

مروری بر تأثیر غبار کوره سیمان به عنوان یک تثبیت کننده پایدار بدون سیمان بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های رسی

مقاله علمی-مروری

*صادق قوامی جمال (نویسنده مسئول)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

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

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۵ - پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۲

صفحه ۲۶۰-۲۴۵

چکیده

خاک‌های رسی به دلیل ظرفیت باربری کم و پتانسیل بالای تغییر حجم، محدودیت‌های زیادی را در پروژه‌های عمرانی ایجاد می‌کنند. تثبیت شیمیایی این خاک‌ها با استفاده از مواد زائد یا پسماند صنعتی به عنوان دستیابی به یک راه حل پایدار و سازگار با محیط زیست مورد توجه محققین قرار گرفته است. غبار کوره سیمان (CKD) یک محصول جانبی تولید سیمان پرتلند است که تولید سالانه آن در ایران حدود ۱۰ تا ۱۳ میلیون تن برآورد می‌شود. با استفاده از CKD به جای سیمان پرتلند می‌توان با کاهش تقاضای سیمان و حجم زباله‌های صنعتی به محیط زیست پایدار و سالم‌تر برای نسل آینده کمک کرد. ریزی ذرات و وجود آهک آزاد، غبار کوره سیمان را به ماده‌ای با پتانسیل بالا برای تثبیت خاک‌ها تبدیل کرده است. در این تحقیق پس از تشریح فرایند تولید و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی CKD، به بررسی مطالعات انجام شده بر تثبیت خاک‌های رسی با CKD پرداخته شده است و چگونگی تأثیر CKD بر حدود اتربرگ، پارامترهای تراکمی، مقاومت، شاخص تورم و نفوذپذیری خاک مورد بحث قرار گرفته است. همچنین اثر افزودنی‌های ثانویه بر مخلوط خاک-CKD ارزیابی شده است. با وجود اثربخشی CKD در بهبود خصوصیات مهندسی خاک‌های رسی، خطرات زیست‌محیطی مربوط به ترکیبات شیمیایی آن و نشت آن‌ها به آب‌های زیرزمینی، مسائل اجرایی در استفاده از CKD و اقدامات کنترلی مؤثر در کاربرد آن، از چالش‌های استفاده از CKD در تثبیت خاک است. این تحقیق می‌تواند به عنوان یک راهنما در استفاده از CKD به عنوان تثبیت کننده شیمیایی خاک‌های رسی برای مهندسين در پروژه‌های عمرانی مفید باشد.

واژه‌های کلیدی: تثبیت شیمیایی خاک، خاک‌های رسی، خصوصیات مکانیکی، غبار کوره سیمان

۱- مقدمه

م مصالح و روش‌های حرارتی) و به سازی با استفاده از تسلیح خاک (Moseley and Kirsch, 2004; Nicholson, 2014). روش مناسب به سازی با توجه به ماهیت مشکل، خصوصیات زمین، مسائل اجرایی و هزینه‌های مرتبط با آن انتخاب می شود (Bell, 1993). خاک‌های رسی به دلیل ظرفیت باربری کم و پتانسیل بالای تغییر حجم، محدودیت‌های زیادی را در طراحی و ساخت فونداسیون سازه‌ها، زیرساخت‌هایی مانند خاکریزهای راه آهن و جاده، پایه‌های پل و دیوارهای حائل ایجاد می‌کنند (Horpibulsuk et al., 2012; Jamsawang et al., 2017; Bağrıaçık et al., 2025). یکی از روش‌های رایج جهت بهبود خصوصیات مهندسی این خاک‌ها، تثبیت شیمیایی با مواد

قبل از هرگونه توسعه یا احداث سازه‌های عمرانی، اطلاعات در رابطه با نوع خاک محل، کاربری فعلی و آینده منطقه، مقاومت مورد نیاز برای تحمل بار سازه‌های سطحی و هزینه تخمینی پروژه ضروری است. در صورتی که خاک ساختگاه مورد نظر دارای خصوصیات مهندسی مطلوب نباشد، یا باید با خاک مناسب جایگزین شود (که صرفه اقتصادی ندارد) و یا جهت رسیدن به پارامترهای مورد نیاز به سازی شود (Ikeagwani and Nwonu, 2019). فرایند به سازی زمین به چهار دسته کلی تقسیم می شود: به سازی مکانیکی (مانند تراکم سطحی و تراکم دینامیکی)، به سازی هیدرولیکی (مانند زهکشی و پیش تحکیم)، به سازی فیزیکی و شیمیایی (مانند اختلاط فیزیکی یا تزریق

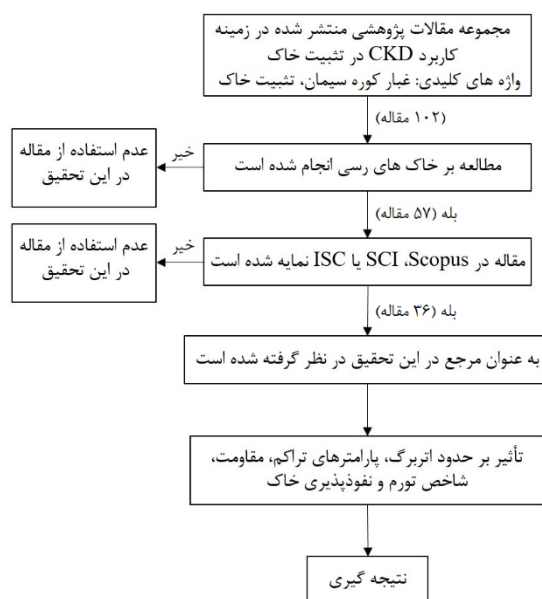
و پرکننده معدنی در آسفالت قابل استفاده می‌کند (Udoeyo and Hyee, 2002; Modarres et al. 2015; Rubinos and Spagnoli, 2018; Jahanbakhsh et al., 2020). از طرفی وجود آهک آزاد (CaO)، غبار کوره سیمان را به ماده‌ای با پتانسیل بالا برای تثبیت خاک‌ها تبدیل کرده است (Miller and Azad, 2000; Peethamparan et al., 2008). اهداف اصلی این مقاله مروری عبارتند از: (۱) ارائه یک مرور جامع از کاربرد CKD در تثبیت خاک‌های رسی (۲) ارزیابی اثربخشی استفاده از CKD به عنوان تثبیت‌کننده بر پارامترهای ژئوتکنیکی مختلف خاک‌های رسی (۳) بررسی نقش افزودنی‌های ثانویه در ترکیب با CKD جهت تثبیت خاک. ارزیابی تأثیر غبار کوره سیمان بر هر یک از خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های رسی به صورت مجزا و با جزئیات و همچنین تأثیر نقش افزودنی‌های ثانویه در هیچ یک از مقالات مروری پیشین بررسی نشده است. در ابتدا، شرح مختصری از فرایند تولید و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی غبار کوره سیمان ارائه می‌شود. سپس تأثیر CKD بر حدود اتربرگ، پارامترهای تراکم، مقاومت فشاری محصور نشده (UCS)، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)، شاخص تورم و نفوذپذیری خاک‌های رسی به تفصیل مورد بحث قرار می‌گیرد. در پایان، خلاءهای تحقیقاتی و محدودیت‌های کاربرد CKD شناسایی شده‌اند.

۲- روش تحقیق

برای این مقاله مروری، مطالعات مربوط به تثبیت خاک با استفاده از غبار کوره سیمان، که در پایگاه‌های معتبر (SCI, Scopus) و ISC نمایه شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در ابتدا روند تولید و خصوصیات شیمیایی و فیزیکی CKD که توسط محققان مختلف مورد استفاده قرار گرفته است، ارائه گردید. سپس به تحلیل و بررسی نتایج منتشر شده مربوط به تأثیر CKD بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های رسی پرداخته شد. روش گردآوری و انتخاب مقالات تحقیقاتی در شکل ۱ نشان داده شده است.

افزودنی مانند سیمان پرتلند و آهک است. با این حال، به دلیل مسائل زیست‌محیطی مرتبط با انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولید سیمان پرتلند و آهک، مصرف انرژی، ملاحظات حفاظت از منابع تجدیدناپذیر و هزینه بالای تولید، استفاده از این مواد مطلوب نیست (Bing et al., 2023; Ghavami et al., 2021c). بررسی دقیق اثرات زیست‌محیطی نشان داده است که تولید هر تن سیمان تقریباً یک تن کربن دی‌اکسید و سایر گازهای گلخانه‌ای منتشر می‌کند (Ige et al., 2024) و بسته به نوع سیمان و فرایند تولید، حدود ۶۰ تا ۱۳۰ کیلوگرم نفت کوره یا معادل آن و حدود ۱۱۰-۱۶۰ کیلووات ساعت انرژی الکتریکی نیاز دارد (Feiz et al., 2015; El-Attar et al., 2017). علاوه بر این، صنعت سیمان به دلیل تولید گرد و غبار در فرایند تولید، سلامت انسان و محیط زیست را تهدید می‌کند (El-Attar et al., 2017). بنابراین، تثبیت خاک بدون سیمان پرتلند با استفاده از مواد زائد یا پسماند صنعتی به عنوان دستیابی به یک راه حل پایدار و سازگار با محیط زیست مورد توجه محققین قرار گرفته است (Yoobanpot et al., 2017; Ghavami, 2024; Almuaythir et al., 2024; Al Jaber et al., 2024).

