

## مروری بر استفاده از خاکستر بادی برای تثبیت خاک

### مقاله علمی - مروری

واحد قیاسی\*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

علی نژدقربانی، دانش آموخته کارشناسی، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: v.ghiasi@malayeru.ac

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۵

صفحه ۴۵۵-۴۸۸

### چکیده

استفاده از مواد ضایعاتی کارخانجات و صنایع مختلف در خاک با هدف بهبود خصوصیات مهندسی، از جمله روش‌های مورد توجه جدید در این زمینه است. خاکستر بادی محصولی فرعی مهمی از نیروگاه‌های سوخت ذغال سنگ یا از حرارت دادن ضایعات برخی کارخانه‌ها نیز بدست می‌آید که دارای خاصیت پوزولانی مناسبی بوده و در پروژه‌های ساختمانی جهت استفاده در بتن و در پروژه‌های ژئوتکنیکی برای تثبیت خاک کاربرد دارد. در این تحقیق مروری، از نوعی خاکستر بادی با خصوصیات شیمیایی متفاوت نسبت به دیگر مطالعه‌های مرتبط با هدف بهسازی خاک دانه ای موجود در مناطق مرکزی ایران استفاده شده است. آزمایش تراکم، نفوذپذیری و نسبت باربری کالیفرنیا بر روی نمونه‌ها با درصد‌های متفاوت از خاکستر بادی با یا بدون آهک در مدت زمان‌های متفاوت عمل آوری انجام گرفته است. مطابق نتایج تحقیق می‌توان بیان کرد که با اضافه شدن خاکستر بادی تا ۲۰ درصد در خاک ماسه ای بدون آهک، باعث افزایش بیشتری در وزن مخصوص خشک حداکثر می‌شود و این مقدار با وجود ۱۰ درصد آهک به مقدار ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. به علت وزن مخصوص کمتر خاکستر بادی نسبت به خاک، حداکثر چگالی خشک با افزایش خاکستر بادی، کاهش می‌یابد. در ضمن مقدار رطوبت بهینه با افزایش خاکستر بادی افزایش می‌یابد. افزودن خاکستر بادی مقاومت فشاری محدود نشده‌ی خاک را افزایش می‌دهد. بیش از ۲۸ روز هیچ افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری محدود نشده وجود ندارد. افزایش قابل توجهی در چسبندگی در زمان‌های طولانی‌تر در نمونه‌های حاوی خاکستر بادی با درصد بیشتر وجود دارد. این تأثیر ممکن است ناشی از افزایش چسبندگی خاک با واکنش پوزولانی ذرات ریز خاکستر بادی و اثر سخت شدن آن مربوط به حضور آهک آزاد با بخش محلول در آب خاکستر بادی می‌باشد. اصلاح خواص مکانیکی خاک مخلوط شده با خاکستر بادی یا خاک به تنهایی، در بخشی می‌تواند به از دست دادن- رطوبت نمونه در طول مدت بهبودی وابسته باشد.

واژه‌های کلیدی: آهک، خاکستر بادی، ماسه، نفوذپذیری، نسبت باربری کالیفرنیا

### ۱- مقدمه

استفاده از مواد ضایعاتی کارخانجات و صنایع مختلف در خاک با هدف بهبود خصوصیات مهندسی، از جمله روش‌های مورد توجه جدید در این زمینه است. خاکستر بادی محصولی فرعی مهمی از نیروگاه‌های سوخت ذغال سنگ یا از حرارت دادن ضایعات برخی کارخانه‌ها نیز بدست می‌آید که دارای خاصیت پوزولانی مناسبی بوده و در پروژه‌های ساختمانی برای استفاده در بتن و در پروژه‌های ژئوتکنیکی جهت تثبیت خاک کاربرد دارد. (بیات و بحرینیان، ۱۳۹۹)

### ۲- مقررات ملی ساختمان مبحث نهم خاکستر

بادی را چنین تعریف نموده است.

