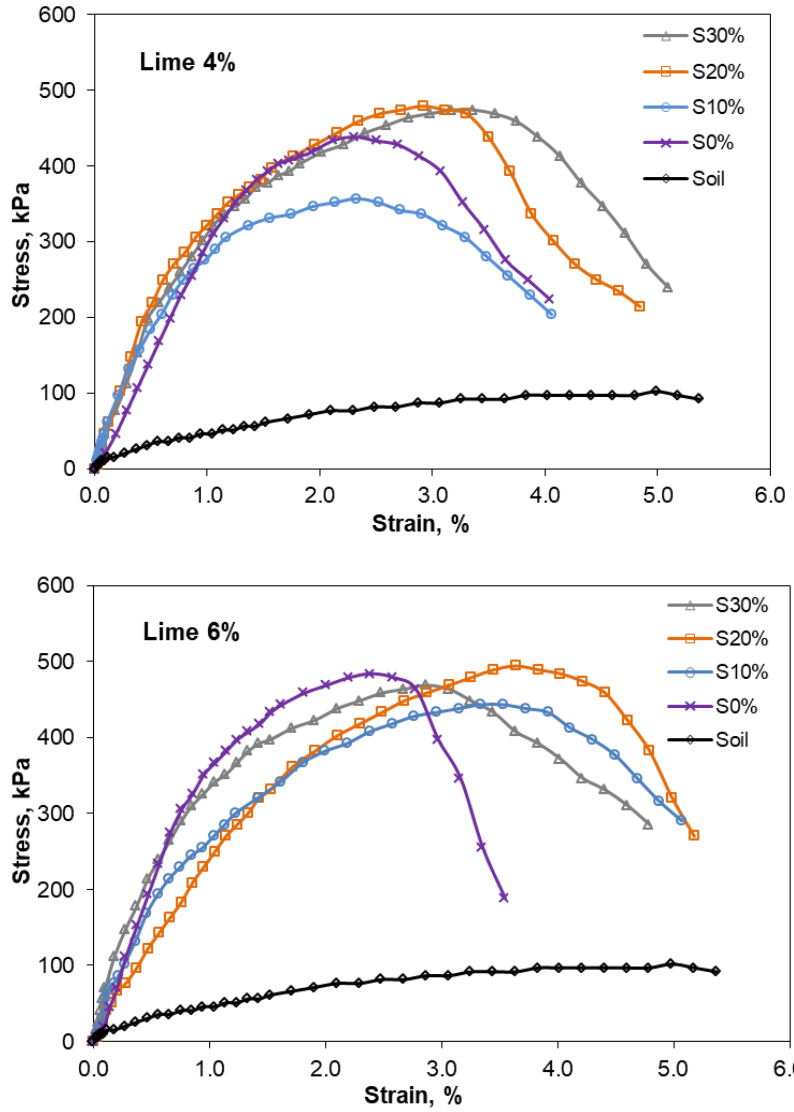
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]



شکل ۱۰. تاثیر مقادیر مختلف آهک بر نمودار تنش- کرنش نمونه‌های بهسازی شده با سرباره



[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]