غبار کوره سیمان به عنوان یک محصول جانبی تولید سیمان پرتلند، در محل خروجی گازهای آزاد شده کوره توسط سیکلون، فیلترهای پارچه‌ای یا رسوب‌دهنده الکترواستاتیکی جمع‌آوری می‌شود. در صورت کم بودن مواد قلیایی در CKD، ممکن است به عنوان جزئی از ماده خام به فرایند تولید سیمان بازگردانده شود. در غیر این صورت به عنوان ماده زائد صنعتی در محل‌های دفن زباله مدفون می‌شوند که بر محیط زیست و آب‌های زیرزمینی تأثیر منفی دارد و با چشم‌انداز پایداری سازگار نیست. از این رو محققین تلاش کرده‌اند تا با استفاده از CKD به جای سیمان پرتلند، با کاهش تقاضای سیمان و حجم زباله‌های صنعتی به محیط زیست پایدار و سالم‌تر برای نسل آینده کمک کنند. قلیابیت بالا و ریزی ذرات، علاوه بر خواص سیمانی آن، این ماده را برای کاربردهای مختلف از جمله تولید بلوک‌های بتنی، مانع هیدرولیکی در پوشش محل‌های دفن زباله



شکل ۱. روش گردآوری و انتخاب مقالات منتشر شده

۳- غبار کوره سیمان

دمای حدود ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد، یک سری واکنش های شیمیایی موجب ترکیب مصالح شده و گلوله های کلینکر سیمانی شکل می گیرد. کلینکر از انتهای پایینی کوره تخلیه شده و به انواع مختلف خنک کننده ها منتقل می شود تا به دمای مناسب برسد. کلینکر خنک شده با گچ ترکیب شده و به صورت پودر ریز خاکستری آسیاب می شود. این پودر خاکستری ریز، سیمان پرتلند است. غبار کوره سیمان در مرحله دوم فرآیند تولید سیمان به دست می آید. ذرات ریز و خشک که توسط گاز خروجی از کوره سیمان حمل و توسط دستگاه های کنترل آلودگی هوا جذب می شوند، غبار کوره سیمان (CKD) نام دارد. تولید CKD تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله مواد اولیه مورد استفاده، نوع سیستم جمع آوری غبار، مشخصات شیمیایی سیمان تولیدی، نوع کوره و نوع سوخت قرار می گیرد (Abdelgader et al., 2022).

CKD ها در درجه اول به عنوان وسیله ای برای کنترل تجمع عناصر مشخص (سدیم، پتاسیم، کلرید و گوگرد) و ترکیبات آنها در سیستم کوره حذف می شوند تا غلظت قلیا به حداقل برسد. با تکنیک های مدرن تولید، از نظر فنی می توان بخش عمده CKD را به چرخه تولید کلینکر بازگرداند. با این حال، به دلیل محدودیت های موجود در محتوای قلیایی سیمان، این کار انجام نمی شود. اکثر استانداردهای بین المللی، محتوای قلیایی سیمان را به کمتر از ۰٫۶ درصد محدود می کنند.

صنعت سیمان از صنایع اساسی و رو به رشد در ایران است که نقش محوری در توسعه زیرساخت ها و ساخت و ساز در کشور دارد. ایران با ۸۸ کارخانه سیمان و تولید حدود ۶۵ میلیون تن سیمان در سال ۲۰۲۳، پس از چین، هند، ویتنام، ایالات متحده آمریکا و ترکیه، رتبه ششم در تولید سیمان را به خود اختصاص داده است (U.S. Geological Survey, 2024). صنعت سیمان تعداد محدودی محصول جانبی دارد که در فرآیند تولید حاصل می شوند. حجم ترین محصول جانبی تولید شده، غبار کوره سیمان (CKD) است. سه مرحله اصلی شامل ۱- استخراج مواد اولیه، ۲- ترکیب و کلینکرسازی و ۳- آسیاب و توزیع در فرآیند تولید سیمان وجود دارد که به صورت شماتیک در شکل ۲ ارائه شده است. پس از رسیدن مواد اولیه (شامل سنگ آهک، رس، ماسه و سنگ آهن) به کارخانه سیمان، مصالح برای ایجاد سیمانی با ترکیب شیمیایی خاص، متناسب سازی می شوند. دو روش مختلف خشک و مرطوب برای تولید سیمان پرتلند وجود دارد. در فرآیند خشک، مواد خام با نسبت های مختلف مخلوط، آسیاب و به پودر تبدیل و در حالت خشک به کوره تغذیه می شوند. در فرآیند مرطوب، با افزودن آب به مواد اولیه با نسبت مناسب، دوغاب تشکیل می شود. سپس عملیات آسیاب و مخلوط کردن انجام می گردد. مخلوط مواد اولیه به انتهای بالایی یک کوره استوانه ای مایل و چرخان وارد می شود. در داخل کوره، با رسیدن مواد اولیه به

Shoaei et al., 2017; Badv and Hoseinpour Lonbar, 2018; Amouzadeh Omran and Modarres, 2018; Ghavami et al., 2021b; Sharifi Teshnizi et al., 2022). توزیع اندازه ذرات CKD ها می تواند به طور قابل توجهی متفاوت باشد و قطر آنها از ۱ تا ۳۰۰ میکرومتر متغیر است. ۵۰ تا ۹۰ درصد از CKD ها قطری کمتر از ۱۰ میکرومتر دارند که در محدوده قابل تنفس برای انسان است (Peethamparan, 2006).

(Maslehuddin et al., 2008). اگر تولید CKD حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد از تولید کلینکر یا سیمان تخمین زده شود (Siddique and Rajor, 2012)، سالانه حدود ۱۰ تا ۱۳ میلیون تن CKD در ایران تولید می شود. CKD عمدتاً از اکسید کلسیم، سیلیکا، آلومینا، اکسید آهن، کلریدها و سولفات های سدیم و پتاسیم، اکسیدهای فلزی و سایر نمک ها تشکیل شده است. محدوده ترکیبات شیمیایی CKD های جمع آوری شده از پنج کارخانه سیمان در ایران در جدول ۱ ارائه شده است

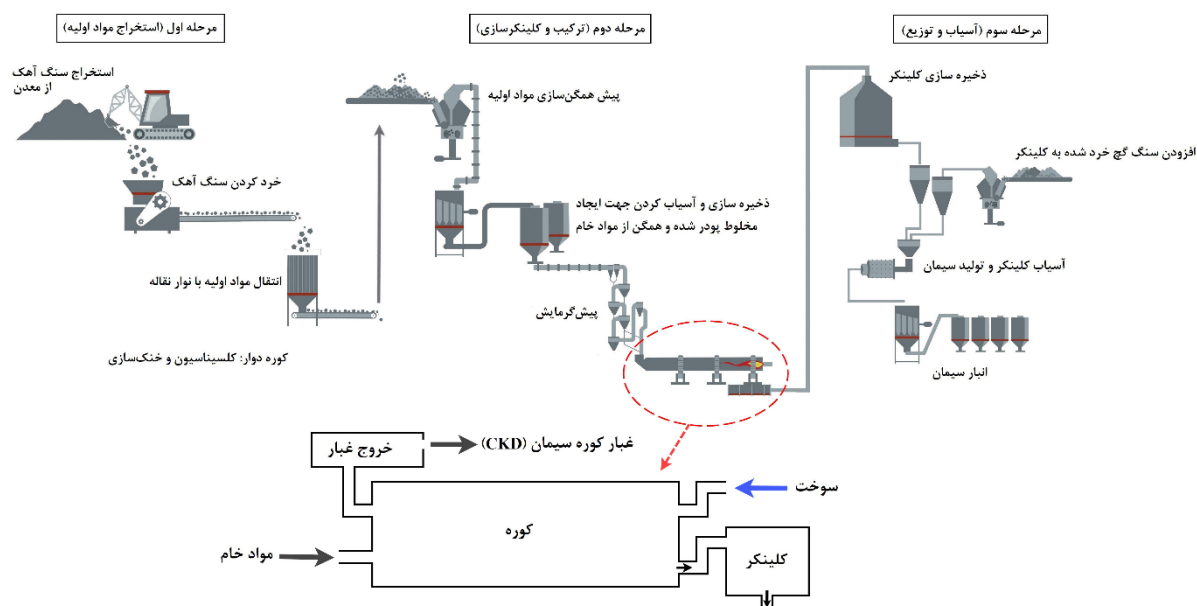
جدول ۱. ترکیبات شیمیایی CKD های جمع آوری شده از پنج کارخانه سیمان در ایران

ترکیب	محدوده مقدار (%)	میانگین (%)	انحراف معیار
CaO	40.1–78	54.44	15.49
SiO ₂	6.7–15.26	11.39	2.99
Al ₂ O ₃	1.3–3.74	3.03	0.92
Fe ₂ O ₃	1.75–2.2	2.00	0.18
MgO	0.68–2.43	1.41	0.68
SO ₃	0.15–1.6	0.72	0.60
K ₂ O	0.44–4.67	2.25	1.87
Na ₂ O	0.18–2.28	0.69	0.85