خاکستر بادی محصول فرعی سوخت ذغال سنگ است که شامل سیلیس، آلومین و اکسیدهای آهن و کلسیم است. خاکستر بادی در انواع C و F وجود دارد. نوع C خاکستر بادی به دلیل دارا بودن بیش از ۱۰ درصد اکسید کلسیم خاصیت سیمانی شدن نیز دارد. در نیروگاه‌هایی که از ذغال سنگ به عنوان سوخت استفاده می‌کنند، ذرات شیشه‌ای و

استفاده می‌گردد. به تازگی استفاده از آهک به منظور تثبیت خاکهای ساختمانی و خاک‌های آلوده شامل: مواد سیلیسی و آلومینی واکنش نداده، مورد استفاده قرار گرفته است (Amu et al., 2011)

درصد مناسب آهک معمولاً تابعی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک است که از طریق آزمایش‌های المانی تعیین می‌شود که بر حسب درصد وزنی خاک خشک اعلام می‌گردد. (روشندل، ۱۳۷۸ و ترابی و حیدری، ۱۳۹۸)

تکنولوژی بهینه‌سازی خاک با آهک به طور گسترده با کاربری‌های زیست محیطی و ژئوتکنیکی مانند جذب آب خاک‌های آلوده مرطوب، پایدارسازی شیب‌ها، درزبندی بزرگراه‌ها و اصلاح خاک فونداسیون ساختمان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. باید این نکته را نیز در نظر داشت که وجود مواد معدنی و سولفور به علت واکنش با آهک و ایجاد تورم و در نتیجه کاهش مقاومت خاک، باعث ایجاد محدودیت در استفاده از فرآیند بهسازی و تثبیت با آهک در کلیه خاک‌ها می‌گردد. (نجفی و مهدی زاده، ۱۳۹۸) امروزه افزودن برخی از پسماند و یا مواد ضایعاتی به خاک جهت عملیات تثبیت، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. همچنین افزودن اینگونه مواد به خاک علاوه بر بهبود بخشیدن به خواص خاک می‌تواند از دو جنبه کاهش هزینه‌های اجرایی و دفع مواد ضایعاتی، مورد مطالعه قرار گیرد (Pitroda, 2013)

این مسئله مهم مهندسين و محققين را بر آن داشت تا ضمن انجام مطالعات آزمایشگاهی و نیز تحقیقات عملی سعی کنند تا از مواد ضایعاتی صنایع مختلف استفاده بهتری داشته که از طرفی از نظر زیست محیطی مشکل را نباشند و همچنین از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشند.

### ۳-۱- عملیات تثبیت شیمیایی خاک با استفاده از آهک

#### با سیمان

قیاسی و همکاران در سالهای گذشته طی تحقیقات خود پیرامون سایر روش‌های بهسازی خاک به نتایجی دست یافتند. روشی مؤثر و قدیمی جهت بهبود خصوصیات نشست پذیری و تورمی خاکها است. با هدف افزایش مقاومت و کاستن از میزان سیمان مصرفی به عنوان یک ماده نسبتاً گران قیمت، می‌توان از مواد پوزولانی دیگر مانند خاکستر بادی استفاده نمود. استفاده از این ماده باعث کاهش تأثیرات مخرب سولفات‌ها مثل

کروی شکل بسیار ریز به ابعاد ۱ الی ۸۰ میکرون (ابعاد دانه‌ای سیمان که مقاومت سیمان را تامین می‌کنند ۱۰ الی ۲۴ میکرون می‌باشند و ابعاد دانه‌های دوده سیلیسی که به شکل ذرات کروی شکل کوچک هستند دارای قطر متوسط حدود ۰٫۱ می‌باشند) و در درجه ۱۶۰۰ سانتی‌گراد به عنوان محصول فرعی تولید می‌شوند که از بالای کوره احتراق خارج و به سرعت سرد می‌شود. این محصول که خاصیت پوزولانی دارد و خاکستر بادی نامیده می‌شود از اختلاط دو فاز شیشه‌ای یا بلوری نشده که این فاز حدود ۶۰ الی ۹۰ درصد وزنی محصول را تشکیل می‌دهد و فاز بلوری نشده که ۱۰ الی ۴۰ درصد وزنی محصول را تشکیل می‌دهد تشکیل شده است. خواص و کیفیت خاکستر بادی به عوامل متعددی از جمله نوع ذغال سنگ و ترکیب آن، کارایی آسیاب خرد کننده ذغال، شرایط احتراق شامل درجه حرارت و مقدار اکسیژن لازم برای سوختن و نوع کوره و به ویژه سرعت سرد شدن ذرات بستگی دارد. (مصباح ایران‌دوست و جوادین، ۱۳۸۹).

