



Semnan University



Research Article

Examining the Impact of Steelmaking Slag on Stabilizing Materials in Road Sub-bases: A Case Study of Khuzestan Steel Slag and Soils from the Ghaizanieh and Suiseh Regions of Ahvaz

Rasoul Alipour^{a*} , Hamed Javdanian^a , Sadegh Shokouhi^c

^a Assistant Professor in Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, I. R. Iran.

^b M.Sc. in Geotechnical Engineering, Department of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-11-29

Revised: 2025-04-23

Accepted: 2025-04-30

Keywords:

Steel slag,
California Bearing Ratio,
Sub-base layer,
Embankment stabilizer.

ABSTRACT

Steel slag is widely used worldwide in various industries including civil engineering and executive projects. Steelmaking slag is a side product in the iron production process and constitutes about 10 to 15 percent of iron smelting output and is still considered as waste material. The use of this product has environmental value as well. This research examines the use of steelmaking slag from Khuzestan Steel Company for soil stabilization. Fine-grained soils from Ghaizaniyeh and Suiseh in Ahvaz were analyzed by mixing various weight percentages of the slag and conducting tests on soil grading, compaction, and California Bearing Ratio (CBR). Results indicated that the engineering properties of pure slag outperform those of the soil, enhancing both soil compaction and CBR values under saturated and dry conditions. Additionally, combining slag with clay soil significantly increases its bearing capacity, making it suitable for road embankments. The saturated CBR value for the Ghaizaniyeh soil (sandy clay) is 20, and a mix of 80% by weight of this soil with 20% coarse slag increases the saturated CBR value to 34. On the other hand, the saturated CBR value for the Suiseh soil (low-plasticity clay) is 7, and a mix of 80% by weight of this soil with 20% fine slag increases the saturated CBR value to 30. Using the slag by-product of steel factories (slag) is beneficial from an environmental point of view.

مقاله پژوهشی

* Corresponding author.

E-mail address: civil.alipour@gmail.com

How to cite this article: Alipour, R. , Javdanian, H. and Shokouhi, S. (2025). Examining the impact of steelmaking slag on stabilizing materials in road sub-bases: A case study of Khuzestan Steel slag and soils from the Ghaizanieh and Suiseh regions of Ahvaz. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 11(2), 105-116.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2025.35680.1703>

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



Semnan University

مجله زیر ساخت های حمل و نقل

وبسایت نشریه: <https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en>

شاپا: 2821-0549



بررسی اثر استفاده از سرباره فولادسازی با هدف مصالح تثبیت کننده در خاکریز و زیراساس جاده‌ها (مطالعه موردی: سرباره شرکت فولاد خوزستان و خاک‌های منطقه

غیزانیه و سویسه شهرستان اهواز)

رسول عالی پور^{۱*}، حامد جاودانیان^۱، صادق شکوهی^۳

^۱ استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

^۳ کارشناسی ارشد گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

چکیده

در این تحقیق، استفاده از سرباره فولادسازی (شرکت فولاد خوزستان) به منظور تثبیت دو نوع خاک مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، از دو نوع معدن خاک در شهرستان اهواز شامل منطقه غیزانیه (ماسه لای دار) و معدن سویسه (رس با خاصیت خمیری کم) استفاده شده است. ابتدا با بهره‌گیری از روش‌های آزمایشگاهی، مقاومت مصالح درصدهای مختلف وزنی از سرباره آهن‌گذاری با خاک‌ها ترکیب و نسبت به انجام آزمایش‌های مختلف نظیر دانه‌بندی و طبقه‌بندی خاک، تراکم و نسبت ظرفیت باربری کالیفرنیا (CBR) اقدام گردید. بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌ها، برتری خصوصیات مهندسی سرباره خالص نسبت به خاک را تأیید می‌نماید و نشان می‌دهد استفاده از سرباره آهن‌گذاری تأثیر مناسبی در افزایش میزان تراکم خاک و نیز عدد نسبت باربری کالیفرنیا در حالت اشباع و خشک دارد. همچنین، از نظر راندمان کاربرد سرباره و ترکیب با خاک رس در افزایش ظرفیت باربری آن بسیار مؤثرتر بوده است. عدد CBR اشباع برای خاک معدن غیزانیه (ماسه لای دار) برابر ۲۰ می‌باشد که مخلوط ۸۰ درصد وزنی این خاک با ۲۰ درصد سرباره درشت باعث افزایش عدد CBR اشباع به ۳۴ می‌شود. از سوی دیگر، عدد CBR اشباع برای خاک معدن سویسه (رس با خاصیت خمیری کم) برابر ۷ می‌باشد که مخلوط ۸۰ درصد وزنی این خاک با ۲۰ درصد سرباره ریزدانه باعث افزایش عدد CBR اشباع به ۳۰ می‌شود. استفاده از محصول فرعی سرباره کارخانه‌های فولادسازی از جنبه زیست‌محیطی نیز سودمند می‌باشد.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۹

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۰۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۱۰

واژه‌های کلیدی:

سرباره فولاد،
نسبت باربری کالیفرنیا،
لایه زیراساس،
تثبیت کننده خاکریز.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: civil.alipour@gmail.com

استناد به این مقاله: عالی پور، رسول، جاودانیان، حامد و شکوهی، صادق. (۱۴۰۴). بررسی اثر استفاده از سرباره فولاد سازی با هدف مصالح تثبیت کننده در خاکریز و زیراساس جاده‌ها (مطالعه موردی: سرباره شرکت فولاد خوزستان و خاک‌های منطقه غیزانیه و سویسه شهرستان اهواز). مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱۱(۲)، ۱۰۵-۱۱۶.

۱. مقدمه

مشخص شد که مدول الاستیک سرباره فولادسازی به‌عنوان لایه زیراساس یا اساس در روسازی بیشتر از سنگدانه‌های دانه‌بندی شده معمولی ساخته شده از سنگدانه‌های معدنی است. بنابراین می‌توان ضخامت روسازی و هزینه‌های ساخت را با استفاده از سرباره فولادسازی کاهش داد.

