



## کاربرد خاکستر کوره سیمان در تثبیت خاک‌های نامرغوب

فریدون مقدس‌نژاد<sup>۱</sup>، امیر مدرس<sup>۲</sup>

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران-راه و ترابری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

پست الکترونیکی: [amirmodarres2003@yahoo.com](mailto:amirmodarres2003@yahoo.com)

### خلاصه

در این تحقیق، مطالعات انجام گرفته در مورد اثرات خاکستر کوره سیمان بر خصوصیات مهندسی چند گروه از خاک‌های ضعیف و نامناسب جهت به کارگیری در پروژه‌های راهسازی مورد بررسی قرار گرفته است. در فرآیند تولید سیمان پرتلند، در محل خروج گازها از کوره، مقدار زیادی خاکستر جمع می‌شود که مقدار کمی از این خاکستر بازیابی شده و به جهت صرفه جویی در سوخت، مجدداً وارد کوره می‌شود و مقدار زیادی از آن دفع می‌گردد. به دلیل تشابه ترکیبات این ماده با ترکیبات موجود در سیمان‌های معمولی، می‌توان انتظار داشت که بخشی از خواص سیمانی و چسبندگی سیمان‌های پرتلند در این خاکستر وجود داشته باشد. آزمایش‌های مورد بررسی شامل آزمایش‌های حدود اتربرگ، مقاومت فشاری و PH مخلوط بوده‌است. به دلیل کمتر بودن میزان اکسیدهای موثر در پیشرفت واکنش‌های خاک با این ماده نسبت به سیمان‌های معمولی، مقادیر استفاده شده از این ماده بیشتر از سیمان‌های معمولی بوده است. علی‌رغم این مورد به دلیل ارزان بودن این ماده در صورت حصول نتایج مناسب، استفاده از آن به مراتب ارزان‌تر و اقتصادی‌تر از سیمان‌های معمولی، آهک و تثبیت‌کننده‌های مشابه خواهد بود. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده اثرات مطلوب این ماده بر مقدار حدود اتربرگ و به خصوص مقاومت فشاری خاک‌های مورد مطالعه می‌باشد.

کلمات کلیدی: خاکستر کوره سیمان، تثبیت خاک، مقاومت فشاری، PH، حدود اتربرگ

### مقدمه

تثبیت خاک یکی از روش‌های مرسوم در بهبود خواص مهندسی خاک‌های مورد استفاده در پروژه‌های عمرانی می‌باشد. اثرات موادی مانند آهک، انواع پوزولان‌ها و... به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته و در بسیاری از موارد نیز از این مواد جهت به کارگیری مصالح نامناسب در سازه‌های ساخته شده از جمله راه‌ها، باند فرودگاه‌ها، پی‌ها و... استفاده شده‌است. استفاده از این روش در پروژه‌های بزرگ و با اهمیت از جمله پروژه‌های راهسازی به خصوص در مواردی که جایگزینی خاک‌های نامناسب، در برگیرنده حجم بالایی از عملیات خاکی باشد؛ می‌تواند از نظر اقتصادی مورد توجه قرار گیرد. در این پروژه‌ها حجم بالای عملیات خاکی باعث افزایش هزینه‌های اولیه می‌گردد. همچنین مقدار هزینه‌های نگهداری در راه‌هایی که از مصالح تثبیت‌شده در آنها استفاده می‌شود، کمتر می‌باشد. استفاده از روش تثبیت در پروژه‌های کوچک و کم اهمیت از جمله راه‌های فرعی در اغلب موارد گران‌تر از روش‌های اجرایی دیگر می‌باشد. بنابراین استفاده از تثبیت‌کننده‌های ارزان قیمت که با استفاده از آنها بتوان به خصوصیات مهندسی مطلوب دست یافت می‌تواند باعث اقتصادی شدن این روش به خصوص در پروژه‌های کوچک و کم اهمیت‌تر گردد. علاوه بر ارزان بودن، قابلیت تولید و همچنین دسترسی آنبوه، یکی دیگر از ویژگی‌های یک تثبیت‌کننده مناسب است. یکی از مواد افزودنی که اثرات آن بر خواص مهندسی خاک‌ها به طور محدود مورد بررسی قرار گرفته است، خاکستر کوره سیمان می‌باشد [۲و۱]. این خاکستر، در محل خروج گازها از دودکش کوره‌های پخت سیمان بر جای مانده و با توجه به وجود ترکیباتی مشابه با سیمان‌های معمولی در آن، در صورت اثرات مطلوب در خواص مهندسی خاک‌های ضعیف، استفاده از آن به مراتب ارزان‌تر از سیمان‌های پرتلند می‌باشد [۲و۱]. همچنین دستیابی به این ماده در هر محلی که کارخانه سیمان وجود دارد امکان پذیر بوده و با توجه به اینکه حجم زیادی از این ماده در کارخانه‌های سیمان استفاده نشده و دفع می‌گردد؛ استفاده از آن در صورت تایید کفایت آن از طریق انجام بررسی‌های آزمایشگاهی می‌تواند بسیار اقتصادی و مناسب باشد.