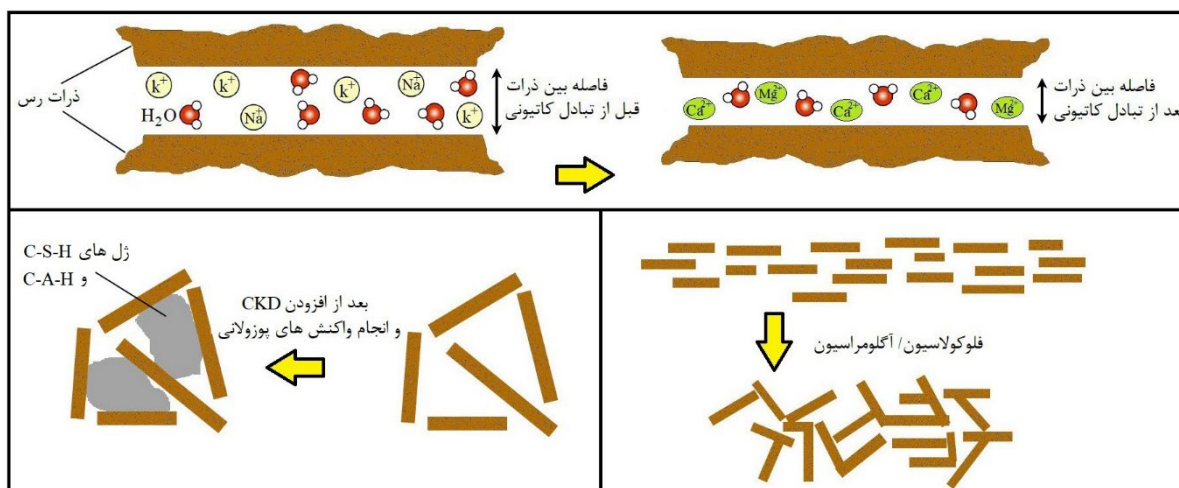
۴- تأثیر غبار کوره سیمان بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک

اندازه ذرات ریزتر و وجود مقدار زیادی آهک آزاد (CaO)، این ماده را به یک گزینه بالقوه برای جایگزینی تثبیت کننده های سستی خاک مانند سیمان پرتلند و آهک تبدیل می کند.

همان طور که پیش تر ذکر شد ترکیبات CKD ها مشابه سیمان پرتلند است و شامل آلومینا، سیلیس، اکسید کلسیم، قلیاها و سولفات ها هستند. با این حال، مقدار قلیاها و سولفات ها در CKD ها در مقایسه با سیمان به طور قابل توجهی بیشتر است.



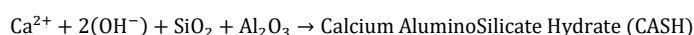
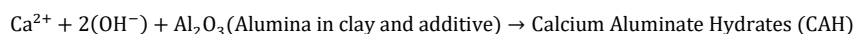
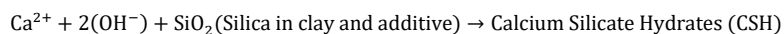
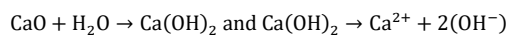
شکل ۲. طرح شماتیک مراحل مختلف فرآیند تولید سیمان پرتلند



شکل ۳. مکانیزم های تثبیت خاک

است. این فرآیند موجب تشکیل کلوخه های بزرگتر از ذرات رس شده و در نتیجه مقاومت کوتاه مدت را افزایش می دهد. تبادل کاتیونی، فلوکولاسیون / آگلومراسیون ذرات خاک را تسهیل می کند. اندرکنش مواد قلیایی در CKD با خاک در حضور آب، محیطی با pH بالا ایجاد می کند و منجر به افزایش حلالیت و واکنش پذیری سیلیکا و آلومینا در خاک رس می شود. از طرفی با افزودن CKD حاوی CaO به خاک رس با برهم کنش بین آب و CaO، یون های Ca^{2+} و OH^- به مجموعه وارد می شود. با واکنش سیلیکا و آلومینا با این یون های آزاد شده از CKD، ترکیبات سیمانی مانند کلسیم سیلیکات هیدرات (C-S-H)، کلسیم آلومینات هیدرات (C-A-H) و کلسیم آلومینا سیلیکات هیدرات (C-A-S-H) تشکیل می گردد. احتمال تشکیل کانی های حاوی سولفات، مانند اترینگایت و گچ، در رس های تثبیت شده با CKD وجود دارد.

برای اولین بار در سال ۱۹۷۱ کاربرد CKD در تثبیت خاک های رسی بررسی گردید (McCoy and Kriner, 1971). در اندرکنش بین خاک و CKD در طول تثبیت، بسته به خصوصیات CKD و خاک، مکانیزم های مختلف از جمله تبادل کاتیونی، فلوکولاسیون / آگلومراسیون و واکنش های پوزولانی، نقش دارند (شکل ۳). اکسیدهای قلیایی مانند CaO و MgO با آب واکنش می دهند و یون های Ca^{2+} و Mg^{2+} را تشکیل می دهند که از طریق تبادل یونی جایگزین یون های K^+ و Na^+ در ذرات رس می شوند. این فرآیند، ضخامت لایه مضاعف و فاصله بین ذرات خاک را کاهش داده و باعث تجمع ذرات رس می شود. با این حال، این امر به ظرفیت تبادل کاتیونی خاک رس مورد نظر و در دسترس بودن یون های کلسیم از CKD بستگی دارد. احتمالاً این مکانیزم در خاک های سدیمی اهمیت بیشتری دارد. فلوکولاسیون / آگلومراسیون به تبدیل ذرات رس از یک ساختار مسطح و موازی به یک ساختار تصادفی تر با تماس لبه ها و سطوح اشاره دارد که در شکل ۳ نشان داده شده



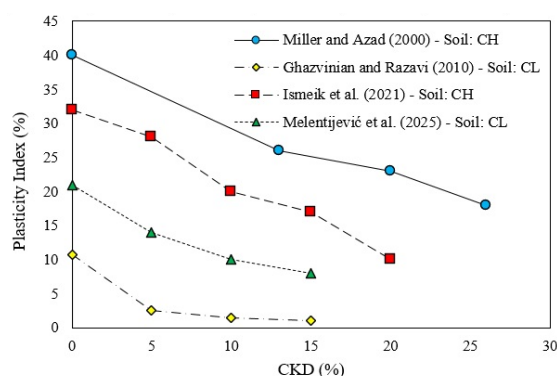
۴-۱- حدود اتربرگ

در شرایط رطوبتی مختلف ارزیابی کنند که برای طراحی پی ها، خاکریزها و سایر پروژه های عمرانی حائز اهمیت است. شاخص

حدود اتربرگ در مهندسی ژئوتکنیک برای طبقه بندی خاک ها استفاده می شود و به مهندسین کمک می کند تا رفتار خاک ها را

پلاستیسیته^۴ خاک (PI) تفاوت مقدار حد روانی^۵ (LL) و حد خمیری^۶ (PL) است ($PI=LL-PL$). روند تغییرات حدود اتزبرگ خاک‌های رسی با افزودن CKD بسته به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و CKD می‌تواند متفاوت باشد. رس‌های کلسیم‌دار هنگام تثبیت با CKD، تمایل به افزایش LL دارند، در حالی که در رس‌های با کاتیون‌های ظرفیت پایین‌تر مانند سدیم، با افزایش مقدار آهک آزاد موجود در CKD، تبادل کاتیونی قابل توجه خواهد بود و در نتیجه ضخامت لایه مضاعف و LL کاهش می‌یابد (Miller and Azad, 2000). افزایش حد روانی با افزودن CKD در مطالعات Sreekrishnavilasamet (2007) و al. (2020) و Ghavami et al. (2021) و Abdou Saidou et al. (2025) مشاهده گردید. در رابطه با حد خمیری خاک تثبیت‌شده با CKD نیز هر دو روند افزایش و کاهش گزارش شده است (Ismail and Belal, 2016; Amadi and

Os, 2018; Ogila, 2021). مکانیزم‌های دخیل در کاهش مقدار PI خاک پس از تثبیت با CKD، عبارتند از: ۱- تبادل کاتیون‌ها که به فلوکولاسیون ذرات رس و تغییر بافت خاک کمک کرده و باعث کاهش ضخامت لایه مضاعف می‌شود، ۲- واکنش پوزولانی بین خاک و CKD و ایجاد ترکیبات سیمانی که با چسبندگی ذرات خاک به کاهش مقدار PI کمک می‌کند. کاهش شاخص پلاستیسیته خاک تثبیت‌شده با CKD توسط بسیاری از محققین تأیید شده است (Al-Refeai and Al-Karni, 1999; Parsons et al., 2004; Eisa et al., 2022; Melentijević et al., 2025). از آنجا که کاهش PI منجر به بهبود کارایی خاک می‌شود، افزودن غبار کوره سیمان موجب کارایی بهتر خاک‌ها در حین ساخت خواهد شد. تغییرات شاخص پلاستیسیته خاک‌های رسی با افزودن مقادیر مختلف CKD در شکل ۴ ارائه شده است.