### ۳-۲- تاثیر خاکستر بادی بر خاک‌های دانه‌ای

از جمله خاکه‌ای مسئله‌دار که در سطح ایران بسیار زیاد یافت می‌شوند، خاک‌های دانه‌ای مخصوصاً خاک‌های ماسه بادی هستند که در مناطق کویری وجود دارند. مشخصاتی مانند مقاومت کم، پایین بودن ظرفیت باربری و نفوذپذیری نسبتاً بالا باعث می‌گردد که این نوع خاک در پروژه‌های مهندسی مانند راهسازی گزینه مناسبی نباشند. تثبیت خاک گزینه مناسبی نسبت به تعویض خاک و یا تعویض محل پروژه مورد نظر است، چرا که هم از نظر زمانی و هم از نظر اقتصادی به صرفه تر خواهد بود. در سال‌های گذشته، محققین با بررسی‌های آزمایشگاهی استفاده از مواد و مصالحی همچون آهک، سیمان، خاکستر بادی، مواد زائد صنعتی، کلراید کلسیم، اسید فسفریک و غیره جهت تثبیت انواع مختلف خاک‌ها و بهبود رفتار مکانیکی و خصوصیات فیزیکی آنها را اثبات کرده‌اند. (بیات و بحرینیان، ۱۳۹۹). آهک یکی از مواد تثبیت کننده جهت استفاده برای بهبود خواص خاک و به عنوان یکی از مقرون به صرفه‌ترین انواع روش‌های تثبیت خاک به حساب می‌آید. بهسازی و اصلاح با آهک منجر به افزایش مقاومت خاک از طریق تبادل یونی و واکنش پوزولانی می‌گردد. آهک به منظور تثبیت خاک جاده‌ها و اصلاح خواص پلاستیکی خاکها نیز

### ۲-۳- آهک و خاکستر بادی برای تثبیت روسازی

کومار و همکاران در سال ۲۰۱۶ ترکیب پودر سنگ آهک و خاکستر بادی را برای تثبیت سازی خاک متورم شونده برای استفاده در کفسازی در پیاده رو مورد پژوهش قرار داده اند. در این پژوهش نمونه‌ها دارای ۹ درصد پودر سنگ آهک بوده و پژوهش نشان می‌دهد که هرچه درصد خاکستر بادی در نمونه‌ها افزایش یابد، میزان رطوبت بهینه افزایش و وزن مخصوص خشک حداکثر نمونه‌ها نیز کاهش می‌یابد. از طرف دیگر افزایش خاکستر بادی همواره میزان نفوذپذیری نمونه‌ها را کاهش می‌دهد. (Kumar et al., 2016)

نتایج آزمایشات نسبت باربری کالیفرنیا نشان دهنده آن است که CBR نمونه‌ها تا میزان ۱۵ درصد خاکستر بادی افزایش یافته و بعد از آن کاهش می‌یابد. پارامترهای مقاومت برشی نیز با افزایش خاکستر بادی تا ۱۵ درصد روند افزایشی داشته و بعد از آن کاهش یافته است. (Kumar et al., 2016)

راجو و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی تأثیر خاکستر بادی بر روی خاک متورم شونده پرداختند و خصوصياتی مانند شاخص تورم، مقاومت فشاری محصور نشده و CBR را برای نمونه‌ها با درصدهای مختلف خاکستر بادی صفر درصد، ۱۰ درصد، ۲۰ درصد، ۳۰ درصد، ۴۰ درصد، ۵۰ درصد مورد ارزیابی قرار دادند که بر اساس نتایج بدست آمده مشخص گردید که شاخص تورم با افزایش خاکستر بادی تا ۲۰ درصد کاهش می‌یابد و بعد از آن افزایش خاکستر بادی، شاخص تورم را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر مقاومت فشاری محصور نشده تا ۱۰ درصد خاکستر بادی روند کاهشی و سپس تا ۲۰ درصد روند افزایشی را نشانه همچنین میزان خاکستر بادی در نمونه‌ها از صفر تا بیست درصد متغیر در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده از این می‌دهد. نمودار مقادیر آزمایش CBR نیز دارای ۲۰ درصد خاکستر بادی به حالت اوج خود رسیده است. (Raju et al., 2015)

تک‌هلماتوم و همکاران در سال ۲۰۱۳ تأثیر خاکستر بادی با میزان آسیاب شدگی متفاوت بصورت درشت و ریز روی خاک متورم شونده را در درصدهای ۵ الی ۳۰ درصد از خاکستر بادی، مورد مطالعه قرار دادند. آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده بر روی نمونه‌ها انجام شده و آنها نشان می‌دهد که هرچه خاکستر بادی ریزدانه‌تر باشد تأثیر مطلوبتری در بهبود خواص مقاومتی خواهد داشت. همچنین نقطه ماکزیمم مقاومتی بدست آمده را در نمونه دارای ۲۵ درصد خاکستر بادی ریز بعنوان بهینه ترین حالت بدست آمد. (Takhelmatum et al., 2013)