### معرفی خاکستر کوره سیمان (Cement Kiln Dust)

در فرآیند تولید سیمان پرتلند در محل خروج گازها از کوره مقدار زیادی خاکستر جمع می‌شود که مقدار کمی از این خاکستر بازیابی شده و به منظور صرفه‌جویی در سوخت مجدداً وارد کوره شده و مقدار زیادی از آنها دفع می‌گردد. این خاکستر دارای خواص سیمانی است که می‌تواند آن را تبدیل به تثبیت‌کننده‌ای مفیدی برای خاک‌های ضعیف و نامناسب نماید. در کشور آمریکا در طول سال مقادیر زیادی خاکستر کوره تولید می‌گردد. به عنوان مثال، طبق گزارشات ارائه شده، در سال ۱۹۹۰، ۳۵۰۰۰۰ تن خاکستر کوره در آمریکا بازیابی و مجدداً به فرآیند تولید برگردانده شد در حالیکه مقدار خاکستر دفع شده به مراتب بیشتر از این مقدار بوده است [۱].

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد مهندسی عمران-راه و ترابری



با گسترش کارخانه‌های سیمان در آمریکا این ماده نیز به میزان قابل توجهی تولید شده و استفاده از این ماده جهت تثبیت خاک در صورت واکنش مناسب با خاک می‌تواند از لحاظ اقتصادی نیز مفید باشد. علی‌رغم استفاده محدود از این ماده در ساخت برخی از راه‌ها در آمریکا استفاده از آن به دلیل عدم تایید علمی گسترش پیدا نکرده‌است.

### ترکیبات خاکستر کوره سیمان (CKD)

خواص فیزیکی و شیمیایی CKD می‌تواند در کارخانه‌های مختلف متفاوت باشد که بستگی به مواد خام استفاده شده و نحوه جمع‌آوری در کارخانه دارد. به هر حال خاکستر جمع‌آوری شده از یک کوره ثابت دارای ترکیب ثابتی می‌باشد.

در جدول ۱، ترکیب شیمیایی CKD، الیت و بلیت ارائه شده است. لازم به توضیح می‌باشد که  $C_3S$  ناخالص را الیت و  $C_2S$  ناخالص را بلیت می‌نامند. طبق پیشنهاد Kamon و Nantanandh، یک تثبیت‌کننده سیمانی باید دارای ضریب هیدراسیونی بین الیت و بلیت باشد که خاکستر کوره سیمان دارای این خصوصیت می‌باشد [۳].

خاکستر کوره سیمان تقریباً دارای یک‌سوم مقادیر اکسیدهای سیمان می‌باشد و بنابراین درصد CKD اعمالی به خاک باید بیش از سیمان پرتلند باشد.

### سابقه تثبیت خاک با خاکستر کوره

تحقیقات انجام گرفته در زمینه استفاده از خاکستر کوره نشان داده‌است که این ماده قابلیت تثبیت نسبتاً خوبی دارد. Baghdadi در آزمایشات خود پی برد که بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری، نمونه‌های کائولینیت مخلوط‌شده با ۱۶ درصد CKD، افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری محدود نشده داشته‌اند [۴]. مثلاً یکی از نمونه‌های آزمایش شده، از مقاومت فشاری محدود نشده ۲۱۰ کیلوپاسکال به ۱۱۱۵ کیلوپاسکال رشد داشته‌است. همچنین برای رس بنتونیت فوق‌العاده خمیری وی دریافت که اعمال ۸ درصد سیمان خاکستر کوره باعث کاهش شاخص خمیری از ۵۱/۳ به ۳۲/۶ درصد شده‌است [۴].

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی (CKD)، الیت و بلیت

Chemical compound	Analysis method	Composition (% by weight)			
		CKD <sup>b</sup>	CKD <sup>c</sup>	Alite	Belite
Silicon dioxide, SiO <sub>2</sub>	X-ray fluorescence	15.90	15.14	24.83	32.50
Aluminum oxide, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	X-ray fluorescence	3.43	3.91	1.24	2.13
Iron oxide, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	X-ray fluorescence	1.90	1.97	0.94	1.03
Calcium oxide, CaO	X-ray fluorescence	43.50	48.40	72.23	62.83
Magnesium oxide, MgO	X-ray fluorescence	1.64	1.38	0.98	0.52
Sulfur trioxide, SO <sub>3</sub>	X-ray fluorescence	1.62	4.53	-	-
Sodium oxide, Na <sub>2</sub> O	X-ray fluorescence	0.30	0.19	0.09	0.20
Potassium oxide, K <sub>2</sub> O	X-ray fluorescence	2.94	2.51	0.14	0.30
Loss on ignition	ASTM C 575	25.70	22.14	-	-
Specific gravity, G <sub>s</sub>	ASTM D 854	3.22	-	-	-
Hydration modulus <sup>a</sup>	-	2.05	2.30	2.67	1.76

<sup>a</sup> Hydration modulus =  $CaO / (Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3)$ .

<sup>b</sup> Conducted independent of manufacturer.