برخی محققین بهبود خواص ژئوتکنیک خاک رس (CL) با استفاده از سرباره فولادی در شهر سلیمانیه عراق را بررسی نموده‌اند (عبدالغدير و همکاران، ۲۰۲۲). نتایج این تحقیق نشان داد که حد روانی، شاخص خمیری، درصد رطوبت بهینه، فشار تورم و درصد تورم با افزودن سرباره آهن به خاک کاهش می‌یابد؛ در حالی که دانسیته حداکثر خشک خاک، مقاومت تک‌محوری و ضریب نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) با افزودن سرباره به خاک افزایش می‌یابد.

بررسی تأثیر درصدهای مختلف سرباره بر CBR خاک لایه‌های زیرین جاده توسط تاپو و همکاران (۲۰۲۲) مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا خواص مواد سرباره به‌عنوان سنگدانه درشت و خاک به‌عنوان ماده زیرسطحی مورد ارزیابی قرار گرفته است. سپس خاک به‌صورت مکانیکی با میزان سرباره صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد تثبیت می‌شود. پس از آن، هر دو آزمون پروکتور استاندارد و آزمایش پروکتور اصلاح شده برای هر میزان سرباره در مخلوط خاک - سرباره برای یافتن میزان رطوبت بهینه (OMC) حداکثر چگالی خشک انجام شده است.

استفاده از سرباره کوره قوس الکتریکی برای تثبیت خاک‌های مختلف استوایی بررسی شده است. این کار استفاده از ریزدانه‌های اکسیدکننده کوره قوس الکتریکی^۱ سرباره فولادی را به‌عنوان عوامل تثبیت‌کننده دو خاک مختلف ارزیابی کرد. خاک‌های طبیعی و

تحقیقات گوناگونی برای استفاده از محصولات تولید جانبی کارخانه‌ها و استفاده از آنها در پروژه‌های عمرانی به‌عنوان جایگزین مواد اولیه انجام پذیرفته است. در هنگام تولید فولاد سرباره‌های آهن‌گذاری عمدتاً به‌صورت تپه‌هایی در انبارهای شرکت‌های ذوب‌آهن دیو می‌شوند که معضلات انبار کردن آنها و اشغال فضای زیادی را به وجود آورده است. از این رو پیدا کردن موارد مصرف برای سرباره‌های آهن‌گذاری همواره ارزشمند بوده است. برخی تحقیقات ارزیابی‌های فیزیکی، ریزساختار و میزان آبستگي برای مصالح زیراساس جاده‌ها با ترکیب سرباره فولادی و مخلوط شیشه‌های لوله‌ای اشعه کاتدی را بررسی نموده‌اند (محمد و همکاران، ۲۰۲۲). یافته‌های این تحقیق نشان داد که با استفاده از مواد فرعی تولید صنایع، مانند سرباره فولادی و شیشه لوله اشعه کاتدی، به‌عنوان مواد بازیافتی جایگزین در ساخت جاده‌ها، می‌توان تقاضا برای مصالح طبیعی جهت ساخت زیراساس و اساس جاده‌ها را کاهش داد. تجزیه و تحلیل ریزساختار این مواد نشان داده که سرباره فولاد متخلخل‌تر و خشن‌تر از گرانیت و شیشه لوله اشعه کاتدی است. یافته‌های حاصل از تست‌های مقاومت فشاری و استحکام کششی نشان می‌دهد که عملکرد مخلوط با ترکیب درصد بالاتری از سرباره فولاد به طور قابل توجهی افزایش یافته است.

خواص مکانیکی سرباره فولادی جایگزین سنگدانه‌های معدنی مورد استفاده در اساس و زیراساس جاده بر اساس استانداردهای ژاپن و ویتنام در تحقیقی توسط دنگ و همکاران (۲۰۲۲) بررسی شده است. نتایج نشان داد که سرباره فولادسازی می‌تواند تمام الزامات مکانیکی مشخص شده در استانداردهای ویتنام و ژاپن شامل JIS A 5015-2018 را برآورده کند. علاوه بر این،

انگلیسی روی هر یک از نمونه‌ها انجام شد تا بهترین درصد سرباره تعیین شود (شفابخش و احمدی، ۲۰۱۹). بهفرنیا و رستمی (۲۰۱۸) بررسی تأثیر نسبت محلول قلیایی به سرباره بر نفوذپذیری بتن قلیای فعال سرباره‌ای را بررسی نموده‌اند. در این تحقیق، اثر نسبت محلول قلیایی به سرباره در مقادیر گوناگون بر نفوذپذیری بتن قلیای فعال سرباره‌ای مورد آزمایش و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که نسبت محلول قلیایی به سرباره می‌تواند به‌عنوان یکی از پارامترهای اثرگذار در عملکرد بتن قلیا فعال سرباره‌ای تلقی شود.

طباطبایی و همکاران (۲۰۱۸) استفاده از سرباره فولاد مخلوط با خاکستر جهت تثبیت لایه زیراساس جاده را مورد بررسی قرار دادند. بررسی و تحلیل نتایج آنها برتری خصوصیات مهندسی سرباره خالص نسبت به خاک و نیز مخلوط سرباره با درصد‌های مختلف خاکستر را تأیید می‌نماید.

پاکباز و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی آزمایشگاهی سرباره فولادی قوس الکتریکی فولاد خوزستان پرداختند. آنها عمل بیوسمنتاسیون روی مواد سرباره و مقایسه با ماسه طبیعی را بررسی نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که علیرغم فعالیت اوره آز بالاتر و تولید کلسیت بالاتر مواد سرباره فولاد در مقایسه با ماسه طبیعی، ماده دوم UCS کمی بالاتر، افزایش انسداد پیوستگی بالاتر و کاهش نفوذپذیری بالاتر پس از تیمار بیوسمنتاسیون را نشان داد.

ملک و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی تأثیر افزودن پودر سرباره فولاد با ۳ و ۵ درصد به مخلوط آسفالتی گرم پرداختند. آزمایش‌های شکست مخلوط آسفالتی آنها در دمای ۱۲- و ۲۴- درجه سلسیوس انجام پذیرفت. نتایج تست‌ها نشان داد که با افزایش درصد فیلر، مقدار چقرمگی شکست مود کششی تا حدود ۴۵ درصد نسبت

مخلوط‌های خاک-سرباره فولادی تحت آزمایش‌های استاندارد فشردگی پروکتور، مقاومت فشاری نامحدود (UCS)، نسبت باربری کالیفرنیا و مدول ارتجاعی^۱ قرار گرفتند.