افزایش حجم و ترک خوردگی و میزان کربناسیون در خاک مورد تثبیت با آهک و یا سیمان میشود و همچنین Ph مخلوط و یون کلسیم را افزایش داده و باعث سرعت بخشیدن به واکنش پوزولانی می‌گردد. (Diamond et al., 1965)

در متون علمی و مقالات، تعاریفی که برای ماده خاکستر بادی آورده‌اند بر مبنای ماده اولیه، فرآیند تولید و روش جمع‌آوری متفاوت است که از جمله مهمترین آنها می‌توان به سه مورد زیر اشاره نمود:

-خاکستر بادی که از سوختن زباله و یا سایر مواد ضایعاتی در کوره در دمای بین ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به دست می‌آید. خصوصیات پوزولانی این مواد با آسیاب شدن نیز بیشتر می‌گردد. این نوع خاکستر بادی دارای مقدار  $SiO_2$  است. (فروزش و قربانی، ۱۳۹۰)

-خاکستر بادی به جا مانده از احتراق ذغال سنگ پودر شده در کوره که از محصولات نیروگاهها با سوخت ذغال سنگ است. یک گرد بسیار ریز دانه است که ترکیبی از سیلیس، آلومینا، اکسیدها و مواد قلیایی مختلف است و دارای طبیعت پوزولانی بوده و می‌تواند با آهک هیدراته واکنش داده و فرآیند سیمنتاسیون به وجود آورد. (Kumpiene et al., 2007)

-خاکستر بادی محصولی فرعی حاصل از سوختن زغالسنگ در کارخانه‌های تولید نیرو که دارای خواص سیمانی کم در مقایسه با آهک و سیمان است. ترکیبات شیمیایی این ماده وابسته به نوع مواد معدنی همراه زغالسنگ و نیز شرایط آن در کوره است. اکثر خاکسترهای بادی به دلیل خاصیت ضعیف سیمانی، به عنوان ماده تثبیت کننده ثانویه به کار گرفته می‌شوند. هرچند در صورت وجود فعال کننده‌های قلیایی، واکنش پذیری شیمیایی آنها افزایش یافته و امکان تولید ماده سیمانی جهت بهبود مقاومت در خاک نرم را می‌یابد. به طور کل خاکستر بادی در دو دسته، یکی با خاصیت سیمانی زیاد به علت وجود محتوی  $CaO$  آزاد بالا و دیگری با خاصیت نیمه سیمانی ضعیف به دلیل محدودی مقدار  $CaO$  آزاد قابل دسترسی وجود دارد. (Yeheyis et al., 2008)

با اضافه کردن فعال کننده‌هایی مثل سیمان پرتلند و آهک به مخلوط خاک و خاکستر بادی، واکنش پذیری خاکستر بادی و همچنین کارایی این ماده تثبیت کننده افزایش می‌یابد (Shen et al., 2007), (Kaniraj et al., 2001)

علل استفاده از خاکستر بادی در پروژه‌های عمرانی را در کل می‌توان بدلیل مسائل محیط زیستی، مسائل فنی و مهندسی و جنبه اقتصادی آن بیان نمود.

نیز از طریق عکس‌های میکروسکوپی، نتایج آزمایش‌ها تفسیر شده است. (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۱)

### ۳-۴- مواد و روش‌ها

برای تحقیق حاضر از یک نوع ماسه با دانه‌بندی تقریباً یکنواخت به عنوان ماده اصلی و نیز خاکستر بادی و آهک به عنوان ماده افزودنی استفاده شده است.

در درصدهای وزنی مختلف خاکستر بادی بصورت اضافه شده با آهک یا بدون آهک، آزمایش تراکم جهت تعیین رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر، آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا CBR جهت بررسی رفتار برشی و همچنین آزمایش نفوذپذیری جهت تعیین پارامتر ضریب نفوذپذیری نمونه‌ها به کار برده شده است. آزمایش‌ها بر روی نمونه‌ها با مدت عمل آوری متفاوت ۲، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه انجام شده است. (بیات و بحرینیان، ۱۳۹۹)