<sup>c</sup> Provided by manufacturer.

Khan و Fatani، از سیمان خاکستر کوره برای تثبیت ماسه‌بادی و مخلوط‌های قیری جهت قرارگیری در لایه اساس استفاده کردند و با افزودن ۱۱ درصد CKD، پایداری مخلوط حدوداً ۱۰ برابر شد [۵]. نتایج تحقیقات نشان داده‌است که اثرات CKD بر خاک‌های آماسی چندان مطلوب نیست. اثر این ماده بر خواص مقاومتی متوسط و بر خواص خمیری این خاک‌ها ضعیف بوده‌است. البته این مورد با توجه به اینکه خاکستر کوره سیمان دارای خصوصیات مشابه سیمان می‌باشد؛ چندان تعجب‌آور نیست [۷ و ۸]. نتایج حاصل از بررسی‌های میکروسکوپی نشان‌دهنده وجود محصولات واکنش هیدراسیون در نمونه‌های تثبیت شده بوده‌است که این محصولات عامل اصلی در افزایش مقاومت این خاک‌ها دانسته شده‌اند [۶ و ۷].

FHWA، آزمایش‌های صحرایی متعددی را بر روی مناطق ماسه‌ای Chickasaw در اوکلوهاما انجام داد [۹ و ۱۰]. بهینه‌سازی آزمایشگاهی جهت تعیین میزان CKD برای خاک این منطقه که دارای دامنه خمیری ۲۸ بوده است؛ منتهی به استفاده از ۱۰ درصد سیمان خاکستر کوره به عنوان مقدار بهینه شد که در مقایسه با هزینه تثبیت با آهک باعث کاهش هزینه‌ها به میزان ۲۵۰۰۰ دلار برای ۱۸۰۰۰ متر مربع از مساحت تثبیت شده گردید. با استفاده از ۱۰ درصد CKD، مقدار شاخص خمیری خاک منطقه از ۲۸ درصد به ۱۵ درصد کاهش یافت و نسبت باربری کالیفرنیا از مقداری کمتر از ۱۰ برای خاک طبیعی به حدود ۵۰ برای خاک تثبیت شده با CKD رسید. در مقایسه با آهک، افزایش در میزان CBR خاک برای CKD به مراتب بزرگتر بوده است، ولی تاثیرات آهک بر مقدار شاخص خمیری بهتر بوده و اعمال ۵ درصد آهک به خاک میزان شاخص خمیری را به صفر رساند.

### تاثیر CKD بر خواص خاک



در این بخش، به منظور تحلیل دقیق تر اثرات CKD، یکی از مطالعات انجام شده در کشور آمریکا به طور دقیق تر مورد بررسی قرار می گیرد. جهت بررسی عملکرد خاکستر کوره سیمان در تحقیق فوق الذکر، ۳ نوع خاک با خواص ارائه شده در جدول ۲ از منطقه اوکلاهوما انتخاب گردید. این ۳ خاک شامل یک نوع رس با خاصیت خمیری زیاد، یک نوع رس با خاصیت خمیری کم و یک نوع لای با خاصیت خمیری کم بوده اند.

جدول ۲- مشخصات خاک های مورد آزمایش

	Method	Soil number		
		1	2	3
USCS symbol	ASTM D 2487	CH	CL	ML
% finer than 0.075 mm	ASTM D 2487	98	94	52
% finer than 0.002 mm	ASTM D 422	51	42	21
Liquid limit (%)	ASTM D 4318	55	48	23
Plasticity index (%)	ASTM D 4318	40	33	6
Activity	-	0.78	0.79	0.29
Specific gravity	ASTM D 854	2.82	2.72	2.67
Optimum moisture content (%) <sup>a</sup>	ASTM D 4609	23.3	16.0	14.0
Max. dry unit weight (kN/m <sup>3</sup> ) <sup>a</sup>	ASTM D 4609	15.9	17.5	18.6
pH	Eades and Grim <sup>b</sup>	7.6	5.3	7.7
Sulfate content, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/kg)	EPA 375.4	137	191	ND
Organics (% by weight)	ASTM D 2974	1.62	0.86	0.36

<sup>a</sup>Determined with a Harvard miniature device calibrated against the standard Proctor compaction test (ASTM D 698) results.

<sup>b</sup>See Eades and Grim, 1966 [13].

## آزمایش ها

آزمایش های انجام شده بر روی نمونه های خاک شامل رطوبت، وزن مخصوص، مقاومت فشاری محدود نشده، حدود اتربرگ و PH خاک بوده است. با توجه به اینکه میزان اکسیدهای موجود در سیمان خاکستر کوره حدود ۳۳ درصد سیمان پرتلند می باشد، حداقل مقدار استفاده شده در تحقیق فوق، حدود سه برابر میزان معمول سیمان پرتلند در نظر گرفته شد.