رحمانی و همکاران (۲۰۲۰) خصوصیات فیزیکی، مشخصات تراکمی و نسبت باربری کالیفرنیا سرباره فولادسازی به‌عنوان یکی از مصالح اساس و زیراساس جاده و زیربلاست در راه‌آهن را مورد مطالعه و تحقیق قرار دادند. نتایج نسبت باربری کالیفرنیا نشان می‌دهد که علاوه بر تراکم‌های معمول در راه‌سازی، با تراکم‌هایی کمتر نیز می‌توان از این مصالح برای اساس و زیراساس استفاده نمود.

کاربرد سرباره فولاد به‌عنوان سنگ‌دانه در صنعت راه‌سازی برای آسفالت نیز بررسی شده است. در پژوهش نامبرده علاوه بر بررسی خواص مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی سرباره فولاد به‌عنوان جایگزین مصالح سنگی در روسازی‌های آسفالتی به کاربرد سرباره فولاد در راه‌سازی از جمله اساس و زیراساس، مخلوط‌های آسفالتی به همراه نتایج آخرین تحقیقات پرداخته است (حسامی و زال‌نژاد، ۲۰۲۰).

بررسی تأثیر استفاده از سرباره فولاد و اندودهای سطحی مختلف بر عملکرد مقاومت برشی بین لایه‌ای روسازی مرکب توسط سایر محققین بررسی شده است. به‌منظور آنالیز اثر اندودهای سطحی مختلف بر خصوصیات چسبندگی بین لایه‌ای، از دستگاه برش مستقیم استفاده شد. بدین منظور، ابتدا نمونه‌های بتنی حاوی درصد‌های مختلف سرباره فولاد جایگزین سنگ‌دانه در روسازی بتنی آماده گردید. سپس آزمایش‌های خصوصیات مکانیکی و همچنین مقاومت سایشی به روش EN 1338 و لغزندگی به روش پاندول

1- Resilient Modulus, RM

بررسی اثر استفاده از سرباره فولادسازی با هدف مصالح تثبیت‌کننده در خاکریز و زیرسازس جاده‌ها (مطالعه موردی: سرباره ...

لای‌دار (معدن غیزانیه اهواز) استفاده شده است. درصد‌های مختلف سرباره فولاد و خاک مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج آزمایش‌های تراکم، رطوبت بهینه و CBR ارائه گردیده‌اند. نتایج این تحقیق دارای ارزش کاربردی برای زیرسازی جاده‌ها می‌باشد. در جدول ۱، مقایسه‌ی نتایج این تحقیق با سایر محققین ارائه گردیده است.

به نمونه شاهد (مخلوط بدون فیلر سرباره آهن) افزایش یافت. همچنین، با کاهش دما، مقدار چقرمگی شکست افزایش قابل ملاحظه‌ای را نشان داد که بیانگر بهبود مقاومت در برابر شکست مخلوط آسفالتی به واسطه افزایش سفتی قیر می‌باشد.

در این مقاله، برای اولین بار از کاربرد سرباره فولاد خوزستان برای تثبیت دو نوع خاک منبع قرضه رس با خاصیت خمیری کم (معدن سویسه اهواز) و خاک ماسه

جدول ۱. مقایسه نتایج تحقیق حاضر با سایر تحقیقات

نتایج این تحقیق	نتایج تحقیقات دیگر	تفاوت‌ها و نوآوری‌های این تحقیق	رفرنس مورد نظر
سرباره فولادسازی (شرکت فولاد خوزستان) استفاده شده است.	استفاده از سایر افزودنی‌ها مانند سیمان، آهک، خاکستر بادی، پوزولان‌ها	استفاده از سرباره فولادسازی به‌عنوان ماده زائد صنعتی و پایدار برای تثبیت خاک	(Mahedi et al., 2020)
درصد‌های بیشتر (تا ۲۰٪) آزمایش شده‌اند.	تا ۱۵ درصد سرباره بررسی شده است.	بررسی تأثیر درصد‌های اختلاط بر دو نوع خاک مختلف و ارائه ترکیبات بهینه	(Wang et al., 2020)
خاک غیزانیه (ماسه لای‌دار) و خاک سویسه (رس با خاصیت خمیری کم)	خاک‌های lateritic یا خاک‌های سرخ رنگ	تمرکز بر خاک‌های خاص منطقه اهواز که کمتر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.	(Longjhon and Jaja, 2022)
	استفاده از سرباره و نخاله ساختمانی به‌عنوان ماده پرکننده جداره‌های خاک مکانیکی (MSE)	استفاده از سرباره برای تحمل بارهای فشاری در راه‌سازی بررسی شده است.	(Sarkar & Hegde, 2025)
بررسی نتایج تحقیق براساس آزمایش‌های مستقیم و بدون روابط همبستگی	استفاده از سرباره فولاد در شمع تراکمی و ارزیابی با نتایج آزمایش نفوذ استاندارد SPT و استفاده همبستگی نتایج	استفاده از سرباره برای زیرسازی مناسب جاده‌ها	(Yoon et al., 2024)
خواص مقاومتی خاک ماسه لای‌دار و رس با پلاستیسیته کم بررسی شده است.	سرباره فولاد با کاهش پلاستیسیته، افزایش مقاومت و بهبود خصوصیات تراکمی، گزینه‌ای مؤثر و پایدار برای تثبیت خاک‌های انبساطی است.	اثر سرباره بر یک خاک منبسط شونده بررسی شده است.	(Kabeta & Lemma, 2023)
بررسی خصوصیات استاتیک مقاومتی خاک برای زیرسازی جاده	کاهش مشکلات ناشی از تورم/انقباض خاک و افزایش مقاومت	بهبود خصوصیات ژئوتکنیک، مقاومت برشی و دینامیک خاک متورم‌شونده با سرباره، پوسته برنج و آهک زنده بررسی شده است.	(Ashango & Patra, 2016)