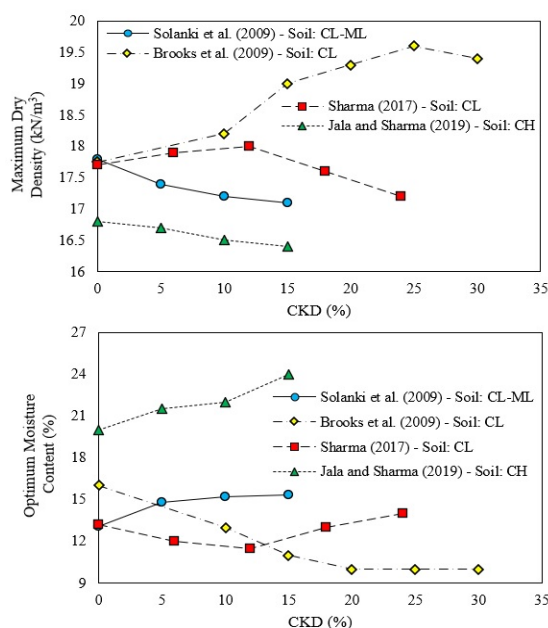
شکل ۴. تغییرات شاخص پلاستیسیته خاک‌های رسی با افزودن CKD.

Sharma et al., 2017). ساختار فلوکوله‌شده خاک رس به دلیل حضور غبار کوره سیمان، در برابر تراکم مقاومت می‌کند و با ایجاد حفرات بزرگ‌تر در ماتریس خاک منجر به کاهش MDD می‌شود. از طرفی، وجود این حفرات نیاز به آب را جهت تراکم افزایش داده و در نتیجه OMC افزایش می‌یابد. تفاوت مقدار چگالی مخصوص دانه‌های خاک و CKD نیز از پارامترهای تأثیرگذار بر دانسیته خشک حداکثر مخلوط خاک-CKD است که می‌تواند موجب کاهش یا افزایش MDD مخلوط شود (Ismail and Belal, 2016). ریزی نسبی ذرات CKD و خاک و پر شدن فضای خالی ساختار خاک با ذرات CKD نیز بر تغییرات دانسیته خشک حداکثر مؤثر است (Sharma et al., 2017). Amadi and Osu (2018) نشان دادند که واکنش‌های پوزولانی وابسته به زمان با افزایش دوره عمل‌آوری و تولید

۴-۲- پارامترهای تراکم

مشخصه‌های تراکمی-دانسیته خشک حداکثر^۷ (MDD) و درصد رطوبت بهینه^۸ (OMC)، از پارامترهای مؤثر بر خصوصیات مهندسی خاک مانند مقاومت، تراکم‌پذیری و نفوذپذیری هستند. رفتار تراکمی خاک‌های رسی در ترکیب با CKD نسبتاً بحث‌برانگیز است. برخی مطالعات (Sariosseiri and Muhunthan, 2008; Amadi and Osu, 2018; Ghavami et al., 2020; Ismeik et al., 2021) کاهش MDD و افزایش OMC با افزودن CKD را گزارش کرده‌اند. اما نتایج برخی تحقیقات (Brooks et al., 2009; Rimal et al., 2019; Abdou Saidou et al., 2025) روند دیگری را نشان می‌دهد. افزایش درصد رطوبت بهینه می‌تواند مرتبط با ماهیت آب‌دوست بودن CaO در CKD باشد (Baghdadi et al., 1995;)

محصولات سیمانی، منجر به کاهش میزان آب مورد نیاز می شود و در نهایت دانسیته خشک خاک تثبیت شده را افزایش می دهد. تغییرات پارامترهای تراکمی خاک های رسی با افزودن مقادیر مختلف CKD در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۵. تغییرات پارامترهای تراکمی خاک های رسی با افزودن CKD

۳-۴- مقاومت فشاری محصور نشده و نسبت باربری کالیفرنیا

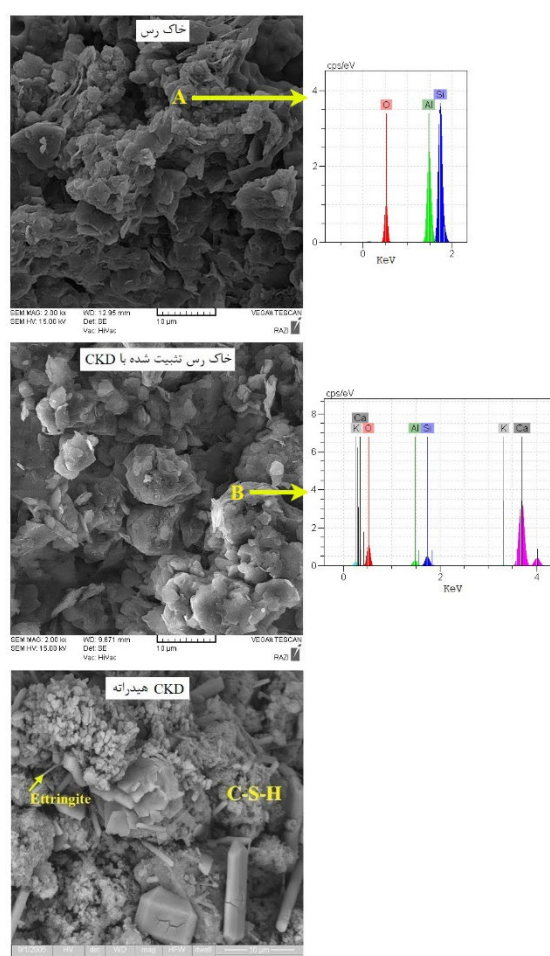
طراحی، ساخت و ارزیابی عملکرد در مهندسی ژئوتکنیک مستلزم تعیین خصوصیات مقاومتی خاک است که جهت طبقه بندی، توصیف و شناسایی خاک طبق استانداردهای طراحی استفاده می شود. اساساً، طراحی های فونداسیون مربوط به بستر روسازی به برخی از خصوصیات مقاومتی اولیه شامل نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) و مقاومت فشاری محصور نشده (UCS) بستگی دارد (Onyelowe et al., 2021).

برای اولین بار در سال ۱۹۷۱ نشان داده شد که استفاده از CKD ها با ترکیب شیمیایی مناسب و در یک مقدار مشخص (۱۰٪) تأثیر مثبت بر مقاومت خاک دارد (McCoy and Miller, 1971). تأثیر CKD بر مقاومت فشاری خاک (PI) با افزایش CKD (Miller and Azad, 2000) افزایش می یابد. در تحقیقی دیگر، مقاومت فشاری خاک رسی با ۱۵ درصد CKD پس از ۲۸ روز عمل آوری، حدود ۶ برابر نسبت به خاک تثبیت نشده بهبود یافت (Solanki et al., 2009). Sharma (2017) با انجام آزمایش بر خاک رسی تثبیت شده با مقادیر مختلف CKD مشاهده کرد که بیشترین افزایش UCS تا

۱۲ درصد CKD است به طوری که مقاومت خاک پس از ۲۸ روز عمل آوری از ۱۶۸٫۲ به ۲۲۵۰ کیلوپاسکال رسید. همچنین نرخ رشد مقاومت فشاری با افزایش دوره عمل آوری تا ۲۸ روز کاهش یافت و پس از ۶۰ روز تقریباً ثابت ماند. افزایش UCS خاک با افزودن غبار کوره سیمان در مطالعات انجام شده توسط دیگر محققین نیز تأیید شده است (Peethamparan et al., 2008; Badv and Hoseinpour Lonbar, 2018; Rimal et al., 2019; Ogila, 2021). این افزایش مقاومت ناشی از محصولات سیمانی تولید شده (C-S-H, C-A-H و C-A-S-H) در نتیجه واکنش های پوزولانی است. با ایجاد این ترکیبات سیمانی، حجم فضاهای خالی خاک کاهش یافته و با اتصال ذرات خاک به هم یک ماتریس منسجم تر ایجاد می شود (شکل ۶). در آنالیز طیف سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDS) پیک هایی برای اکسیژن (O)، آلومینیوم (Al) و سیلیس (Si) در خاک دیده می شود که نشان دهنده غلظت بیشتر این عناصر در خاک است. در طیف EDS مربوط به خاک تثبیت شده با CKD می توان مشاهده کرد که یک پیک کلسیم ظاهر می شود. مقدار بالای Ca در این محل، می تواند ناشی از وجود C-S-H باشد.