## آزمایش PH

مقدار CKD با معیار PH از روش Eade and Grim تعیین گردید [۱۱]. در این روش ابتدا ماده تثبیت کننده به خاک اعمال شده و سپس ۵ برابر حجم مخلوط به دست آمده آب به آن اضافه می گردد. بعد از یک ساعت نگهداری مخلوط، PH آن اندازه گرفته می شود. این روش در ابتدا برای تعیین مقدار مفید آهک ارائه شده بود. اگر مقدار PH ترکیب خاک-آب-آهک به حدی افزایش یابد که نزدیک PH مخلوط آهک-آب گردد، آنگاه فرض می شود که مقدار آهک کافی جهت انجام واکنش ها در خاک وجود دارد. در شرایط PH بالا قابلیت حل سیلیکا و آلومینا در خاک به مقدار قابل توجهی افزایش یافته و باعث انجام واکنش پوزولانی در آهک و سیمان می گردد [۱۱ و ۱۲ و ۱۳].

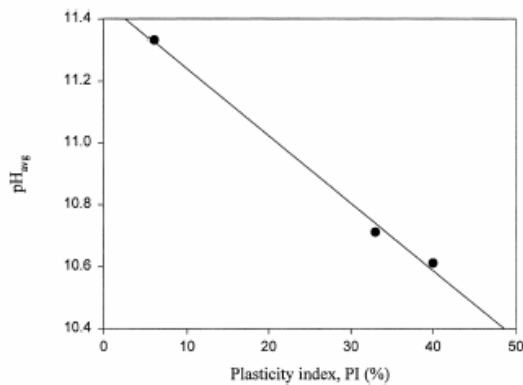
از آنجایی که افزایش مقادیر PH باعث افزایش فعالیت های شیمیایی می گردد، بر روی نمونه های خاک جدول ۲ پس از اعمال مقادیر مختلفی CKD، آزمایش PH انجام شد؛ که نتایج آن در شکل ۱، ارائه شده است. همچنین با تعیین مقدار PH میانگین برای سه نمونه خاک، به ازای مقادیر صفر تا ۱۵ درصد CKD، مقادیر PH در مقابل PI رسم گردید که نتیجه در شکل ۲ نشان داده شده است. جهت تعیین PH میانگین، با افزایش مقدار تثبیت کننده از صفر تا ۱۵ درصد وزن خشک خاک، مقدار PH خاک اندازه گرفته شد و میانگین کل مقادیر به دست آمده محاسبه گردید. با توجه به شکل ۱، مقدار CKD بهینه برای خاک های ۲ و ۳، ۱۵ درصد می باشد. زیرا به ازای این مقدار بیشترین رشد در میزان PH مشاهده می گردد. خاک ۱ به ازای مقادیر بالاتری به این PH می رسد (حدود ۴۰ درصد). این مورد به دلیل خاصیت خمیری بالاتر این خاک می باشد که نیازمند مقادیر بالاتری CKD جهت واکنش هیدراسیون و بالا بردن PH محیط می باشد. همچنین در شکل ۲ مشاهده می گردد که با افزایش مقدار دامنه خمیری، مقدار PH میانگین کاهش یافته است. این مورد نشان می دهد که هر چه خاصیت خمیری خاک های مورد آزمایش بالاتر باشد؛ مقدار بیشتری تثبیت کننده جهت پیشرفت واکنش ها نیاز می باشد، زیرا مقدار PH خاک شاخصی است که میزان پیشرفت واکنش های خاک با ماده تثبیت کننده را نشان می دهد؛ مثلاً با پیشرفت واکنش تبادل کاتیونی که موجب بهبود خواص خمیری خاک می گردد مقدار PH خاک تا حدود ۱۲ افزایش خواهد یافت.

## آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده

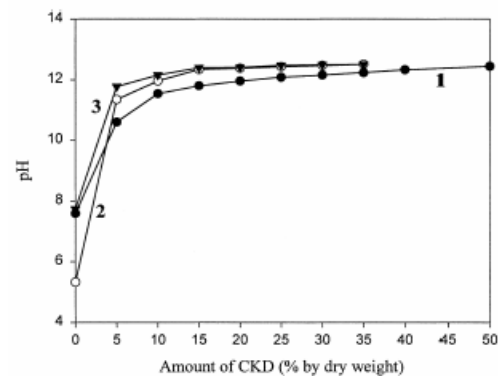
آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده بر روی نمونه های متراکم شده انجام گرفت [۱۴]. در شکل ۳ درصد رطوبت بهینه در مقابل میزان CKD اعمال شده و در شکل ۴ حداکثر وزن مخصوص خشک در مقابل CKD اعمال شده نشان داده شده است. مشاهده می گردد که همانند سایر مواد تثبیت کننده با افزایش میزان CKD، درصد رطوبت بهینه افزایش یافته و وزن مخصوص خشک حداکثر خاک کاهش می یابد. افزایش در درصد رطوبت بهینه به دلیل جذب آب توسط CKD جهت انجام واکنش و بالاتر بودن میزان سطح مخصوص ذرات این ماده نسبت به سطح مخصوص ذرات خاک های مورد مطالعه