۲. روش تحقیق

از لحاظ کاربردی، در برخی موارد مانند مصالح پرکننده پشت دیوار حایل (Back fill) صرفاً از مصالح سرباره آهن‌گذاری فولاد خوزستان استفاده شده است. هرچند در این مطالعه ترکیب درصد‌های مختلف سرباره با معادن خاک به منظور دستیابی به عدد CBR مناسب جهت زیرسازی در راه‌سازی استفاده شده است. در این تحقیق به صورت آزمایشگاهی به بررسی پارامترهای فیزیکی و مکانیکی افزایش مقاومت خاک ریزدانه تهیه شده از دو منبع قرضه در خوزستان در ترکیب با سرباره فولاد پرداخته شده است. سرباره فولاد با دانه‌بندی‌های مختلف به خاک‌های منطقه سویسه و غیزانیه به صورت خشک و اشباع مخلوط گردید که درصد‌های افزودن سرباره ۱۰ و ۲۰ درصد به خاک اضافه گردید و پس از ۹۶ ساعت غرقاب، میزان تورم محاسبه شد. آنگاه مجموعه آزمایش‌های دانه‌بندی، تراکم و CBR روی مخلوط‌های حاوی درصد‌های متنوع مخلوط سرباره فولاد و خاک مناطق مورد تحقیق انجام و در نهایت تأثیر سرباره فولاد با درصد‌های مختلف بر پارامترهای مهندسی خاک تفسیر و مقایسه گردید.

دانه‌بندی خاک معدن غیزانیه به صورت ماسه لای‌دار SM است. این گونه خاک‌های ریزدانه نفوذپذیری بیشتری نسبت به خاک رس دارند. اما دانه‌بندی معدن خاک ریزدانه سویسه به عنوان خاک رس با خاصیت خمیری کم یا CL شناخته می‌شود. خاک سویسه دارای حد روانی برابر ۳۴ و حد خمیری برابر ۱۶ است.

در جدول ۲، مشخصات خاک و نیز ترکیب آن با سرباره درشت‌دانه و ریزدانه ارائه شده است.

به منظور بررسی مشخصات فیزیکی سرباره شرکت فولاد خوزستان آزمون دانه‌بندی در این تحقیق مطابق با

استاندارد ASTM-D422، آزمایش حدود اتربرگ مطابق با استاندارد ASTM-D4318 و آزمایش چگالی ویژه ذرات بر اساس استاندارد ASTM-D854 انجام شدند. آزمایش‌های لس‌آنجلس و وزن مخصوص حداکثر و حداقل به ترتیب با استانداردهای ASTM-D4253، ASTM-C131 و ASTM-D4254، آزمایش‌های تراکم استاندارد و اصلاح شده به ترتیب طبق استاندارد AASHTO-T99 و AASHTO-T180 و نهایتاً آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا بر اساس استاندارد AASHTO-T193 انجام شدند.

۳. بررسی و تحلیل نتایج

۳-۱. آزمایش‌های تراکم (استاندارد و اصلاح شده)

در این تحقیق، برای انجام آزمایش‌های تراکم و تعیین مشخصات تراکمی سرباره، آزمایش‌های تراکم در حالت استاندارد (AASHTO-T99) و حالت اصلاح شده (AASHTO-T180) برای دو دانه‌بندی روی هر دو سرباره کوره انجام پذیرفت. در اینها، آزمایش تعداد ضربات چکش اعمالی در هر لایه به ترتیب برابر با ۱۰، ۳۰، ۵۶ و ۶۵ ضربه در نظر گرفته شد. دانه‌بندی ریزدانه سرباره دارای ضخامت حداکثر بعد دانه برابر ۱۰ میلی‌متر است. در حالی که این مقدار برای خاک سرباره درشت‌دانه برابر ۳۸ میلی‌متر است.

مخلوط خاک‌های منابع قرضه غیزانیه و سویسه با سرباره ریزدانه و درشت‌دانه با نسبت‌های مختلف انجام پذیرفته و نسبت به انجام آزمایش‌های گوناگون اقدام گردیده است. در شکل‌های ۱ و ۲، نتایج آزمایش تراکم به روش آشتو اصلاح‌شده و رطوبت بهینه نمونه‌ها نشان داده شده است.

جدول ۲. مشخصات سرباره ریز و درشت، خاک معادن قرصه و ترکیب خاک- سرباره

درصد عبوری از الک ۲۰۰	مشخصات		طبقه‌بندی		علامت اختصاری	نوع خاک
	LL	PI	AASHTO	UNIFIED		
۳	غیرقابل تعیین	NP			FSL	دانه‌بندی سرباره ریزدانه (حداکثر ۱۰ میلی‌متر)
۰	غیرقابل تعیین	NP			CSL	دانه‌بندی سرباره درشت‌دانه (حداکثر ۳۸ میلی‌متر)
۳۳	غیرقابل تعیین	NP	A-4-0	SM	GH	خاک معدن غیزانیه
۹۳	۳۴	۱۶	A-6	CL	SO	خاک معدن سویسه
۳۵	غیرقابل تعیین	NP	A-2-4	SM	GH90-CSL10	اختلاط ۹۰ درصد خاک غیزانیه با ۱۰ درصد سرباره درشت‌دانه
۳۰	غیرقابل تعیین	NP	A-2-4	SM	GH80-CSL20	اختلاط ۸۰ درصد خاک غیزانیه با ۲۰ درصد سرباره درشت‌دانه
۸۳	۲۴	۱۴	A-6	CL	SO90-CSL10	اختلاط ۹۰ درصد خاک سویسه با ۱۰ درصد سرباره درشت‌دانه
۷۵	۳۴	۱۶	A-6	CL	SO80-CSL20	اختلاط ۸۰ درصد خاک سویسه با ۲۰ درصد سرباره درشت‌دانه
۳۵	غیرقابل تعیین	NP	A-2-4	SM	GH90-FSL10	اختلاط ۹۰ درصد خاک غیزانیه با ۱۰ درصد سرباره ریزدانه
۳۱	غیرقابل تعیین	NP	A-2-4	SM	GH80-FSL20	اختلاط ۸۰ درصد خاک غیزانیه با ۲۰ درصد سرباره ریزدانه
۸۰	۳۵	۱۷	A-6	CL	SO90-FSL10	اختلاط ۹۰ درصد خاک سویسه با ۱۰ درصد سرباره ریزدانه
۷۰	۳۳	۱۵	A-6	CL	SO80-FSL20	اختلاط ۸۰ درصد خاک سویسه با ۲۰ درصد سرباره ریزدانه

کمترین میزان رطوبت بهینه برای خاک مخلوط سویسه با ترکیب ۸۰ درصد خاک و ۲۰ درصد سرباره درشت‌دانه ۹ درصد است. بیشترین میزان رطوبت بهینه برای خاک معدن سویسه ۱۴/۴ درصد است. دلیل زیادتر بودن رطوبت بهینه برای خاک معدن سویسه این است که به صورت کامل رس است و با سرباره مخلوط نشده است و آب بیشتری جذب می‌کند.