جدول ۲. تأثیر CKD بر مقاومت فشاری خاک‌های رسی

مرجع	طبقه‌بندی خاک	مقاومت اولیه خاک	مقدار بیهنه CKD	بیشترین درصد افزایش UCS با افزودن CKD
Sariosseiri and Muhunthan (2008)	CL	150 kPa	15%	433% (7 days)
Solanki et al. (2009)	CL-ML	227 kPa	15%	638% (28 days)
Sharma (2017)	CL	168.2 kPa	12%	1359 % (60 days)
Rimal et al. (2019)	CL	31.8 kPa	10%	3094% (28 days)
Jala and Sharma (2019)	CH	88.3 kPa	15%	58% (28 days)
Cui et al. (2019)	CL	725 kPa	27%	187% (90 days)
Ghavami et al. (2020)	CL	129 kPa	15%	1545% (28 days)
Abdi and Dabiri (2020)	CL	70 kPa	30%	210% (28 days)
	CH	50 kPa	30%	300% (28 days)
Ismeik et al. (2021)	CH	350 kPa	20%	1328% (28 days)
Almuaythir and Abbas (2023)	CH	231.8 kPa	8%	548% (130 days)
Abdou Saidou et al. (2025)	CH	95.7 kPa	8%	234% (28 days)



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از خاک رس و خاک رس تثبیت‌شده با CKD (Ghavami et al., 2021b)

و CKD هیدراته (Peethamparan et al., 2008)

اترینگایت (شکل ۶) ممکن است در بهبود مقاومت خاک نقش داشته باشند (Peethamparan et al., 2008). خلاصه نتایج تعدادی از مطالعات انجام‌شده بر UCS خاک‌های رسی تثبیت‌شده با CKD در جدول ۲ ارائه شده است. با انجام

CKD با مقدار آهک آزاد بالا از نظر بهبود مقاومت عملکرد بهتری دارد (Sreekrishnavilasam et al., 2007;). علاوه بر ماهیت سیمانی CKD‌های با مقدار آهک آزاد بالا، سایر محصولات هیدراسیون مانند

ایجاد محصولات سیمان‌تاسیون نسبت داد. علاوه بر این، واکنش CKD با اجزای خاک، ساختاری شبیه به ماسه ایجاد می‌کند که در مقایسه با رس، پتانسیل تورم پایینی دارد. با این حال، در مقادیر بالاتر CKD ممکن است مقداری از CKD به صورت واکنش نداده (آزاد) باقی بماند. از آنجا CKD آزاد، پتانسیل تورم دارد موجب افزایش نسبت تورم می‌شود. بنابراین، این مطالعه ۲۰ درصد CKD را به عنوان مقدار بهینه پیشنهاد کرد.

۴-۵- نفوذپذیری

ارزیابی نفوذپذیری خاک‌های رسی تثبیت شده با CKD در دوره‌های عمل‌آوری ۷ تا ۲۸ روز نشان داده است که مقدار نفوذپذیری با افزایش مدت عمل‌آوری کاهش می‌یابد (Parsons et al., 2004). در تحقیقی دیگر ضریب نفوذپذیری خاک رسی تثبیت‌شده با ۵ تا ۲۰ درصد CKD در دوره‌های عمل‌آوری ۱ تا ۹۰ روزه با استفاده از آزمایش هد افتان اندازه‌گیری شد (Alhassani et al., 2024). مشاهده گردید که غبار کوره سیمان، ضریب نفوذپذیری را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. اما افزایش مقدار CKD به بیش از ۱۵ درصد هیچ تأثیری بر کاهش ضریب نفوذپذیری ندارد. همچنین مشخص شد که هفت روز عمل‌آوری برای کاهش نفوذپذیری به کمترین مقدار ممکن کافی است و پس از آن کاهش قابل‌توجهی مشاهده نمی‌شود. منافذ موجود در خاک‌های رسی شامل منافذ بین ذرات و منافذ درون ذرات هستند که اندازه منافذ بین ذرات بزرگتر از منافذ درون ذرات است (Nagaraj and Miura, 2001). محصولات سیمانی تولید شده در اثر واکنش‌های پوزولانی ناشی از افزودن CKD منافذ بین ذرات را پر کرده و با اتصال ذرات کوچک به هم ذرات بزرگتری تشکیل می‌دهد (شکل ۶) و از این رو منجر به کاهش ضریب نفوذپذیری خاک می‌شود (Quang and Chai, 2015).

۴-۶- نقش افزودنی‌های ثانویه در ترکیب با CKD

استفاده از مصالح پوزولانی در ترکیب با مصالح سیمانی در تثبیت خاک‌ها می‌تواند به بهبود خصوصیات مکانیکی خاک کمک کند. از این رو تأثیر مصالح پوزولانی مانند خاکستر بادی^{۱۱} (FA) و خاکستر پوسته برنج^{۱۱} (RHA) در ترکیب با CKD بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های رسی بررسی شده است (Anwar Hossain, 2011; Yoobanpot et al., 2017; Al-)

آزمایش‌های UCS و CBR بر خاک‌های رسی مشاهده شده است که روند تغییرات نسبت باریک‌ری کالیفرنیا در مخلوط خاک-CKD مشابه با تغییرات مقاومت فشاری است (Sharma, 2017; Jala and Sharma, 2019; Ghavami et al., 2020; Abdou Saidou et al., 2025). با ارزیابی تأثیر CKD بر خاک بستر ضعیف یک بزرگراه در عراق (CBR برابر با ۳٪) مشخص شد که با افزودن ۳۰ درصد CKD به خاک رس، مقدار CBR پس از ۷، ۱۴ و ۲۸ روز عمل‌آوری به ترتیب به ۳۷، ۴۴ و ۴۶ درصد می‌رسد (Mosa et al., 2017). از آنجا که افزایش زمان عمل‌آوری فرایند ساخت روسازی را به تأخیر می‌اندازد، با توجه به اختلاف ناچیز مقادیر CBR پس از ۱۴ و ۲۸ روز عمل‌آوری، مدت عمل‌آوری ۱۴ روز به عنوان زمان عمل‌آوری بهینه پیشنهاد شد. از آنجا که بخش عمده‌ای از فرایند سیمان‌تاسیون در چند ساعت اول رخ می‌دهد، با تأخیر در تراکم نمونه‌ها، بخش عمده‌ای از انرژی تراکم صرف شکست پیوندهای سیمانی می‌شود که می‌تواند MDD را کاهش دهد. چنین کاهش تأثیر مخرب بر UCS و CBR نمونه تثبیت‌شده با CKD دارد (Brooks et al., 2009).

۴-۴- شاخص تورم

(Sreekrishnavilasam et al., 2007) چند نوع CKD با مقادیر مختلف آهک آزاد را برای بهسازی خاک ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که ۱۵ درصد CKD با آهک آزاد بالا کرنش تورمی خاک رس را از ۰٫۷ به ۰٫۱ درصد کاهش می‌دهد. در تحقیقی دیگر، Parsons et al. (2004) با مقایسه افزودنی‌های شیمیایی مختلف مشاهده کردند که در آزمایش تورم، نمونه‌های تثبیت‌شده با CKD در مقایسه با نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک، خاکستر بادی و سیمان پرتلند عملکرد بهتری دارند. تأثیر مثبت غبار کوره سیمان بر کاهش شاخص تورم در مطالعات دیگر نیز تأیید شده است (Ogila et al., 2017; Eisa et al., 2022; Abdou Saidou et al., 2025; Melentijević et al., 2025). ارزیابی تأثیر افزودن ۵ تا ۳۰ درصد CKD بر نسبت تورم خاک رسی نشان داد که نسبت تورم برای همه مقادیر CKD در دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز کمتر از نمونه طبیعی خاک است (Mosa et al., 2017). با این حال، روند کاهش نسبت تورم تا ۲۰ درصد CKD ادامه می‌یابد، اما با افزایش بیشتر مقدار CKD شروع به افزایش می‌کند. کاهش نسبت تورم را می‌توان به افزایش پیوند بین ذرات خاک به دلیل

عمل‌آوری، به ترتیب ۲۰ و ۱۸ درصد افزایش داد. این افزایش مقاومت به دلیل سطح ویژه بالای میکروسیلیس و نانوسیلیس و به دنبال آن واکنش‌پذیری بالای آنهاست که علاوه بر تسریع واکنش‌های پوزولانی، باعث تشکیل ژل C-S-H اضافی می‌شود. خاک تثبیت‌شده با افزودنی‌های شیمیایی به دلیل سیمانته شدن، رفتار بسیار شکننده‌ای از خود نشان می‌دهد. در صورت تخلخل بالای خاک، مقاومت افزایش یافته ناشی از سیمانته شدن با افزایش تنش به خصوص تحت بارهای دینامیکی و ضربه‌ای به شدت کاهش می‌یابد. به عنوان یک راهکار، استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن در ترکیب با افزودنی‌های شیمیایی برای افزایش شکل‌پذیری خاک تثبیت‌شده پیشنهاد شده است (Tang et al., 2007; Zhao et al, 2020). مشاهده شده است که با افزودن ۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت فشاری ترکیب بهینه خاک-CKD از ۲۴۵۵ به ۲۸۰۰ کیلوپاسکال افزایش می‌یابد (Sharma, 2017). در تحقیقی دیگر نشان داده شد که هنگام گسیختگی نمونه حاوی CKD و الیاف پلی‌پروپیلن، الیاف‌ها به طور مؤثری از توسعه بیشتر ترک‌های کششی و تغییر شکل نمونه جلوگیری می‌کنند (Ghavamini et al., 2021a). مطالعات انجام شده توسط Gul and Mir (2022) تأیید می‌کند که مقاومت باقی مانده در نمونه‌های خاک-CKD-الیاف شیشه در مقایسه با نمونه‌های خاک-CKD بیشتر است که به معنای تغییر شکل‌های کمتر و کنترل‌شده پس از گسیختگی است.