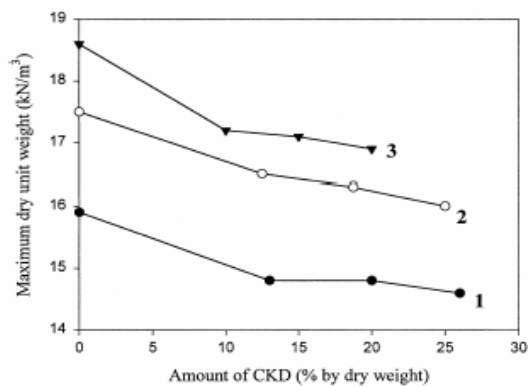
می‌باشد که در نتیجه آن به مقدار آب بیشتری جهت روغنکاری بهتر دانه‌ها برای ایجاد تراکم بهتر و دستیابی به مقدار وزن مخصوص بالاتر نیاز خواهد بود. همچنین کاهش وزن مخصوص خشک به دلیل کمتر بودن چگالی CKD نسبت به چگالی خاک‌های مورد مطالعه می‌باشد.



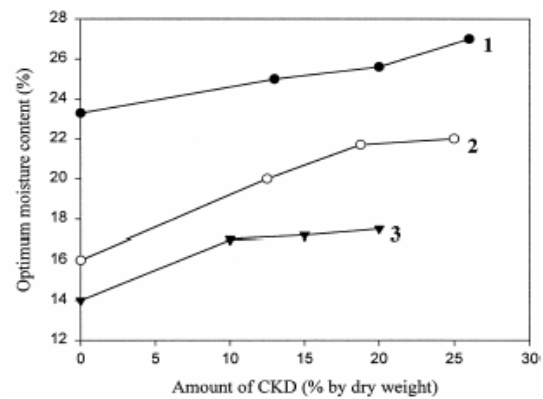
شکل ۲-ارتباط بین مقادیر شاخص خمیری و PH میانگین



شکل ۱-ارتباط بین مقادیر CKD و PH



شکل ۴- اثرات میزان CKD بر حداکثر وزن مخصوص خشک خاک



شکل ۳- اثرات میزان CKD بر درصد رطوبت بهینه

نمونه‌های آزمایش فشاری محدود نشده به مدت زمان ۷، ۱۴ و ۲۸ روز قبل از انجام آزمایش در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد عمل‌آوری شدند. برای هر دوره عمل‌آوری ۶ نمونه آماده شد که ۳ نمونه پس از پایان دوره عمل‌آوری مورد آزمایش قرار گرفتند و ۳ نمونه قبل از آزمایش به مدت ۴۸ ساعت درون آب ۲۵ درجه قرار گرفتند. به هر نمونه از خاک‌ها ۳ مقدار متفاوت CKD اعمال شد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری در شکل ۵ نشان داده شده است.

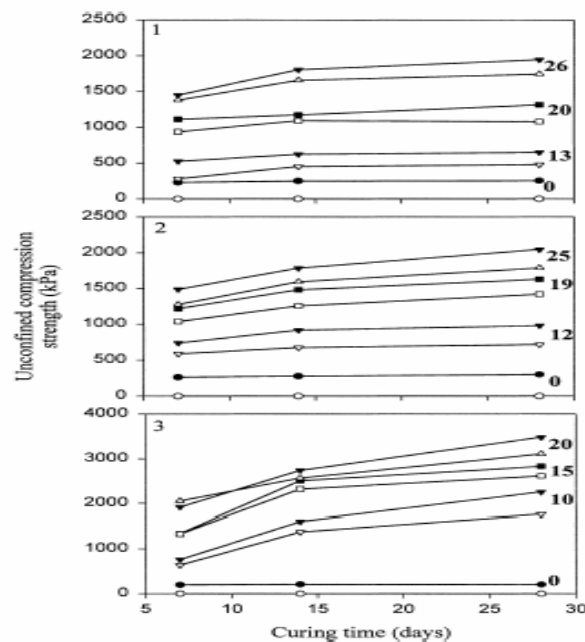
در این شکل نشانه‌های توخالی نشان دهنده نتایج نمونه‌های غوطه ور شده و عدد سمت راست هر دیاگرام نشان‌دهنده درصد CKD اعمالی است. ضمناً در این شکل هر نقطه از دیاگرام‌های رسم شده میانگین ۳ آزمایش می‌باشد. اعداد نوشته شده در سمت چپ و بالای هر دسته از نمودارها شماره هر گروه از خاک‌های مورد آزمایش می‌باشد.