کمترین میزان وزن مخصوص خشک در حالت حداکثر برای خاک قرصه غیزانیه ۱/۷۱ گرم سانتی‌متر مکعب است. این میزان برای خاک رس معدن غیزانیه برابر ۱/۸۸ گرم سانتی‌متر مکعب است. بیشترین میزان وزن مخصوص خشک در حالت حداکثر برای خاک مخلوط سویسه، ۸۰ درصد و سرباره درشت‌دانه به میزان ۲۰ درصد و برابر ۲/۱۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب است.

همچنین، نتایج شکل ۲ نشان می‌دهد که درصد رطوبت بهینه خاک سویسه و غیزانیه با ترکیب شدن با سرباره کاهش می‌یابد.

۲-۳. آزمایش تعیین نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) خشک و غرقاب

آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا از آزمایش‌های متداول برای تعیین مشخصات لایه‌های اساس و زیراساس است. مطابق نشریه ۲۳۴ سازمان برنامه و بودجه، میزان نسبت باربری کالیفرنیا به‌عنوان پارامتر مقاومتی در انتخاب لایه اساس (حداقل ۸۰) و برای لایه زیراساس (حداقل ۳۰) معرفی شده است. در این تحقیق، آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا مطابق با استاندارد AASHTO T193 انجام شده است. در ادامه، نتایج آزمایش‌های نسبت باربری کالیفرنیا سرباره‌ها به دو صورت خشک و غرقاب، برای دو سطح انرژی و دو نوع دانه‌بندی، ارائه می‌شود.

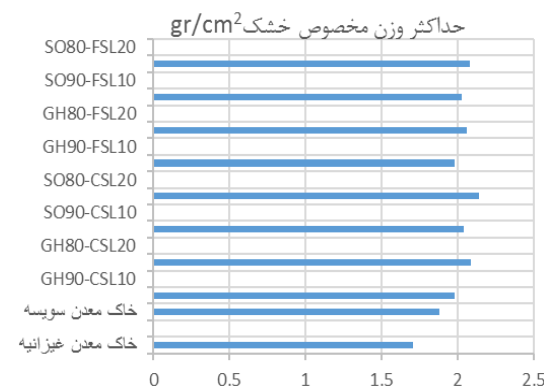
در شکل‌های ۵ تا ۸ تصاویر مربوط به نتایج آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا در دو حالت اشباع و خشک و با ضربات ۱۰، ۲۵ و ۵۶ ارائه شده است.

خاک رس معدن سویسه کمترین نسبت باربری کالیفرنیا را در شرایط اشباع و به میزان ۲ دارد. در حالت اشباع با ۲۵ ضربه تراکم، کمترین میزان CBR برای خاک رس معدن سویسه برابر ۵ می‌باشد. بیشترین میزان برای خاک غیزانیه به میزان ۸۰ درصد و سرباره به میزان ۲۰ درصد برابر ۲۲ می‌باشد. کمترین میزان CBR در حالت خشک برای ۲۵ ضربه تراکم برابر ۱۰ و برای خاک معدن سویسه به میزان ۹۰ درصد و سرباره درشت‌دانه به میزان ۱۰ درصد می‌باشد. بیشترین میزان برابر ۳۲ و برای خاک غیزانیه به میزان ۸۰ درصد و ۲۰ درصد سرباره درشت‌دانه می‌باشد. کمترین میزان CBR اشباع با ۵۶ ضربه را خاک رس معدن سویسه برابر ۷ دارا می‌باشد. بیشترین این میزان مخصوص خاک غیزانیه با ۸۰ درصد و سرباره درشت‌دانه با ۲۰ درصد و برابر ۳۴ می‌باشد. کمترین میزان

جدول ۳. نتایج آزمایش تراکم

درصد رطوبت	حداکثر وزن مخصوص خشک، gr/cm ²	نوع خاک
بهبه	۱/۷۱	خاک غیزانیه
	۱/۸۸	خاک سویسه
	۱/۹۸	GH*90-CSL**10
	۲/۰۹	GH80-CSL20
	۲/۰۴	SO***90-CSL10
	۲/۱۴	SO80-CSL20
	۱/۹۸	GH90-FSL****10
	۲/۰۶	GH80-FSL20
	۲/۰۳	SO90-FSL10
	۲/۰۸	SO80-FSL20

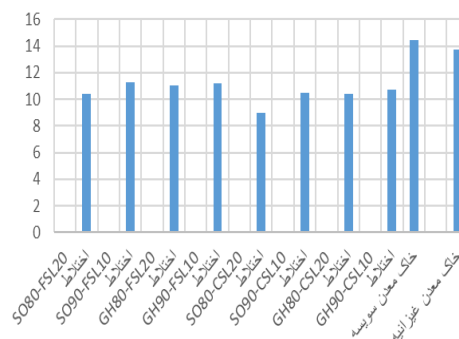
سرباره درشت‌دانه **، خاک معدن غیزانیه *
سرباره ریزدانه ****، خاک معدن سویسه ***