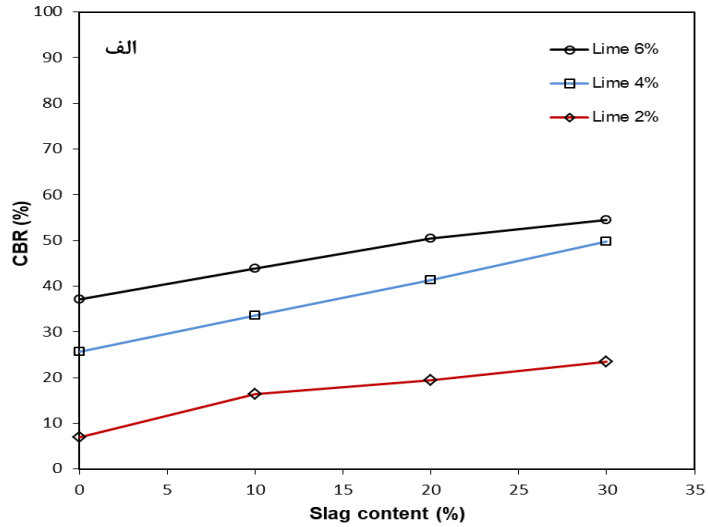


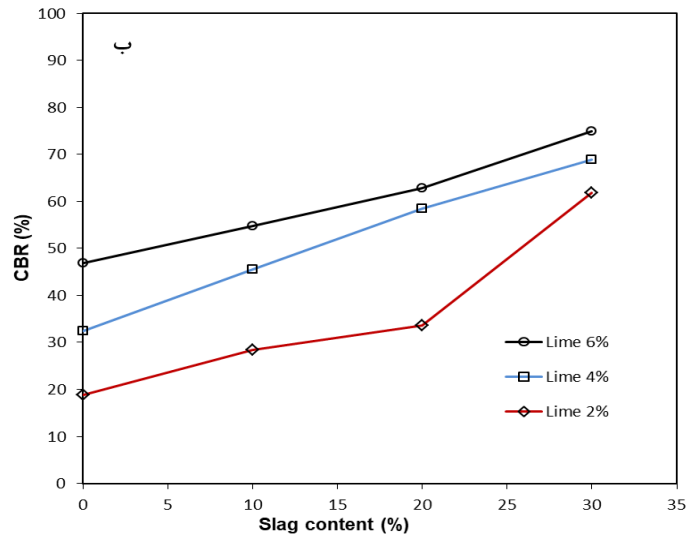
شکل ۱۱. تاثیر مقادیر مختلف سرباره بر نمودار تنش- کرنش نمونه‌های بهسازی شده با آهک

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]





شکل ۱۲. تأثیر مقادیر مختلف سرباره بر CBR نمونه‌های بهسازی شده با مقادیر مختلف آهک الف) شرایط اشباع، ب) شرایط غیراشباع (رطوبت بهینه)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های CBR اختلاط‌های مختلف خاک، سرباره و آهک

مخلوط	درصد آهک	درصد CBR اشباع	درصد CBR غیراشباع	درصد تورم
خاک پایه	۰	۷	۱۹	۱/٦
۹۰% خاک + ۱۰% سرباره	۲	۱٦	۲۸	۱/۰
	٤	۳۳	٤٦	۰/۲
	٦	٤٤	٥٥	۰/۲
۸۰% خاک + ۲۰% سرباره	۲	۲۰	۳٤	۰/۸
	٤	٤۱	٥۸	۰/٤
	٦	٥۱	٦۳	۰/٤
۷۰% خاک + ۳۰% سرباره	۲	۲٤	٦۲	۱/۹
	٤	٥۰	٦۹	۰/٥
	٦	٥٥	۷٥	۰/٥

بحث

در این پژوهش اثر آهک و سرباره بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک ریزدانه چسبنده منطقه آزاد اروند بررسی شده است. نتایج نشان داد که این مواد افزودنی در بهبود مشخصات خاک مؤثر هستند، به‌طوری‌که با اضافه شدن آهک شاخص خمیری و رطوبت بهینه خاک کاهش یافته و وزن مخصوص حداکثر، مقاومت فشاری تک‌محوری و CBR خاک افزایش می‌یابد. طبق پژوهش‌های الدیکی[1] و الحاتمله[2] [۲۰] کاهش خاصیت خمیری خاک در نتیجه افزودن سرباره می‌تواند در نتیجه افزایش ذراتی با اندازه سیلت و ماسه در خاک باشد. علت کاهش خاصیت خمیری در نتیجه افزودن آهک به خاک نیز می‌تواند در اثر جای‌گزین شدن کاتیون‌های کم ظرفیت موجود در خاک با کاتیون‌های Ca^{+2} و Mg^{+2} موجود در آهک و در نتیجه کاهش ضخامت لایه دوگانه رس‌ها باشد [۲۱]. علاوه بر این تبادلات کاتیونی، تشکیل برخی از ترکیبات سیمانی شبیه به ژل C-A-S-H و هیدرات آلومینیوم کلسیم بلورین نیز سبب اتصال ذرات رس به یک‌دیگر و در نتیجه افزایش مقاومت خاک در برابر تورم می‌شود [۹].