همچنین در شکل ۶ نموداری برای مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های ۲۸ روزه در مقابل درصد سیمان خاکستر کوره اعمالی رسم شده است. از این اشکال نتایج زیر حاصل می‌گردد:

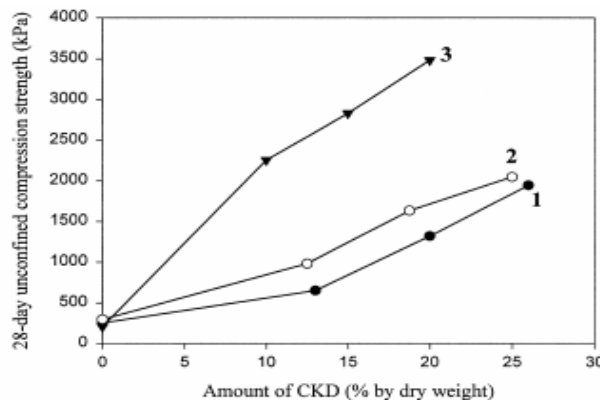
۱- مقاومت فشاری محدود نشده خاک‌های طبیعی در تمامی موارد کمتر از نمونه‌های تثبیت شده می‌باشد و بدیهی است که مقادیر مقاومت فشاری محدود نشده برای این خاک‌ها با گذشت زمان تغییری نمی‌کند.

۲- برای خاک‌های تثبیت شده بیشترین مقاومت حاصله در ۱۴ روز اول به دست می‌آید.

۳- در مقایسه با خاک ۱ (PI=40) و خاک ۲ (PI=30)، مقدار مقاومت به دست آمده با گذشت زمان برای خاک ۳ (PI=6)، به مقدار قابل توجهی بزرگتر می‌باشد.

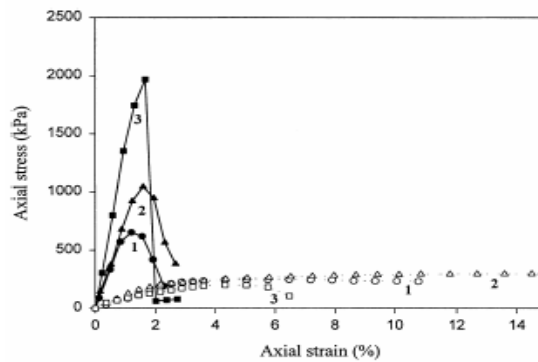


شکل ۵- اثرات دوره عمل آوری بر مقاومت فشاری محدودنشده نمونه‌ها



شکل ۶- اثرات میزان CKD بر مقاومت فشاری محدودنشده نمونه‌های ۲۸ روزه

۴- خاک‌های تثبیت‌نشده با غوطه‌وری در آب کاملاً گسیخته شدند و مقاومت فشاری محدودنشده آنها بر طبق دیاگرام‌های رسم شده صفر شده‌است.  
۵- مقدار مقاومت نمونه‌های غوطه‌ور شده در آب بین ۵۰ تا ۱۰۰ درصد نمونه‌های مشابه غوطه‌ور نشده بوده و همچنین مقاومت نهایی اکثر نمونه‌ها بین ۷۵ تا ۹۵ درصد نمونه‌های غوطه‌ور نشده می‌باشد. به این ترتیب اعمال CKD به خاک باعث افزایش مقاومت خاک در شرایط اشباع می‌گردد.  
۶- مقدار افزایش در مقاومت فشاری محدودنشده با توجه به اعمال مقدار مشابهی CKD، به مقدار قابل توجهی برای خاک ۳ که نشانه خمیری کمتری دارد، بیشتر بوده‌است. البته میزان تغییرات در مقاومت فشاری محدودنشده به ازای یک مقدار ثابت افزایش در میزان CKD تقریباً مشابه می‌باشد. با توجه به نمودارهای رسم شده در شکل ۶، میانگین شیب‌ها به ترتیب ۹۹، ۸۵ و ۱۲۳ کیلو پاسکال به ازای ۱ درصد افزایش CKD به ترتیب برای خاک‌های ۱، ۲ و ۳ می‌باشد. این مورد نشان می‌دهد که مقدار مشخصی از CKD جهت انجام واکنش‌های متفاوتی که با کانی‌ها و مواد شیمیایی رس انجام می‌گیرد لازم بوده و مقدار CKD اضافی در واکنش‌های سیمانی شدن شرکت می‌نماید [۱۲ و ۱۳]. این مورد مشابه آهک است که مقدار مشخصی از آن درحین تبادل کاتیونی و واکنش با سولفات، کربن آلی و سایر مواد شیمیایی موجود در خاک مصرف می‌گردد. برای به دست آوردن مقاومت قابل توجه در تثبیت با آهک، آهک باید به میزانی اعمال گردد که تمام این واکنش‌ها انجام شده و همچنین مقدار آهک کافی جهت انجام واکنش‌های مقاومت‌زا وجود داشته باشد. به همین دلیل در یک میزان مساوی از ماده تثبیت‌کننده میزان مقاومت کسب شده در خاک‌های خمیری‌تر کمتر است و مقدار کارایی CKD با افزایش PI کم می‌گردد.  
نمودارهای تنش - کرنش برای خاک تثبیت‌شده با CKD در شکل ۷ رسم شده‌است. از این نمودارها مشخص است که میزان سختی این خاک‌ها به میزان قابل توجهی افزایش یافته و گسیختگی در مقادیر کرنش کمتری نسبت به خاک‌های طبیعی رخ می‌دهد.