شکل ۱. نتایج وزن مخصوص خشک حداکثر در آزمایش

تراکم

Optimum water content, %

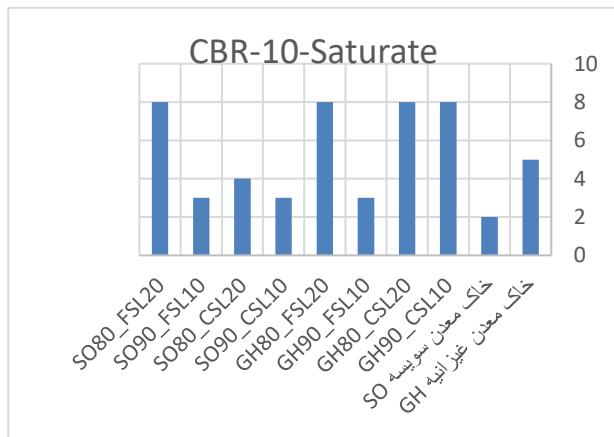


شکل ۲. نتایج رطوبت بهینه در آزمایش تراکم

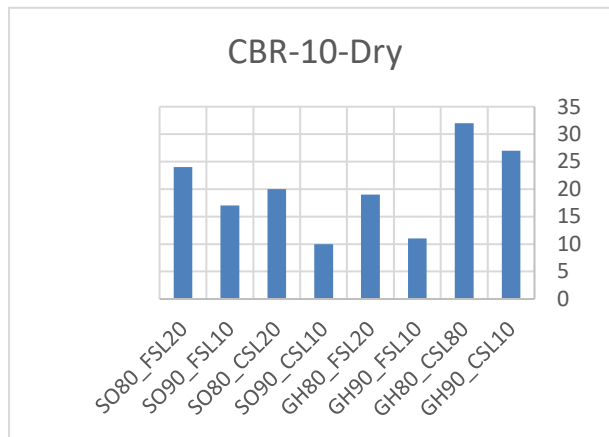
بررسی اثر استفاده از سرباره فولادسازی با هدف مصالح تثبیت‌کننده در خاکریز و زیراساس جاده‌ها (مطالعه موردی: سرباره ...

۸۰ درصد و سرباره درشت‌دانه با ۲۰ درصد و نیز خاک رس معدن سویسه به میزان ۸۰ درصد و سرباره ریزدانه به میزان ۲۰ درصد برابر ۴۱ می‌باشد.

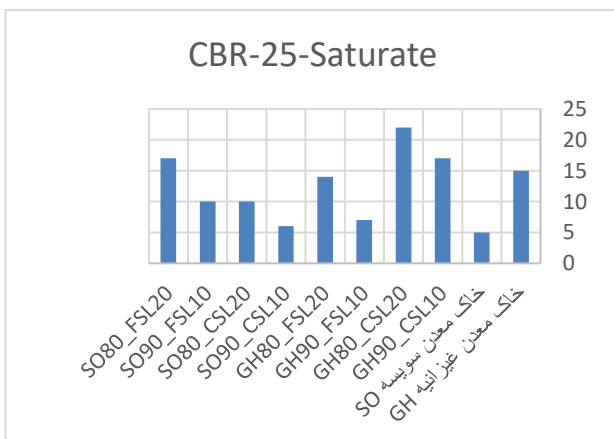
CBR در حالت خشک برای خاک معدن سویسه به میزان ۹۰ درصد و سرباره درشت‌دانه به میزان ۱۰ درصد برابر ۱۹ می‌باشد. بیشترین میزان CBR برای خاک غیزانیه با



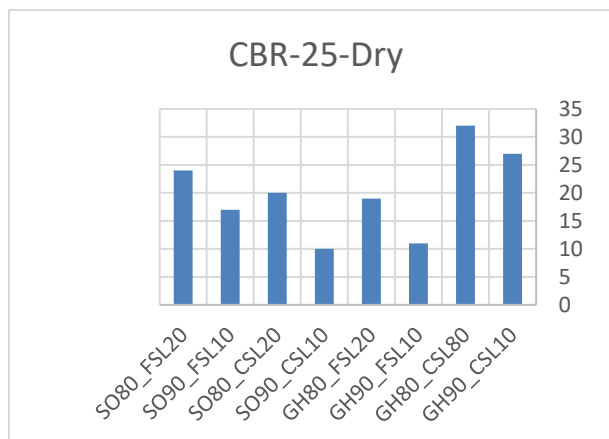
شکل ۴. نتایج نسبت باربری کالیفرنیا در ۱۰ ضربه با شرایط اشباع



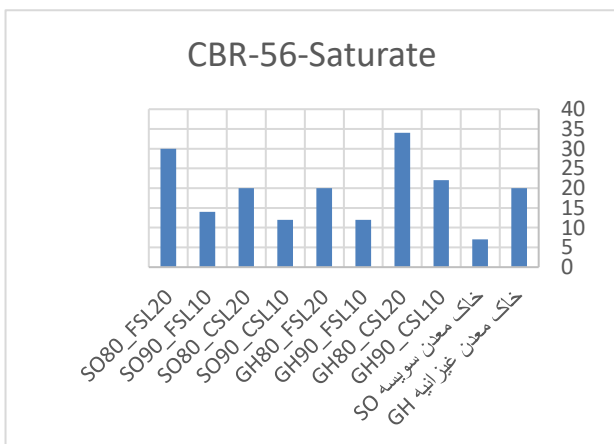
شکل ۳. نتایج نسبت باربری کالیفرنیا در ۱۰ ضربه خشک



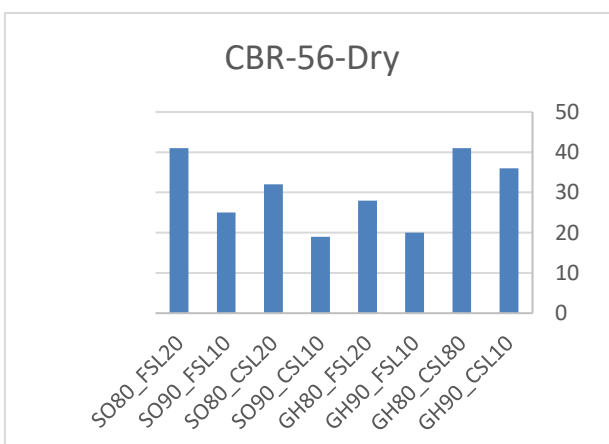
شکل ۶. نتایج نسبت باربری کالیفرنیا در ۲۵ ضربه با شرایط اشباع



شکل ۵. نتایج نسبت باربری کالیفرنیا در ۲۵ ضربه با شرایط خشک



شکل ۸. نتایج نسبت باربری کالیفرنیا در ۵۶ ضربه با شرایط اشباع



شکل ۷. نتایج نسبت باربری کالیفرنیا در ۵۶ ضربه با شرایط خشک

جدول ۴. نتایج نسبت ظرفیت باربری کالیفرنیا برای دو نوع خاک مینا

نوع خاک	شرایط آزمایش	تعداد ضربات	دانشیته خشک حداکثر	درصد رطوبت قبل از غرقاب	درصد رطوبت بعد از غرقاب	CBR
خاک ماسه لای دار	اشباع	۱۰	۱/۵۳	۱۱/۵	۲۰/۸	۵
معدن غیزانیه- GH*		۲۵	۱/۶۳	۱۱/۱	۱۹/۴	۱۵
		۵۶	۱/۷۰	۱۰/۷	۱۷/۴	۲۰
خاک رس با خاصیت خمیری	اشباع	۱۰	۱/۶۰	۱۶/۲	۲۳/۵	۲
		۲۵	۱/۸۲	۱۳/۸	۱۹/۹	۵
کم، معدن سویسه- SO**		۵۶	۱/۹۱	۱۳/۶	۱۷/۹	۷