### ۳-۴-۱- مشخصات ماسه و خاکستر بادی

خاک تهیه شده برای این پژوهش یک نمونه از ماسه با دانه‌بندی یکنواخت است که از تپه‌های ماسه بادی واقع شده در کویر شمالی شهرستان آران و بیدگل معروف به کویر مرنجاب در استان اصفهان تهیه شده است. دشت مرنجاب در محدوده جغرافیایی با مشخصات ۵۴ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۵۷ درجه طول شرقی و ۳۳ درجه ۳۰ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی در مرکز فلات ایران واقع شده است. محل کویر مرکزی از شمال به دامنه‌های البرز مرکزی و شرقی، از غرب نیز به جاده ارتباطی دامغان به جندق و کویر ریگ جن، از شرق به کوه‌های پیر حاجات و ازبک کوه و از جنوب به محور ارتباطی خور- طبس محدود می‌گردد. با توجه به کویری بودن منطقه ۱۹۰۰ کیلومتر مربع ۳۱ درصد مساحت شهرستان در تپه‌های ماسه‌ای واقع شده است. در شکل ۱ و ۲ عکس ماهواره‌ای از منطقه مورد مطالعه و محل برداشت خاک جهت انجام آزمایش‌ها نشان داده شده است.

در شکل ۳ نیز دانه‌بندی ماسه بکار رفته در این تحقیق به همراه مشخصات فیزیکی نشان داده شده است که طبق طبقه‌بندی یونیفاید USCS خاک مورد استفاده ماسه بدانه‌بندی شده (SP) است. (بیات و بحرینیان، ۱۳۹۹)

ازجمله پارامترهای متفاوت بین انواع خاکستر بادی میزان سیلیس آنها و خاصیت سیمانی آنها است که در یک دسته‌بندی کلی، آنها را در دو کلاس دارای خاصیت سیمانی کم و زیاد تقسیم بندی می‌کنند.

کیم در سال ۲۰۱۵ به بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی مخلوط خاکستر بادی برای استفاده در خاکریزی‌های بزرگراه‌ها پرداختند. در این تحقیق با بررسی هزینه‌های دفن خاکستر بادی به عنوان ماده ضایعاتی صنایع و مقایسه آن با هزینه استفاده از آن به عنوان مصالح قرضه و مقایسه نتایج نشان دادند که استفاده از خاکستر بادی جهت تثبیت خاک در محل دارای صرفه اقتصادی است. (Kim, 2015)

### ۳-۳- خاکستر بادی در تثبیت خاک بستر نرم

فرخی و همکاران در سال ۱۳۹۳ به بررسی تأثیر استفاده از مخلوط آهک با خاکستر بادی در تثبیت بستر خاک نرم با استفاده از آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا پرداخته‌اند. خاک مورد استفاده آنها از نوع رس شن‌دار بوده است. خاکستر بادی مورد استفاده در این تحقیق نیز دارای مواد سیلیسی و ارزش سیمانی بسیار کم بوده و به همین خاطر این خاکستر بادی نیاز به مقادیر کمی آهک برای انجام واکنش پوزولانی خواهد داشت. در این تحقیق، مقدار ۶ درصد آهک را با درصدهای مختلفی از خاکستر بادی مخلوط شده و به همراه خاک تحت آزمایش CBR قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که ۶ درصد آهک به همراه ۳ درصد خاکستر بادی به شکل مؤثری می‌تواند به بهبود خاک رس بستر کمک کرده و باعث ایجاد واکنش پوزولانی می‌گردد. (فرخی و همکاران، ۱۳۹۳)

نوروزی و همکاران در سال ۱۳۹۱ به بررسی تأثیر افزودن خاکستر بادی بر خواص ژئوتکنیکی مخلوط خاک رس و آهک پرداخته‌اند که در نهایت با استفاده از نتایج میتوان بیان نمود که افزودن مقدار کمی آهک به خاک عمدتاً باعث بهبود خواص مقاومتی می‌گردد ولی اگر خاک دارای یون سولفات باشد و یا در معرض آب سولفاته قرار گیرد، استفاده از آهک نه تنها باعث کاهش تورم لایه تثبیت شده نمی‌گردد بلکه نتیجه عکس داده و سبب افزایش تورم و کاهش مقاومت می‌گردد. با توجه به موارد اشاره شده در بالا و مقادیر بهینه متفاوت بدست آمده برای مقدار خاکستر بادی و آهک یا سیمان مورد استفاده در خاک‌های مختلف، می‌توان به این نتیجه رسید که برای هر نوع، بایستی مقادیر بهینه خاکستر بادی به اضافه سیمان یا آهک با آزمایش‌های آزمایشگاهی تعیین شود. به همین دلیل در این تحقیق، مقدار بهینه خاکستر بادی با یا بدون آهک برای منطقه‌های در شمال اصفهان از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی با مدت زمان عمل‌آوری متفاوت بدست آمده است. در نهایت