تثبیت‌شده تأثیر منفی داشته باشد. بنابراین نیاز به تناسب دقیق و طراحی مخلوط بهینه خاک-CKD است. به علاوه، اگرچه براساس مطالعات انجام‌شده، نتایج کوتاه‌مدت امیدوارکننده است، انجام مطالعات تحت شرایط محیطی و بارگذاری‌های مختلف برای تأیید عملکرد CKD در بلندمدت ضروری است. استفاده از CKD به عنوان یک ماده زائد صنعتی از دیدگاه زیست‌محیطی دارای مزایایی مانند کاهش مصرف سیمان پرتلند، کاهش حجم CKD انباشته‌شده در محیط و به دنبال آنها کاهش خطرات آلودگی هوا و آب است. اما خطرات زیست‌محیطی مربوط به ترکیبات شیمیایی موجود در آن و نشت این ترکیبات در پروژه‌های عمرانی به خصوص تثبیت خاک بستر راه‌ها باید مورد توجه قرار گیرد. آب‌های زیرزمینی یا آب باران ممکن

(Bakri et al., 2022). نتایج نشان داد که ۱۳ درصد CKD جایگزینی ۲۰ درصد FA با CKD منجر به مقاومت بیشتر خاک رس تثبیت‌شده با CKD در دوره عمل‌آوری ۹۰ روزه می‌شود (Yoobanpot et al., 2017). در این حالت ذرات خاک ستربادی به همراه توده‌های C-S-H توزیع شده و فضای خالی بین ذرات رس را پر می‌کنند. این امر منجر به کاهش فضای خالی در ساختار رس و در نتیجه متراکم‌تر شدن آن می‌گردد. با افزایش مدت عمل‌آوری از ۳ تا ۹۰ روز تولید بیشتر محصولات سیمانی باعث افزایش قابل توجه مقاومت می‌شود. Adeyanju et al. (2020) مقدار بهینه جهت ترکیب RHA و CKD برای تثبیت خاک رس را به ترتیب ۸ و ۱۰ درصد پیشنهاد کردند که منجر به کاهش حداقل ۶۰ هزار دلاری هزینه ساخت در هر ۲۰۰ متر جاده خواهد شد. یکی دیگر از مصالح پوزولانی که ترکیب آن با CKD موجب بهبود تثبیت شیمیایی خاک می‌شود خاکستر باگاس نیشکر^{۱۲} (SCBA) است. به طوری که ترکیب ۱۰ درصد SCBA با ۶ درصد CKD موجب افزایش حدود ۹۰ درصد مقاومت فشاری ۲۸ روزه و ۱۲۰ درصدی CBR ۷ روزه نمونه حاوی ۶ درصد CKD شد (Abdou Saidou et al., 2025). اثربخشی نانوسیلیس (تا یک مقدار مشخص) و میکروسیلیس بر خاک رسی تثبیت‌شده با CKD تأیید شده است (Ghavamini et al. 2021c). یک درصد نانو سیلیس و ۱۵ درصد میکروسیلیس، مقاومت فشاری خاک تثبیت‌شده با ۱۵ درصد غبار کوره سیمان را پس از ۲۸ روز

محدودیت‌های کاربرد CKD

غبار کوره سیمان به دلیل ذرات بسیار ریز به راحتی می‌تواند در هوا پخش شده و توسط افراد استنشاق شود. این ذرات اغلب حاوی سیلیس، آهک و سایر ترکیبات بالقوه مضر هستند که خطرات جدی برای سلامتی انسان ایجاد می‌کنند. قرار گرفتن طولانی مدت در معرض CKD می‌تواند منجر به مشکلات تنفسی، سوزش پوست به دلیل pH بالا، سوزش و التهاب چشم و سایر بیماری‌های جدی شود. از این رو اقدامات کنترلی مؤثر برای محافظت از سلامت افراد در کاربرد این ماده در پروژه‌های عمرانی ضروری است.

اگرچه CKD جایگزین اقتصادی برای افزودنی‌های سستی مانند سیمان پرتلند و آهک است اما مقادیر بالای آن به دلیل وجود ترکیبات شیمیایی خاص می‌تواند بر کارایی و مقاومت خاک

است با مصالح موجود در لایه‌های روسازی جاده‌ها تعامل داشته باشند و باعث شسته شدن مواد خطرناک شوند. بنابراین، ارزیابی شسته شدگی مواد شیمیایی سمی در طول عمر مفید روسازی ضروری است (Chowdhury et al., 2010; Abedin Khan et al., 2024). روانایی که با CKD تماس پیدا می‌کند، پتانسیل تولید شیرابه حاوی خصوصیات خطرناک را دارد (Siddique and Rajor, 2012). وجود سولفات در CKD علاوه بر اینکه می‌تواند بر عملکرد مصالح تأثیر بگذارد ممکن است منجر به آلودگی آب‌های زیرزمینی به دلیل نشت از خاک تثبیت‌شده شود. مسائل اجرایی استفاده از CKD در تثبیت خاک مانند کنترل گرد و غبار، ذخیره سازی غبار کوره سیمان، روش‌ها و تجهیزات برای رساندن مؤثر CKD به بستر مرطوب باید در پروژه‌های عمرانی در نظر گرفته شود.

خلاءهای تحقیقات و توصیه‌ها برای مطالعات آینده

تفاوت‌های قابل توجهی در مورفولوژی ذرات CKD دفن‌شده در محل‌های دفن زباله در مقایسه با CKD تازه تولیدشده وجود دارد (Sreekrishnavilasam et al. 2007). عمده تحقیقات در زمینه استفاده از CKD در تثبیت خاک، بر غبار تازه تولیدشده متمرکز بوده است. تأثیر قرار گرفتن طولانی مدت CKD در محیط بر خصوصیات شیمیایی و فیزیکی آن و مقایسه عملکرد آن با CKD تازه تولیدشده بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های رسی نیاز به بررسی بیشتر دارد. در حالی که نتایج آزمایشگاهی تأثیرات مثبت استفاده از CKD در بهبود خصوصیات مهندسی خاک‌های رسی را نشان می‌دهد، انجام یک مطالعه میدانی برای اعتبارسنجی نتایج آزمایشگاهی و ارزیابی عملکرد CKD، به ویژه در درازمدت، بسیار مهم به نظر می‌رسد. اجرای یک مطالعه میدانی، مسائل اجرایی ساخت و

ساز را که مطالعه آزمایشگاهی نتوانسته است به آنها بپردازد، برجسته خواهد کرد. در مورد CKD می‌توان به مسائلی مانند کنترل گرد و غبار، ذخیره‌سازی، روش‌ها و تجهیزات برای رساندن مؤثر CKD به بستر مرطوب اشاره کرد. پتانسیل نشت ترکیبات شیمیایی مضر موجود در CKD از خاک تثبیت‌شده در پروژه‌ها باید مورد ارزیابی قرار گیرد. در برخی موارد ممکن است اندرکنش این ترکیبات با خاک زیرین منجر به خشی‌سازی اثرات منفی شود (Gupta et al., 2018). اثرات زیست‌محیطی تولید و کاربرد CKD در تثبیت خاک در هر پروژه با استفاده از ارزیابی چرخه عمر^۳ (LCA) ضروری است. LCA شامل چهار مرحله اصلی است که عبارتند از: تعریف هدف و محدوده، تحلیل موجودی چرخه عمر، ارزیابی تأثیر چرخه عمر و تفسیر نتایج. در تعریف هدف و محدوده، مرزهای سیستم (شامل مشخص کردن فرایندها و فعالیت‌های موجود در ارزیابی، مانند تولید CKD، استخراج خاک، اختلاط خاک و CKD و هرگونه فعالیت مرتبط مانند حمل‌ونقل)، واحد کارکرد (به عنوان مثال، در هر متر مکعب خاک تثبیت‌شده) و طبقه‌بندی تأثیر انتخابی (برای هدایت ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی و اقتصادی) باید مشخص شود. در تحلیل موجودی، اطلاعات در مورد مصرف مصالح و انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و تولید زائدات و پسماند مرتبط با هر مرحله از چرخه حیات، جمع‌آوری می‌گردد. پارامترها و شاخص‌های کلیدی که معمولاً در LCA در نظر گرفته می‌شوند عبارتند از: مصرف انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف آب، مصرف مصالح، تولید زائدات و پسماند، سمیت زیست‌محیطی، تأثیرات بر سلامت انسان و کاهش منابع (Barbhuiya and Das, 2023). مرور ادبیات فنی نشان می‌دهد که خصوصیات دینامیکی خاک‌های تثبیت‌شده با غبار کوره سیمان شامل مدول برشی، نسبت میرایی و نسبت پواسون بررسی نشده است.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی مطالعات انجام شده در زمینه تأثیر غبار کوره سیمان به عنوان یک پسماند صنعتی بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های رسی پرداخته شد. تغییرات پارامترهای حدود ات‌برگ، تراکم، مقاومت، شاخص تورم و نفوذپذیری ارزیابی و تحلیل شدند. خلاصه نتایج به شرح زیر است:
- در اثر افزودن CKD به خاک‌های رسی، غالباً مشاهده شده

است که فلوکولاسیون ذرات رس و واکنش‌های پوزولانی منجر به کاهش پلاستیسیته خاک می‌شوند.
- ساختار فلوکوله‌شده خاک رس به دلیل حضور CKD، در برابر تراکم مقاومت می‌کند و با ایجاد حفرات بزرگ‌تر در ماتریس خاک، دانسیته خشک حداکثر خاک را کاهش می‌دهد. از طرفی، وجود این حفرات نیاز به آب را جهت تراکم افزایش

بود. مقدار بهینه CKD جهت بهبود مقاومت خاک‌های رسی با توجه به ترکیبات شیمیایی متفاوت CKD ها (به خصوص مقدار آهک آزاد) یکسان نیست و تعیین آن نیاز به انجام آزمایش دارد. -افزایش پیوند بین ذرات خاک به دلیل ایجاد محصولات سیمان‌تاسیون در نتیجه ترکیب خاک و CKD، شاخص تورم و نفوذپذیری خاک را کاهش می‌دهد.