1. Aldeeky
2. Al-Hattamleh

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]

سرباره در مقایسه با آهک، مقاومت خاک را کم‌تر افزایش داده است. شاید دلیل مشاهده تأثیر کم سرباره را بتوان در اندازهٔ نمونه و بافت ایجاد شده در خاک دارای سرباره جستجو کرد. بر اساس طبقه‌بندی آشتو [۲۲]، هر خاکی که بیش از ۳۵ درصد مواد ریزدانه داشته باشد، خاک ریزدانه طبقه‌بندی شده و به‌عبارت دیگر ذرات درشت خاک حالت شناور داشته و رفتار خاک تحت کنترل مواد ریزدانه (ماتریکس) است. در نمونه‌های آزمایش شده نیز مقدار مواد ریزدانه بیش از ۳۵ درصد است از این‌رو، سرباره نتوانسته تأثیری چشم‌گیری در مقاومت خاک ایجاد کند. به احتمال زیاد در مقادیر سرباره زیاد بافت خاک از حالت شناور به حالت اتکا مستقیم ذرات درشت درآمده و اثر سرباره بیش‌تر پدیدار می‌شود. شایان ذکر است که اثر سرباره در بهبود وضعیت خاک هم فیزیکی است و هم شیمیایی و این بحث در خصوص تأثیرات فیزیکی سرباره مد نظر است.

بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده، بدون توجه به اثر شیمیایی سرباره بر خاک، مقدار سرباره لازم برای بهبود قابل توجه خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک بالای ۳۵ درصد است. هم‌چنین مقدار مناسب آهک از آزمایش‌های انجام شده ٤ درصد به‌دست آمده است. افزودن ٤ درصد آهک سبب شد که شاخص خمیری خاک از ۲۵ درصد به حدود ۱۳ درصد، مقاومت تک‌محوری از ۱۰۰ کیلوپاسکال به ٤۰۸ کیلوپاسکال و CBR اشباع از ۷ درصد به ٤۱ درصد و CBR غیراشباع از ۱۹ به ۵۸ درصد برسد. براساس آئین‌نامهٔ راه‌سازی ایران [۲۳]، از نتایج آزمایش CBR می‌توان نتیجه گرفت که خاک اصلاح شده با ٤ درصد آهک و ۳۵ درصد سرباره که مقدار بهینه در این تحقیق در نظر گرفته شده است، برای لایه زیراساس و لایه سابگرید مناسب است.

نتایج به‌دست آمده با بررسی‌های محققان دیگر مطابقت خوبی دارد. به‌طور مثال لی[1] و همکاران [٢٤] آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری را بر خاک متورم‌شونده که با آهک و خاکستر بهسازی شده بود، انجام داده و با افزودن ۰ و ۵ درصد آهک به مخلوط خاک با خاکستر در دو دوره ۷ و ۲۸ روزه عمل‌آوری کرده و آزمایش کردند و مشاهده کردند که در مقدار آهک صفر میزان مقاومت با افزایش خاکستر تغییری نمی‌کند ولی با افزودن آهک میزان

1. Le

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]

مقاومت افزایش یافته و حتی با گذشت زمان عمل‌آوری این افزایش بیش‌تر می‌شود. مقدار CBR اشباع خاک در بررسی مجتبی[1] [۲۵] با افزودن۵۰ درصد سرباره به ۱۱/۵ درصد و در پژوهش شالابی[2] و همکاران [۲] با افزودن ۳۰ درصد سرباره، به ٦ درصد رسیده است. حال آن‌که در پژوهش حاضر در مقدار سرباره ۳۰٪ به‌همراه ۲، ٤ و ٦ درصد آهک، مقدار CBR اشباع خاک به‌ترتیب ٢٤، ۵۰ و ۵۵ درصد شده است. این امر تأثیر چشم‌گیر آهک در تغییر خصوصیات مهندسی خاک را نشان می‌دهد.

خلاصه تجربه بهسازی خاک منطقه در محل

هم‌زمان با این تحقیق آزمایشگاهی، برای تثبیت بستر و آماده‌سازی حدود ۷ هکتار از محوطه مجتمع فولاد جهان آرا اروند، از آهک و سرباره کوره فولاد استفاده شده است. در شکل ۱۳ تصاویری از عملیات بهسازی خاک و اختلاط خاک با سرباره و آهک نشان داده شده است. در این پروژه با افزودن ٤ درصد آهک و ۲۵ درصد وزنی سرباره و اختلاط با خاک محل، خاکریزی در لایه‌های ۱۵ سانتی‌متر انجام شده و آزمایش‌های تعیین دانسیته درجا و CBR صحرایی انجام شده است. طبق مشخصات پروژه عدد CBR اشباع و غیراشباع لایه‌های خاکریزی بعد از غلتک زنی و عمل آوری باید به‌ترتیب ۱۰ و ۲۰ درصد می‌بود که با بهسازی خاک و تثبیت بستر به‌روش مذکور به بیش از این مقادیر رسید.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق بهسازی خاک‌های ریزدانه چسبنده منطقه آزاد اروند خرمشهر با افزودن مقادیر مختلف آهک و سرباره کوره فولاد بررسی شده است. مهم‌ترین نتایج حاصل از تحقیق بدین‌شرح است:

-خاک منطقه آزاد اروند خرمشهر بالای ۹۵ درصد ریزدانه داشته و بر اساس طبقه‌بندی یونیفاید CL و براساس طبقه‌بندی آشتو A-7 است. شاخص خمیری خاک این منطقه حدود ۲۵ درصد، مقدار چگالی ویژه ذرات جامد ۲/٦٤، در آزمایش تراکم به‌روش استاندارد

1. Mujtaba
2. Shalabi

شکل ۱۳. تصاویری از عملیات بهسازی خاک با آهک و سرباره در مجتمع فولاد جهان آرا اروند

- مقدار رطوبت بهینه ۱۹/۲ درصد و مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر ۱۷ کیلونیوتن بر متر مکعب و میزان مقاومت فشاری تک‌محوری خاک محل در وزن مخصوص حداکثر، حدود ۱۰۰ کیلوپاسکال است. خاک محل مقدار یون سولفات قابل حل نسبتاً زیادی دارد و مقدار آن بین ۰/۵ تا بیش از ٤ درصد اندازه‌گیری شده است.
- نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزودن مقداری آهک و سرباره به خاک، شاخص خمیری خاک کاهش می‌یابد، البته تأثیر آهک در این فرایند چشم‌گیرتر است.
- نتایج آزمایش‌های تراکم با مقادیر مختلف سرباره، نشان داد که با افزایش مقدار سرباره، مقدار رطوبت بهینه خاک کاهش و مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر افزایش می‌یابد.
- با افزایش مقدار سرباره تا حد ۳۰ درصد به خاک در غیاب آهک، تأثیری در مقاومت تک‌محوری خاک دیده نمی‌شود، ولی با افزایش آهک مقدار مقاومت فشاری به‌صورت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]

[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]

چشم‌گیری افزایش می‌یابد.

- نتایج آزمایش CBR گویای آن است که سرباره به تنهایی حتی در مقدار ۳۰ درصد نیز نمی‌تواند مقدار CBR اشباع خاک را افزایش چشم‌گیری دهد، اگر چه در آزمایش‌های CBR در حالت غیر اشباع، سرباره بیش از ۲۰ درصد تأثیر قابل توجهی دارد. شایان ذکر است که با افزودن آهک، مقدار CBR خاک افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند.
- اندازه‌گیری تورم نمونه‌های CBR در اثر اشباع شدن نشان داده که تأثیر سرباره در کاهش تورم چشم‌گیر نیست ولی اثر آهک زیاد است. با افزودن آهک، مقدار تورم خاک از حدود ۲ درصد به کم‌تر از ۰/۵ درصد کاهش می‌یابد.

بر اساس نتایج بررسی‌ها و آزمایش‌ها، مقدار سرباره لازم برای بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی خاک بیش از ۳۵ درصد است که با تغییر بافت خاک بتواند مقاومت و باربری خاک را افزایش دهد.

تقدیر و تشکر

از شرکت فولاد جهان آرا اروند و شرکت مهندسین مشاور پژوهش عمران راهوار به خاطر در اختیار گذاشتن اطلاعات و مساعدت در نمونه برداری قدردانی می‌شود.

منابع

1. Tangri A., "Effect of blast furnace slag on various properties of clayey soil", Int. J. Sci. Res. Dev 6, (2018) 2321-0613.
2. Shalabi F., Asi I., Qasrawi H., "Effect of By-Product Steel Slag on The Engineering Properties of Clay Soil", Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 29, (2017) 394-399.
3. James J., David E. P. B. G., Nagarathinam M., Thaniyarasu M. K. Madhu J., "Pozzolanic benefit of fly ash and steel slag blends in the development of uniaxial compressive strength of lime stabilized soil", Revista Facultad de Ingeniería (Rev. Fac. Ing.) 27(49), Septiembre-Diciembre, Tunja-Boyacá, Colombia (2018) 7-21.