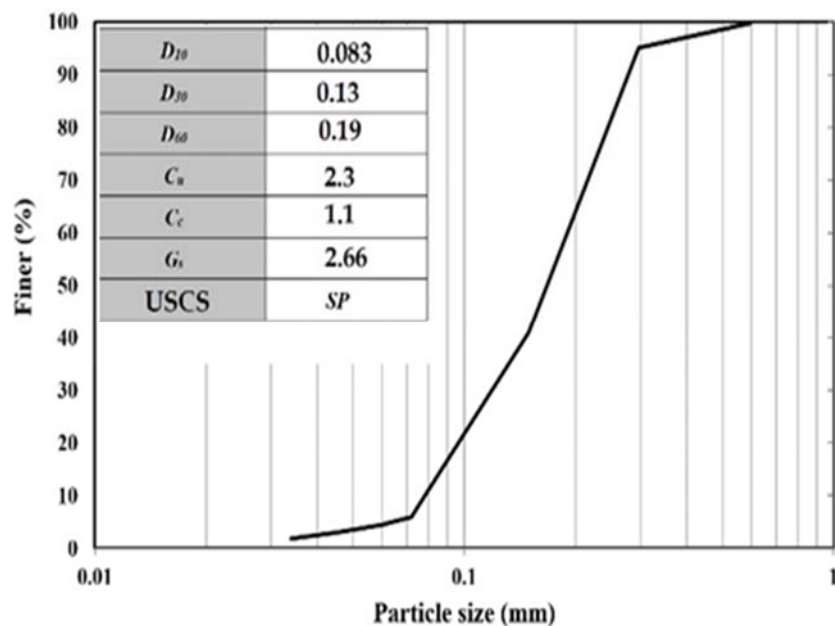


شکل ۱. عکس ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه (بیات و بحرینیان، ۱۳۹۹)



شکل ۲. محل برداشت ماسه مورد استفاده در آزمایش‌ها در این پژوهش از خاکستر بادی با خاصیت سیمانی شدن زیاد که به صورت فله‌های در کیسه های ۲۵ کیلویی از شرکت شهرک بتن اصفهان خریداری و استفاده گردیده است که دارای کد MZYL-G-AB است.  
(بیات و بحرینیان، ۱۳۹۹)

مشخصات شیمیایی خاکستر بادی مورد استفاده در جدول (۱، ۲ و ۳) ارائه شده است.



شکل ۳. منحنی دانه بندی ماسه مورد استفاده (بیات و بحرینیان، ۱۳۹۹)

جدول ۱. مشخصات خاکستر بادی (بیات و بحرینیان، ۱۳۹۹)

| Composition                    | Value (%) |
|--------------------------------|-----------|
| SiO <sub>2</sub>               | ۹۵-۹۴     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ۲-۱       |
| CaO                            | ۰/۶       |
| Na <sub>2</sub> O              | 0/32      |
| K <sub>2</sub> O               | 0/12      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2-3       |
| SO <sub>3</sub>                | 0/12      |

### ۳-۵- برنامه آزمایش‌ها

در نظر گرفته شده‌اند و نیز عمل‌آوری نمونه‌ها در مدت زمان‌های ۲، ۷، ۱۴ و ۲۸ نیز مورد بررسی گرفته است.

### ۳-۶- نتایج آزمایش‌ها

در ادامه نتایج و تفسیر نتایج آزمایش‌های مختلف بر روی نمونه‌های تثبیت شده با خاکستر بادی و یا مخلوط خاکستر بادی و آهک ارائه شده است.