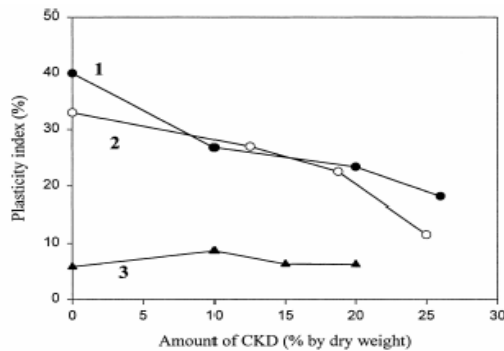
شکل ۷- ارتباط کرنش محوری و تنش محوری در خاک‌های تثبیت‌شده با ۱۰ درصد CKD و نمونه‌های خاک طبیعی

### آزمایش‌های حدود اتربرگ

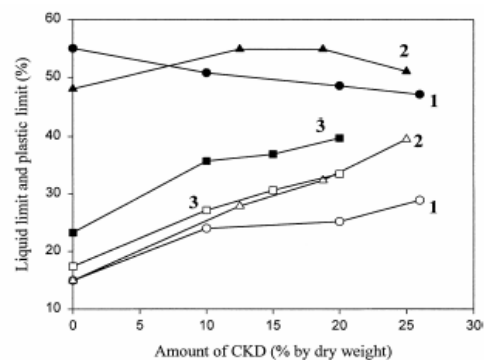
پس از اعمال CKD، به خاک‌های مورد نظر و نگهداری آنها به مدت ۲ روز، این نمونه‌ها در جریان هوا خشک شده و بخش رده‌شده از الک شماره ۴۰ استخراج گردید. سپس آزمایش حدود اتربرگ طبق استاندارد ASTM D4318 بر روی نمونه‌ها انجام گرفت [۱۴]. در مطالعات متعدد انجام شده در زمینه اثرات تثبیت کننده‌ها بر مقدار حدود اتربرگ خاک‌ها، مقدار زمان پیشنهادی برای نگهداری نمونه‌ها قبل از انجام این آزمایش‌ها ۱ الی ۲ ساعت بوده‌است؛ ولی به دلیل پایین تر بودن زمان گیرش برای این ماده، نسبت به آهک و سیمن‌های معمولی، نمونه‌ها پس از نگهداری به مدت ۲ روز مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ در شکل‌های ۸ و ۹ ارایه گردیده است. در شکل ۸ نمودارهایی که با علامت‌های توخالی رسم شده‌اند، مربوط به نتایج آزمایش‌های حد خمیری و نمودارهایی که با علامت‌های توپر رسم شده‌اند، مربوط به آزمایش‌های حدروانی هستند. در شکل ۸، مشاهده می‌گردد که حد خمیری هر ۳ خاک با افزایش مقدار CKD، افزایش یافته‌است. همچنین مقدار حدروانی نمونه‌های خاک ۱ و ۲ تغییرات چندانی نداشته و مقدار حدروانی خاک ۳ بر خلاف دو خاک دیگر مشابه حدخمیری این خاک افزایش یافته است. مطالعات انجام گرفته توسط Kinter و Diamond نشان می‌دهد که با توجه به ماهیت کانی‌های رسی موجود در خاک، مقدار حدروانی خاک با افزایش مقدار CKD، افزایش و یا کاهش می‌یابد، ولی حد خمیری وابستگی قابل توجهی به ماهیت کانی‌های رسی و واکنش تبادل کاتیونی نداشته و مقدار آن با افزایش مقدار CKD، افزایش می‌یابد [۱۲].

مطالعات انجام شده بر روی اثرات ماهیت کانی‌های رسی بر نتایج آزمایش‌های حدروانی و حدخمیری نشان داده‌اند که حدروانی رس‌هایی که حاوی مقدار قابل توجهی کلسیم هستند، با اعمال CKD به آنها افزایش می‌یابد [۱۲]. این مورد برای سایر تثبیت کننده‌ها از جمله آهک نیز اثبات شده‌است. در مقابل حدروانی رس‌هایی که حاوی کانی‌های تک ظرفیتی از جمله سدیم هستند، با اعمال CKD، کاهش می‌یابد [۱۲]. بنابراین نمودارهای شکل ۸ نشان دهنده نتایج مشابه با مطالعات انجام شده در این زمینه می‌باشند.

در شکل ۹ مشاهده می‌گردد که در اثر اعمال CKD به خاک‌های ۱ و ۲، مقدار دامنه خمیری با افزایش مقدار این تثبیت کننده به طور یکنواخت کاهش می‌یابد، ولی به دلیل کم بودن دامنه خمیری خاک ۳ در حالت طبیعی، مقدار دامنه خمیری آن با افزایش مقدار تثبیت کننده تغییرات قابل توجهی ندارد. همچنین این مورد با توجه به نظریه ماهیت کانی‌های رسی می‌تواند به دلیل بالابودن مقدار کلسیم در ساختار کانی‌های رسی این خاک باشد.