GH* مخفف اسم گذاری خاک معدن غیزانیه
SO** مخفف اسم گذاری خاک معدن سویسه

۳-۳-۳. تفسیر نتایج تحلیل ANOVA

۳-۳-۳-۱. تأثیر اصلی فاکتورها

- نوع خاک: تفاوت معنادار بین خاک غیزانیه و خاک سویسه وجود دارد ($p < 0.001$).

- میانگین CBR در GH بالاتر از SO است.

- شرایط آزمایش: CBR در شرایط "خشک" به طور معناداری بیشتر از "اشباع" است ($p < 0.001$).

- تعداد ضربات: با افزایش ضربات، CBR افزایش می یابد ($p < 0.001$).

۳-۳-۳-۲. تعامل های دوگانه

- نوع خاک × شرایط: تفاوت بین GH و SO در شرایط خشک بیشتر از اشباع است ($p = 0.001$).

- نوع خاک × ضربات: تأثیر ضربات بر CBR در GH قوی تر از SO است ($p = 0.024$).

۳-۳-۳-۳. تعامل سه گانه

تعامل سه گانه بین متغیرهای مستقل معنادار نیست ($p = 0.166$).

نتایج نسبت ظرفیت باربری کالیفرنیا برای دو نوع خاک ریزدانه (غیزانیه و سویسه) در جدول ۴ ارائه شده است.

۳-۳. تحلیل ANOVA برای داده های حاصل

۳-۳-۱. مشخصات داده ها و طراحی آزمایش

متغیر مستقل (عوامل) شامل نوع خاک در دو سطح (GH, SO) می باشد. همچنین، شرایط آزمایش نیز در دو سطح (خشک، اشباع) را شامل می شود. تعداد ضربات در سه سطح (۱۰، ۲۵، ۵۶) است.

متغیرهای وابسته شامل دانشیته خشک حداکثر، درصد رطوبت قبل و بعد از غرقاب و CBR (نسبت باربری کالیفرنیا) می باشد.

۳-۳-۲. انتخاب نوع ANOVA

با توجه به وجود سه فاکتور مستقل (نوع خاک، شرایط آزمایش، تعداد ضربات) و تعامل بین آنها، از Three-Way ANOVA استفاده می شود.

هدف، بررسی تأثیر هر فاکتور و تعامل آنها بر متغیر وابسته CBR می باشد.

نمونه جدول نتایج Three-Way ANOVA برای متغیر CBR در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. نتایج Three-Way ANOVA برای متغیر CBR

ردیف	منبع تغییرات	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F	p-value
۱	نوع خاک (GH, So)	۱۵۰۰/۲	۱	۱۵۰۰/۲	۴۵/۳	<0.001
۲	شرایط (خشک/اشباع)	۳۲۰۰/۸	۱	۳۲۰۰/۸	۹۶/۷	<0.001
۳	تعداد ضربات	۲۸۰۰/۵	۲	۱۴۰۰/۳	۴۲/۲	<0.001
۴	نوع خاک * شرایط	۴۰۰/۱	۱	۴۰۰/۱	۱۲/۱	0.001
۵	نوع خاک * ضربات	۲۵۰/۳	۲	۱۲۵/۲	۳/۸	0.024
۶	شرایط * ضربات	۱۸۰/۶	۲	۹۰/۳	۲/۷	0.068
۷	تعامل سه‌گانه	۱۲۰/۴	۲	۶۰/۲	۱/۸	0.166

۴. نتیجه‌گیری

استفاده از سرباره آهن‌گذاری تأثیر مناسبی در افزایش میزان تراکم خاک و نیز عدد نسبت باربری کالیفرنیا در حالت اشباع و خشک دارد. با توجه به آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، می‌توان نتایج زیر را استخراج کرد:

- در آزمایش تراکم، کمترین میزان وزن مخصوص خشک در حالت حداکثر برای خاک قرصه غیزانیه (ماسه لای‌دار) به میزان ۱/۷۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. این میزان برای خاک رس معدن غیزانیه (رس با خاصیت خمیری کم) برابر ۱/۸۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد.

- بیشترین میزان وزن مخصوص خشک در حالت حداکثر برای خاک مخلوط سویسه (CL) به میزان ۸۰ درصد و سرباره درشت‌دانه به میزان ۲۰ درصد و برابر ۲/۱۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد.

- کمترین میزان رطوبت بهینه برای خاک مخلوط سویسه (CL) به میزان ۸۰ درصد و سرباره درشت‌دانه به میزان ۲۰ درصد و برابر ۹ درصد می‌باشد. بیشترین میزان رطوبت بهینه برای خاک معدن سویسه به میزان ۱۴/۴ درصد می‌باشد. دلیل زیادتر بودن رطوبت بهینه برای خاک معدن سویسه این است که به صورت کامل رس می‌باشد و با سرباره مخلوط نشده است.