در تحقیق حاضر اثر افزودن خاکستر بادی در درصد‌های مختلف به ماسه میزبان بر روی رفتار مکانیکی و خصوصیات فیزیکی خاک تثبیت شده با آزمایش‌های تراکم پروکتور، نسبت باربری کالیفرنیا CBR و نفوذپذیری بررسی شده است. قابل ذکر است که از طریق تکرار تعدادی از آزمایش‌ها، تکرارپذیری نتایج آزمایش‌ها نیز مورد تایید واقع شده است. کلیه نمونه‌ها در پنج نسبت وزنی نسبت وزن خاکستر بادی به وزن ماسه ۲، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ درصد برای میزان خاکستر بادی در ماسه

جدول ۲. نتایج آزمایش تراکم اصلاح شده ماسه همراه با درصدهای مختلف خاکستر بادی بدون آهک (بیات و بحرینیان، ۱۳۹۹)

| $\gamma_d\text{-max (gr/cm}^3\text{)}$ | $\omega_{opt} \%$ | Fly ash (%) |
|----------------------------------------|-------------------|-------------|
| 1/69                                   | 13/5              | ۰           |
| 1/71                                   | 13/8              | ۲           |
| 1/75                                   | 14/1              | ۱۰          |
| 1/73                                   | 14/3              | ۲۰          |
| 1/70                                   | 14/7              | ۳۰          |
| 1/67                                   | 15/3              | ۴۰          |

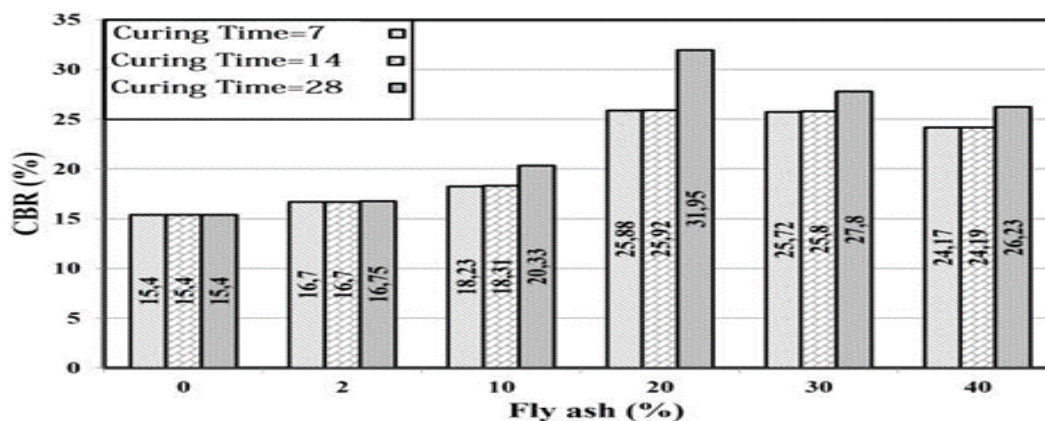
جدول ۳. نتایج آزمایش تراکم اصلاح شده ماسه همراه با درصدهای مختلف خاکستر بادی و ۱۰ درصد آهک (بیات و بحرینیان، ۱۳۹۹)

| $\gamma_d\text{-max (gr/cm}^3\text{)}$ | $\omega_{opt} \%$ | Fly ash (%) |
|----------------------------------------|-------------------|-------------|
| 1/69                                   | 13/5              | 0           |
| 1/71                                   | 13/8              | 2           |
| 1/75                                   | 14/1              | 10          |
| 1/73                                   | 14/3              | 20          |
| 1/70                                   | 14/7              | 30          |
| ۱/۶۷                                   | ۱۵/۳              | ۴۰          |

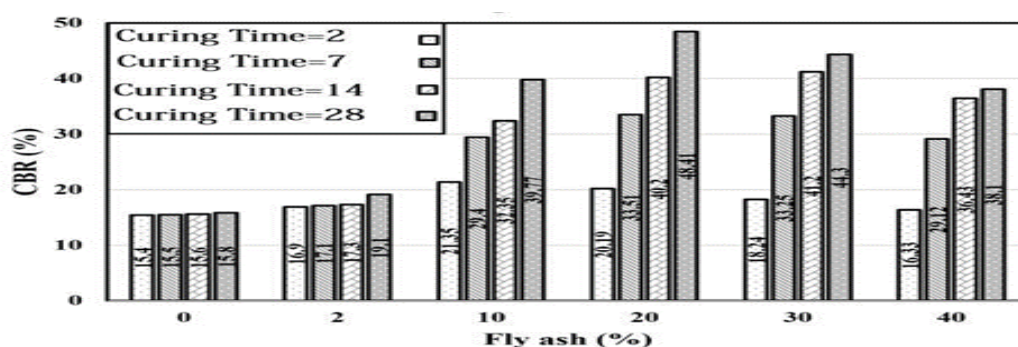
### ۳-۶-۲- آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا CBR