شکل ۹- اثرات میزان CKD بر شاخص خمیری



شکل ۸- اثرات درصد CKD بر خواص خمیری خاک‌ها



## نتیجه گیری

از بررسی‌های انجام گرفته در این تحقیق نتایج زیر حاصل می‌گردد:

- ۱- اثرات خاکستر کوره بر هر ۳ گروه از خاک‌های مورد بررسی مطلوب می‌باشد. مقدار افزایش مقاومت فشاری خاک ۳ به دلیل کمتر بودن دامنه خمیری این خاک نسبت به دو خاک دیگر بیشتر می‌باشد. کمتر بودن مقدار دامنه خمیری این خاک باعث می‌گردد که بخش اندکی از این ماده صرف واکنش تبادل کاتیونی که باعث بهبود خواص خمیری می‌گردد، شده و بخش اعظمی از ماده اعمالی باعث افزایش مقدار مقاومت خاک ۳ می‌گردد. بنابراین به ازای مقداری برابر از این خاکستر، مقدار مقاومت به دست آمده از خاک ۳ بیشتر از دو خاک دیگر می‌باشد.
- ۲- اثرات خاکستر کوره سیمان بر خصوصیات خمیری خاک‌های ۱ و ۲ مطلوب است؛ ولی این ماده اثرات چندانی بر مقدار دامنه خمیری خاک ۳ ندارد. اعمال این ماده به خاک ۳ باعث افزایش حد روانی و حد خمیری این خاک به موازات هم می‌گردد.
- ۳- اعمال این ماده به هر ۳ خاک همانند سایر تثبیت کننده‌ها باعث افزایش شکنندگی خاک‌های تثبیت شده می‌گردد. بنابراین میزان کرنش این خاک‌ها در زمان گسیختگی به مراتب کمتر از خاک‌های تثبیت نشده می‌باشد.
- ۴- اثرات این ماده بر خصوصیات تراکمی خاک‌های تثبیت شده مشابه اثرات سایر افزودنی‌ها می‌باشد.
- ۵- با توجه به کمتر بودن میزان اکسیدها در این ماده نسبت به سیمان‌های معمولی مقدار مورد نیاز جهت اعمال به خاک بالاتر از مقادیر معمولی مورد استفاده برای سیمان‌های معمولی می‌باشد. علی‌رغم این مورد به دلیل ارزان بودن این ماده استفاده از آن اقتصادی‌تر از سیمان‌های معمولی و آهک می‌باشد.

## مراجع

- 1.Todres HA, Mishulovich A, Ahmad J. "Cement kiln dust management:permeability",research and development bulletin RD103T. Skokie, IL: Portland Cement Association, 1992:1-6.
- 2.Baghdadi ZA, Fatani MN, Sabban NA. "Soil modification by. cement kiln dust", J Mater Civil Eng 1995;7 4 :218-222.
- 3.Kamon M, Nontanandh S. "Combining industrial wastes with lime for soil stabilization", J Geotech Eng 1991;117(1) :1-17.
- 4.Baghdadi ZA. "Utilization of kiln dust in clay stabilization", JKing Abdulaziz Univ: Eng Sci 1990; 2:53-163.
- 5.Fatani MN, Khan AM. "Improvement of dune sand asphaltmixes for pavement bases", J King Abdulaziz Univ: Eng Sci1990;2:39-47.
- 6.Kota PBVS, Hazlett D, Perrin L. "Sulfate-bearing soils: problems with calcium-based stabilizers", transportation research record 1546. Washington, DC: Transportation Research Board,National Research Council, 1996:62-69.
- 7.Zaman M, Lagurous JG, Sayah A. "Soil stabilization using cement kiln dust", Proceedings of the 7th International Conference on Expansive Soils, Dallas, TX, 3-5 August, 1992. 347-51.
- 8.Miller GA, Azad S, Dhar B. "The effect of kiln dust on the collapse potential of compacted shale", In: Wasemiller MA,Hoddinott KB, editors. Testing soil mixed with waste or recycled materials, ASTM STP 1275. West Conshohocken, PA:American Society for Testing and Materials, 1997:232-245.
- 9.Marquez, H.R. "Evaluation of cement kiln dust soil stabilization for Oklahoma PraChic 12 1 Guy Sandy Area Chickasaw National recreation area", Internal report, Federal Highway Administration Central Federal Lands Highway Division Materials Branch, May 1, 1997.
- 10.Shawn, S., Value engineering proposal, prepared for the Federal Highway Administration office, Sulfur, OK, January 1,1997.
- 11.Eades JL, Grim RE. "A quick test to determine lime requirements for lime stabilization", Highway research record 139. Washington, DC: Highway Research Board, National Research Council, 1966:61-72.
- 12.Diamond S, Kinter EB. "Mechanisms of soil-lime stabilization, an interpretive review", Highway research record 92. Washington,DC: Highway Research Board, National Research Council,1965:83-102
- 13.Terrel, R.L., Epps, J.A., Barenberg, E.J., Mitchell, J.K.,Thompson, M.R. "Soil stabilization in pavement structures", a user's manual, vol. 2, Mixture design considerations, Report no.FHWA-IP-80-2, Federal Highway Administration, US Department of Transportation,1979.
- 14.ASTM. "Annual book of ASTM standards", section 4.08. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, 1998.