۴. دشتی ح.، صفی‌خانی ا.، رفیعی ب.، "بررسی نتایج آزمایشگاهی بکارگیری سرباره در خاکریزی، اساس، زیراساس و مخلوط های آسفالتی"، چهاردهمین کنفرانس دانشجویان مهندسی عمران سراسر کشور، سمنان (۱۳۸۷).

۵. کی‌منش م.، ذبیحیان ر.، "بررسی اثر استفاده از سرباره ها در روسازی راهها به منظور ارتقای خواص مقاومتی و کیفیت راهها"، دومین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران معماری و مدیریت بحران، تهران (۱۳۹۶).

6. Bastos L. A. C., Silva G. C., Mendes J. C., Peixoto R. A. F., "Using iron ore tailings from tailing dams as road material", J. Mater. Civil Eng., 28(10), 04016102 (2016) 1-9.

7. Gonawala R. J., Kumar R., Chauhan K. A., "Stabilization of expensive soil with corex slag and lime for road subgrade", Springer Nature Switzerland AG, (2019) 1-14.

۸. سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، "دستورالعمل تثبیت لایه‌های خاکریز و روسازی راهها"، نشریه شمارهٔ ۲۶۸ (۱۳۸۲).

9. Wild S., Kinuthia J., Robinson R., Humphreys I., "Effects of ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength and swelling properties of lime-stabilized kaolinite in the presence of sulphates", Clay Minerals 31, (1996) 423-433.

۱۰. مکارچیان م.، نادری ح. "تاثیر رطوبت بر مقاومت CBR خاک تثبیت شده با آهک و سرباره کوره ذوب آهن (GGBS) در مجاورت سولفات"، پنجمین کنفرانس ملی مهندسی عمران، بابل (۱۳۸۹).

۱۱. عبدی م.، بهلولی ن. "تاثیر سرباره فولادسازی در خصوصیات مقاومتی و پایداری حجمی خاک های رسی تثبیت شده با آهک"، مجلهٔ مهندسی عمران شریف، دانشگاه صنعتی شریف، تهران (۱۳۹٤).

12. Akinwumi I., "Soil modification by the application of steel slag", Periodica Polytechnica Civil Engineering, 58(4), (2014) 371-377.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]

13. Bilgen G., Kavak A., "Reuse of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) in lime stabilized embankment materials", IACSIT Internat. Jour. Engg. Tech., 8(1), 11-14, DOI: 10.7763/ IJET, V8.850 (2016).
14. ASTM D4318, "Standard test methods for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils", West Conshohocken (2010).
15. ASTM D698, "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (600 kN-m/m^3)", West Conshohocken (2012).
16. ASTM D2166, "Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil", West Conshohocken (2016).
17. ASTM D1883, "Standard test method for California Bearing Ratio (CBR) of laboratory-compacted soils", West Conshohocken (2016).
۱۸. شرکت پژوهش عمران راهوار، "گزارش آزمایش‌های تجزیه شیمایی خاک پروژه مجتمع فولاد اروند"، (۱۳۹۶).
۱۹. شرکت پژوهش عمران راهوار، "گزارش آزمایش‌های اولیه طرح بهسازی خاک انبار روباز مجتمع فولاد اروند"، (۱۳۹۷).
20. Aldeeky H., Al Hattamleh O., "Experimental study on the utilization of fine steel slag on stabilizing high plastic subgrade soil", Advances in Civil Engineering, Article ID 9230279, (2017) 11.
21. Akinwumi I., "Soil modification by the application of steel slag", Periodica Polytechnica Civil Engineering, 58 (4) (2014) 371-377.
22. AASHTO M 145, "Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes", (2017).
۲۳. سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور ، "مشخصات فنی عمومی راه"، نشریهٔ شمارهٔ ۱۰۱، (۱۳۸۲).

24. Le T. M., Dang L. C., Khabbaz H., "Combined effects of bottom ash and lime on behavior of expensive soil", Springer Nature Switzerland AG 2019 (J. S. McCartney and L. R. Hoyos (Eds): GeoMEast 2018, SUCI, (2019) 28-44.
25. Mujtaba H., Aziz T., Farooq K., Sivakugan N., Das B. M., "Improvement in engineering properties of expensive soils using ground granulated blast furnace slag", Journal Geological Society of India, 92, (2018) 357-362.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.4.3]
[DOI: 10.52547/jeg.15.2.207]