-خطرات زیست‌محیطی مربوط به ترکیبات شیمیایی موجود در CKD و نشست این ترکیبات در پروژه‌های عمرانی به جهت آلودگی آب‌های زیرزمینی باید مورد توجه قرار گیرد.

داده و در نتیجه درصد رطوبت بهینه افزایش می‌یابد. افزایش درصد رطوبت بهینه را می‌توان به ماهیت آب دوست بودن CaO در CKD نیز نسبت داد. با این وجود به دلیل تفاوت مقدار چگالی مخصوص دانه‌های خاک و CKD و ریزی نسبی ذرات CKD و خاک، برخی از تحقیقات روند متفاوتی را گزارش کرده‌اند.

-افزودن CKD به خاک رس در حضور آب، با ایجاد ترکیبات سیمانی مانند کلسیم سیلیکات هیدرات، کلسیم آلومینات هیدرات و کلسیم آلومینا سیلیکات هیدرات و همچنین کانی‌های حاوی سولفات، مانند اترینگایت مقاومت خاک را افزایش می‌دهد. با افزایش دوره عمل‌آوری، محصولات سیمانی بیشتری تولید شده و در نتیجه افزایش مقاومت بیشتر خواهد

۶- پی‌نوشت‌ها

1. Cement Kiln Dust (CKD)
2. Unconfined Compressive Strength (UCS)
3. California Bearing Ratio (CBR)
4. Plasticity Index (PI)
5. Liquid Limit (LL)
6. Plastic Limit (PL)
7. Maximum Dry Density (MDD)
8. Optimum Moisture Content (OMC)
9. Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)
10. Fly Ash (FA)
11. Rice Husk Ash (RHA)
12. Sugarcane Bagasse Ash (SCBA)
13. Life Cycle Assessment (LCA)

۷- مراجع

- Abedin Khan, Z., Balunaini, U., & Costa, S. (2024). Environmental feasibility and implications in using recycled construction and demolition waste aggregates in road construction based on leaching and life cycle assessment – A state-of-the-art review. *Cleaner Materials*, 12, 100239.
- Adeyanju, E., Okeke, C. A., Akinwumi, I., & Busari, A. (2020). Subgrade Stabilization using Rice Husk Ash-based Geopolymer (GRHA) and Cement Kiln Dust (CKD). *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00388.
- Al Jaber, M., Muhammad, N. & Selvaraj, J. (2024). Application of industrial by-product waste as soil stabilising backfill material using a multi-layering method. *Discover Civil Engineering*, 1, 31.

- Abdelgader, H.S., Amran, M., Kurpińska, M., Mosaberpanah, M.A., Murali, G., & Fediuk, R. (2022). Cement kiln dust. In *Sustainable Concrete Made with Ashes and Dust from Different Sources*, Woodhead Publishing, 451-479.
- Abdi, A. & Dabiri, R. (2020). Geotechnical behavior of clayey soils stabilized with cement kiln dust. *New Findings in Applied Geology*, 14(28), 84-100.
- Abdou Saidou, A., Abongo, K., & M'tulatia, M. (2025). Effect of Cement Kiln Dust and Sugarcane Bagasse Ash on Black Cotton Soil to be used as Road Subgrade Material in Flexible Pavement Construction. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15(2), 21076-21085.

- Barbhuiya, S., & Das, B.B. (2023). Life Cycle Assessment of construction materials: Methodologies, applications and future directions for sustainable decision-making. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02326.
- Bell, F.G. (1993). Engineering Treatment of Soils. First Edition, *CRC Press*.
- Bing, L., Ma, M., Liu, L., Wang, J., Niu, L., and Xi, F. (2023). An investigation of the global uptake of CO₂ by lime from 1930 to 2020. *Earth System Science Data*, 15, 2431–2444.
- Brooks, R.M., Udoeyo, F., & Takkalapelli, K.V. (2009). Compaction delay characteristics of clay with cement kiln dust. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 162 (5), 283–286.
- Chowdhury, R., Apul, D., & Fry, T. (2010). A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(4), 250-255.
- Cui, S., Xie, W., Wang, J. & Huang, S. (2019). Engineering Properties of Collapsible Loess Stabilized by Cement Kiln Dust. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 56, 328–335.
- Eisa, M.S., Basiouny, M.E., Mohamady, A., & Mira, M. (2022). Improving Weak Subgrade Soil Using Different Additives. *Materials*, 15(13), 4462.
- El-Attar, M.M., Sadek, D.M., & Salah, A.M. (2017). Recycling of high volumes of cement kiln dust in bricks industry. *Journal of Cleaner Production*, 143, 506-515.
- Feiz, R., Ammenberg, J., Baas, L., Eklund, M., Helgstrand, A., & Marshall, R. (2015). Improving the CO₂ performance of cement, part I: Utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 98, 272-281.
- 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.
- Ghavami, S., Jahanbakhsh, H., & Moghadas Nejad, F. (2020). Laboratory study on stabilization of kaolinite clay with cement and
- Al-Bakri, A.Y., Ahmed, H.M., & Hefni, M.A. (2022). Cement Kiln Dust (CKD): Potential Beneficial Applications and Eco-Sustainable Solutions. *Sustainability*, 14(12), 7022.
- Alhassani, A.M.J., Kadhim, S.M., & Fattah, A.A. (2024). Stabilization of Clayey Soil Using Cement Kiln Dust as Sustainable Material. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 012038.
- Almuaythir, S., & Abbas, M.F. (2023). Expansive soil remediation using cement kiln dust as stabilizer. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01983.
- Almuaythir, S., Zaini, M. S.I., Hasan, M., & Hoque, M.I. (2024). Sustainable soil stabilization using industrial waste ash: Enhancing expansive clay properties. *Heliyon*, 10(20), e39124.
- Al-Refeai, T.O., & Al-Karni, A.A. (1999). Experimental Study on the Utilization of Cement Kiln Dust for Ground Modification. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 11(2), 217-231.
- Amadi, A., & Osu, A. (2018). Effect of curing time on strength development in black cotton soil – Quarry fines composite stabilized with cement kiln dust (CKD). *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 30(4), 305-312.
- Amouzadeh Omrani, M., & Modarres, A. (2018). Emulsified cold recycled mixtures using cement kiln dust and coal waste ash-mechanical-environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, 199, 101-111.
- Anwar Hossain, K.M. (2011). Stabilized soils incorporating combinations of rice husk ash and cement kiln dust. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(9), 1320-1327.
- Badv, K., Hoseinpour Lonbar, J. (2018). Treatment of Urmia Peat by Cement Kiln Dust. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 42, 451–459.
- Baghdadi, Z.A., Fatani, M.N., & Sabban, N.A. (1995). Soil modification by cement kiln dust. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 7(4), 218-222.
- Bağrıaçık, B., Mahmutluoğlu, B., & Topoliński, S. (2025). Improvements to Load-Bearing Capacity and Settlement of Clay Soil After Adding Nano-MgO and Fibers. *Polymers*, 17(14), 1895.