- در آزمایش‌های CBR، خاک رس معدن سویسه کمترین میزان نسبت باربری کالیفرنیا را در شرایط اشباع

و به میزان ۲ در ۱۰ ضربه دارد. بیشترین میزان CBR در حالت خشک و ۱۰ ضربه به میزان ۳۲ برای خاک غیزانیه (SM) به میزان ۸۰ درصد و سرباره درشت‌دانه به میزان ۲۰ درصد می‌باشد. در حالت اشباع با ۲۵ ضربه تراکم، کمترین میزان CBR برای خاک رس معدن سویسه و به میزان ۵ می‌باشد. بیشترین این میزان برای خاک غیزانیه (SM) به میزان ۸۰ درصد و سرباره به میزان ۲۰ درصد و برابر ۲۲ می‌باشد. کمترین میزان CBR در حالت خشک برای ۲۵ ضربه تراکم برابر ۱۰ و برای خاک معدن سویسه به میزان ۹۰ درصد و سرباره درشت‌دانه به میزان ۱۰ درصد می‌باشد. بیشترین این میزان برابر ۳۲ و برای خاک غیزانیه (SM) به میزان ۸۰ درصد و ۲۰ درصد سرباره درشت‌دانه می‌باشد. کمترین میزان CBR اشباع با ۵۶ ضربه را خاک رس معدن سویسه و به میزان ۷ دارد. بیشترین این میزان مخصوص خاک غیزانیه (SM) با ۸۰ درصد و سرباره درشت‌دانه با ۲۰ درصد و برابر ۳۴ می‌باشد. کمترین میزان CBR در حالت خشک برای خاک معدن سویسه به میزان ۹۰ درصد و سرباره درشت‌دانه به میزان ۱۰ درصد و برابر ۱۹ می‌باشد. بیشترین میزان CBR در حالت خشک برای خاک غیزانیه (SM) با ۸۰ درصد و سرباره درشت‌دانه با ۲۰ درصد و نیز خاک رس معدن سویسه به میزان ۸۰ درصد و سرباره ریزدانه به میزان ۲۰ درصد و برابر عدد سی بی آر ۴۱ می‌باشد.

- Abdalqadir, Z. K., Salih, N. B. and Salih, S. J. 2022. "The improvement of the geotechnical properties of low-plasticity clay (CL) using steel slag in Sulaimani City/Iraq". *Geomech. Geoeng.*, 17(3): 834-841. <https://doi.org/10.1080/17486025.2021.1903087>
- Ashango, A. A. and Patra, N. R. 2016. "Behavior of expansive soil treated with steel slag, rice husk ash, and lime". *J. Mater. Civ. Eng.*, 28(7). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001547](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001547)
- Behfarnia, K. and Rostami, M. 2018. "The effect of alkaline solution-to-slag ratio on permeability of alkali activated slag concrete". *Ferdowsi Civ. Eng.*, 31(1): 99-112. <https://doi.org/10.22067/civil.v31i1.58911> [In Persian]
- Dang, D. T., Nguyen, M. T., Nguyen, T. P., Isawa, T., Ta, Y. and Sato, R. 2022. "Mechanical properties of steel slag replaced mineral aggregate for road base/sub-base application based Vietnam and Japan standard". *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 29(28): 42067-42073. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16706-0>
- Hesami, E. and Zalnezhad, M. 2020. "Application of steel slag as aggregate in the road construction industry". *Road J.*, 28(105): 119-134. <https://doi.org/20.1001.1.1735062.1399.28.105.9.2>
- Kabeta, W. F. and Lemma, H. 2023. "Modeling the application of steel slag in stabilizing expansive soil". *Model. Earth Syst. Environ.*, 9(4): 4023-4030. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01734-1>
- Longjohn, T. A. and Jaja, G. 2022. "Stabilization of lateritic soils using steel slag". *J. Architect. Civ. Eng.*, 7(2): 7-16.
- Lopes, E. C., da Silva, T. O., Pitanga, H. N., et al. 2022. "Application of electric arc furnace slag for stabilisation of different tropical soils". *Int. J. Pavement Eng.*, 23(14): 5003-5014. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1990289>
- Mahedi, M., Cetin, B. and White, D. J. 2020. "Cement, lime, and fly ashes in stabilizing expansive soils: Performance evaluation and comparison". *J. Mater. Civ. Eng.*, 32(7). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003260](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003260)
- Malek, M. R., Shabani, S. and Keymanesh, M. R. 2024. "Fracture resistance of asphalt concrete mixtures under pure tensile mode loading in different environmental and geometric conditions with different percentages of filler". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 10(3). <https://doi.org/10.22075/JTIE.2024.35546.1694>
- Mohamad, A. Y., Jamil, M., Md Yusoff, N. I., Mohd Fadzil, S. and Taha, M. R. 2022. "Physical, microstructure and leaching assessments for pavement road base containing mixed steel slag and cathode ray tube glass". *Clean Technol. Environ. Policy*, 24(3): 919-930. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02231-8>
- Pakbaz, M. S., Ghezelbash, G. R. and Kiani Deh Kiani, M. 2024. "Bio-cementation practice on electric-arc steel slag and comparison with natural sand". *Proceed. Institute Civ. Eng.- Ground Improvement*, 177(4): 324-339. <https://doi.org/10.1680/jgrim.21.00070>
- Rahmani, I., Afshari, M., Aghaei Araie, A., Attarchian, N., Salamat, A. S. and Hssani, H. 2020. "Evaluation of compaction energy, soil grain distribution and type of steel slag on the compaction characteristic and California Bearing Ratio (CBR)". *J. Transport. Res.*, 17(2): 137-150. <https://doi.org/20.1001.1.1735345.9.1399.17.2.10.9> [In Persian]
- Sarkar, S. and Hegde, A. 2025. "Reliability assessment of steel slag and construction waste backfill for reinforced earth structures using response surface method". *Soils Found.*, 65(1): 101569. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2025.101569>
- Shafabakhsh, Gh. and Ahmadi, S. 2019. "Investigating the effects of steel slag and different tack coats on the shear strength of composite pavement layers". *Quart. J. Transport. Eng.*, 11(2): 475-499. <https://doi.org/10.22119/jte.2019.69459>
- Tabatabai, S. H., Arai, A. A. and Salamat, A. S. 2018. "Using steel slag for stabilization in road infrastructure". *Road, Housing and Urban Development Research Center of Iran*. [In Persian]
- Tapu, T. A., Palit, S. K. and Sabbir, M. H. 2022. "Impact of slag percentages on soil CBR for sub-surface layers of flexible pavement". pp. 351-362. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5547-0_33
- Wang, S., Li, X., Ren, K. and Liu, C. 2020. "Experimental research on steel slag stabilized soil and its application in subgrade engineering". *Geotech. Geol. Eng.*, 38(5): 4603-4615. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01313-6>
- Yoon, B., Cho, Y., Choo, H. and Jang, J. 2024. "Experimental and numerical evaluation of sustainable application of steel slag as an alternative to gravel in compaction piles". *Case Stud. Constr. Mater.*, 21: e03900. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03900>