- Ismeik, M., Shaqour, F., & Hasan, S.E. (2021). Geotechnical evaluation of clayey soils amended with cement kiln dust during freeze-thaw cycling. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 2023.
- Jahanbakhsh, H., Mobini, M., Ghavami, S., & 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. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 6(3), 47-67.
- Jala, S.K., & Sharma, P. (2019). Effect of Cement Kiln Dust and RBI Grade 81 on Engineering Properties of Plastic Clay. In *Proceedings of EGRWSE 2018*, 37-49.
- Jamsawang, P., Poorahong, H., Yoobanpot, N., Songpiriyakij, S., & Jongpradist, P. (2017). Improvement of soft clay with cement and bagasse ash waste. *Construction and Building Materials*, 154, 61-71.
- Maslehuddin, M., Al-Amoudi, O., Shameem, M., Rehman, M., & Ibrahim, M. (2008). Usage of cement kiln dust in cement products – Research review and preliminary investigations. *Construction and Building Materials*, 22(12), 2369-2375.
- McCoy, W.J., & Kriner, R.W. (1971). Use of Waste Kiln Dust for Soil Consolidation. Lehigh Portland Cement Co., Allentown, Pennsylvania, U.S.A.
- Melentijević, S., Cameia, A., García Bañó, F., Ponce, R., & López-Andrés, S. (2025). Application of cement kiln dust for the stabilization of expansive soils in the region of Murcia (Spain). *Construction and Building Materials*, 491, 142743.
- Miller, G.A., & Azad, S. (2000). Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust. *Construction and Building Materials*, 14(2), 89-97.
- Modarres, A., Ramyar, H., & Ayar, P. (2015). Effect of cement kiln dust on the low-temperature durability and fatigue life of hot mix asphalt. *Cold Regions Science and Technology*, 110, 59-66.
- Mosa, A.M., Taher, A.H., & Al-Jaberi, L.A. (2017). Improvement of poor subgrade soils using cement kiln dust. *Case Studies in Construction Materials*, 7, 138-143.
- cement kiln dust. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(4), 935-948.
- Ghavami, S., Jahanbakhsh, H., & Moghadas Nejad, F. (2021a). Laboratory evaluation on the effectiveness of polypropylene fibers on the strength behavior of CKD-stabilized Soil. *Geotechnical Geology*, 17 (1), 465-470.
- Ghavami, S., Jahanbakhsh, H., Saeedi Azizkandi, A., & Moghadas Nejad, F. (2021b). Influence of sodium chloride on cement kiln dust-treated clayey soil: strength properties, cost analysis, and environmental impact. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 683–702.
- Ghavami, S., Naseri, H., Jahanbakhsh, H., & Moghadas Nejad, F. (2021c). The impacts of nano-SiO₂ and silica fume on cement kiln dust treated soil as a sustainable cement-free stabilizer. *Construction and Building Materials*, 285, 122918.
- Ghazvinian, B., & Razavi, M. (2010). Stabilization and Erosion Control of Slopes using Cement Kiln Dust. In *Proceedings of GeoFlorida 2010*, 2454-2461.
- Gul, N., & Mir, B.A. (2022). Influence of glass fiber and cement kiln dust on physicochemical and geomechanical properties of fine-grained soil. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7, 344.
- Gupta, N., Kluge, M., Chadik, P.A., & Townsend, T.G. (2018). Recycled concrete aggregate as road base: Leaching constituents and neutralization by soil Interactions and dilution. *Waste Management*, 72, 354-361.
- Horpibulsuk, S., Suddeepong, A., Chinkulkijniwat, A., & Liu, M.D. (2012). Strength and compressibility of lightweight cemented clays. *Applied Clay Science*, 69, 11-21.
- Ige, O.E., Von Kallon, D.V. & Desai, D. (2024). Carbon emissions mitigation methods for cement industry using a systems dynamics model. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 26, 579–597.
- Ikeagwuani, C.C., & Nwonu, D.C. (2019). Emerging trends in expansive soil stabilisation: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(2), 423-440.
- Ismail, A.I.M., & Belal, Z.L. (2016). Use of Cement Kiln Dust on the Engineering Modification of Soil Materials, Nile Delta, Egypt. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34, 463–469.

- Sharifi Teshnizi, E., O'Kelly, B.C., Karimiazar, J., Moosazadeh, M. Arjmandzadeh, R., & Pani, P. (2022). Effects of cement kiln dust on physicochemical and geomechanical properties of loess soil, Semnan Province, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 15, 1482.
- Sharma, R.K. (2017). Laboratory study on stabilization of clayey soil with cement kiln dust and fiber. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35, 2291–2302.
- Shoaei, P., Zolfaghary, S., Jafari, N., Dehestani, M., & Hejazi, M. (2017). Investigation of adding cement kiln dust (CKD) in ordinary and lightweight concrete. *Advances in Concrete Construction*, 5(2), 101-115.
- Siddique, R., & Rajor, A. (2012). Use of cement kiln dust in cement concrete and its leachate characteristics. *Resources, Conservation and Recycling*, 61, 59-68.
- Solanki, P., Khoury, N., & Zaman, M.M. (2009). Engineering properties and moisture susceptibility of silty clay stabilized with lime, class C fly ash, and cement kiln dust. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(12), 749-757.
- Sreekrishnavilasam, A., Rahardja, S., Kmetz, R., & Santagata, M. (2007). Soil treatment using fresh and landfilled cement kiln dust. *Construction and Building Materials*, 21(2), 318-327.
- Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F., & Cai, Y. (2007). Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(3), 194-202.
- U.S. Geological Survey. (2024). Data release for mineral commodity summaries 2024: *U.S. Geological Survey Data Release*.
- Udoeyo, F.F., & Hye, A. (2002). Strength of Cement Kiln Dust Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(6), 524-526.
- Yoobanpot, N., Jamsawang, P., & Horpibulsuk, S. (2017). Strength behavior and microstructural characteristics of soft clay stabilized with cement kiln dust and fly ash residue. *Applied Clay Science*, 141, 146-156.
- Zhao, Y., Ling, X., Gong, W., Li, P., Li, G., & Wang, L. (2020). Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Soil under Triaxial Compression and Parameter Determination Based on the Duncan-Chang Model. *Applied Sciences*, 10(24), 9043.
- Moseley, M.P., & Kirsch, K. (2004). Ground Improvement. Second Edition, *CRC Press*.
- Nagaraj, T.S., & Miura, N. (2001). *Soft clay behaviour analysis and assessment*. 1st Edition, CRC Press.
- Nicholson, P.G. (2014). *Soil Improvement and Ground Modification Methods*. First Edition, Butterworth-Heinemann.
- Ogila, W.A.M. (2021). Effectiveness of fresh cement kiln dust as a soil stabilizer and stabilization mechanism of high swelling clays. *Environmental Earth Sciences*, 80, 283.
- Onyelowe, K.C., Iqbal, M., Jalal, F.E. Onyia, M.E. & Onuoha, I.C. (2021). Application of 3-algorithm ANN programming to predict the strength performance of hydrated-lime activated rice husk ash treated soil. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, 4, 259–274.
- Parsons, R.L., Kneebone, E., & Milburn, J.P. (2004). Use of cement kiln dust for subgrade stabilization (Report No. KS-04-3). *Kansas Department of Transportation*.
- Peethamparan, S. (2006). Fundamental study of clay-cement kiln dust (CKD) interaction to determine the effectiveness of CKD as a potential clay soil stabilizer. Ph.D. Thesis, West Lafayette: *Purdue University*.
- Peethamparan, S., Olek, J., & Lovell, J. (2008). Influence of chemical and physical characteristics of cement kiln dusts (CKDs) on their hydration behavior and potential suitability for soil stabilization. *Cement and Concrete Research*, 38(6), 803-815.
- Quang, N.D., & Chai, J.C. (2015). Permeability of lime-and cement-treated clayey soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(9), 1221-1227.
- Rimal, S., Poudel, R.K., & Gautam, D. (2019). Experimental study on properties of natural soils treated with cement kiln dust. *Case Studies in Construction Materials*, 10, e00223.
- Rubinos, D.A., & Spagnoli, G. (2018). Utilization of waste products as alternative landfill liner and cover materials – A critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 48(4), 376-438.
- Sariosseiri, F., & Muhunthan, B. (2008). Geotechnical properties of Palouse loess modified with cement kiln dust and Portland cement. In *Proceedings of GeoCongress 2008*, 92-99.

The Effect of Cement Kiln Dust as a Sustainable Cement-Free Stabilizer on the Geotechnical Properties of Clayey Soils: A Review

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

E-mail: ghavamijamal@sut.ac.ir

Received: September 2025- Accepted: February 2026

ABSTRACT

Due to their low bearing capacity and high potential for volume change, clayey soils pose numerous limitations in construction projects. The chemical stabilization of these soils using industrial waste or by-products has attracted considerable attention from researchers as a sustainable and environmentally friendly solution. Cement kiln dust (CKD), a by-product of Portland cement production, has an estimated annual output of approximately 10 to 13 million tons in Iran. The utilization of CKD as a substitute for Portland cement can substantially reduce both cement consumption and industrial waste volume, thereby fostering a more sustainable and healthier environment for future generations. Given its fine particle size and appreciable free lime content, CKD has significant potential for soil stabilization. This research first presents the production process and the physical and chemical characteristics of CKD and then reviews previous studies on the stabilization of clayey soils using CKD. The effects of CKD on Atterberg limits, compaction parameters, strength, swelling index, and soil permeability are examined, and the influence of secondary additives on soil-CKD mixtures is also evaluated. Despite CKD's effectiveness in enhancing the engineering properties of clayey soils, challenges remain, including environmental risks associated with its chemical compounds and their potential leaching into groundwater, implementation issues in construction practice, and the need for effective control measures during application. This study provides useful guidance for engineers seeking to employ CKD as a chemical stabilizer of clayey soils in construction projects.

Keywords: Chemical Soil Stabilization, Clayey Soils, Mechanical Properties, Cement Kiln Dust