آوری در مدت زمان‌های بیشتر یعنی ۲۸ روزه اثر محسوستری دارد. در صورتی که اختلاف نتایج بین روزهای عمل آوری ۷ و ۱۴ روزه ناچیز است. از طرف دیگر بیشترین مقدار CBR برای یک مدت زمان عمل آوری معین، مربوط به نمونه‌های ۲۰ درصد خاکستر بادی است. بعبارت دیگر، مقدار CBR با افزایش خاکستر بادی تا ۲۰ درصد روند افزایشی و بعد از آن با اضافه شدن بیشتر خاکستر بادی، مقدار آن کاهش می‌یابد، اگر چه طبق نتایج آزمایش تراکم بیشترین مقدار  $\gamma_d\text{-max}$  مربوط به نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد خاکستر بادی است. همچنین این آزمایش برای نمونه‌های ترکیبی درصد‌های مختلف خاکستر بادی و آهک به مقدار ۱۰ درصد به عنوان مواد افزودنی به خاک نیز انجام شد که نتایج آن نیز در شکل ۵ آورده شده است.

برای انجام آزمایش CBR، ابتدا خاک با رطوبت بهینه را در قالبی با قطر ۶ اینچی در ۳ لایه و هر لایه با ۲۵ ضربه چکش تراکم کوبیده شده است. قالب را در زیر دستگاه آزمایش قرار می‌دهیم و بار با استفاده از پیستون دستگاه، با سرعت ۱/۲۷ میلی‌متر بر ثانیه بر روی نمونه اعمال شده است. مقدار نیروی لازم را برای نفوذهای ۲/۵ و ۵ میلی‌متر اندازه شده است. اغلب عدد CBR برای ۲/۵ میلیمتر از همه بیشتر می‌باشد ولی اگر در آزمایش عدد CBR متناظر با ۵ میلی‌متر از ۲/۵ میلی‌متر بیشتر بود، دوباره آزمایش را تکرار می‌کنیم و در صورت مشاهده همان نتایج، عدد متناظر با ۵ میلیمتر را ملاک عمل می‌گیریم. نتایج آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا بر روی مخلوط ماسه و خاکستر بادی در درصد‌های متفاوت از خاکستر بادی که به صورت وزنی با خاک ماسه‌های مخلوط شده است، در زمان‌های عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز در شکل (۴) ارائه شده است. همانطور که در شکل ۴ دیده می‌شود، مدت زمان عمل



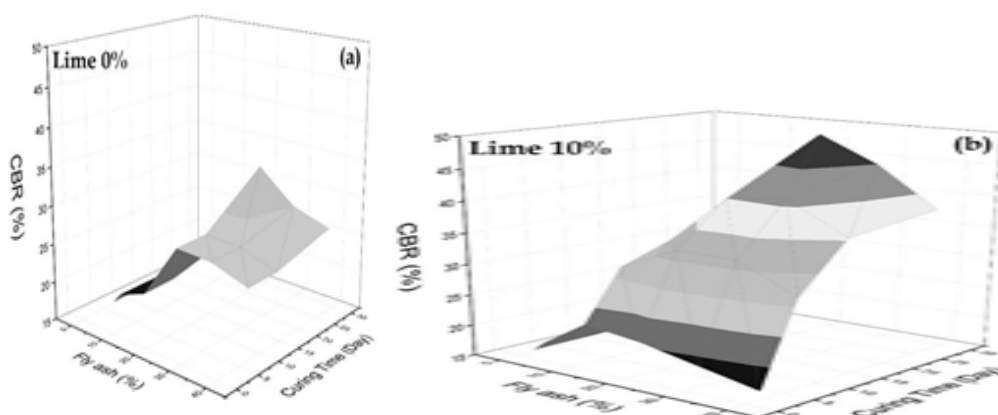
شکل ۴. نتایج CBR برای درصدهای مختلف خاکستر بادی بدون آهک در زمان‌های عمل‌آوری مختلف (بیات و بحرینیان، ۱۳۹۹)



شکل ۵. نتایج CBR برای درصدهای مختلف خاکستر بادی با ۱۰ درصد آهک در زمان‌های عمل‌آوری مختلف (بیات و بحرینیان، ۱۳۹۹)

معادل ۲۰ درصد نسبت به سایر نمونه‌ها با درصدهای دیگر خاکستر بادی محسوس‌تر است. در اینجا نیز برای یک مدت زمان عمل‌آوری معین، نمونه‌ها با ۲۰ درصد خاکستر بادی بیشترین مقدار CBR را کسب نموده‌اند.

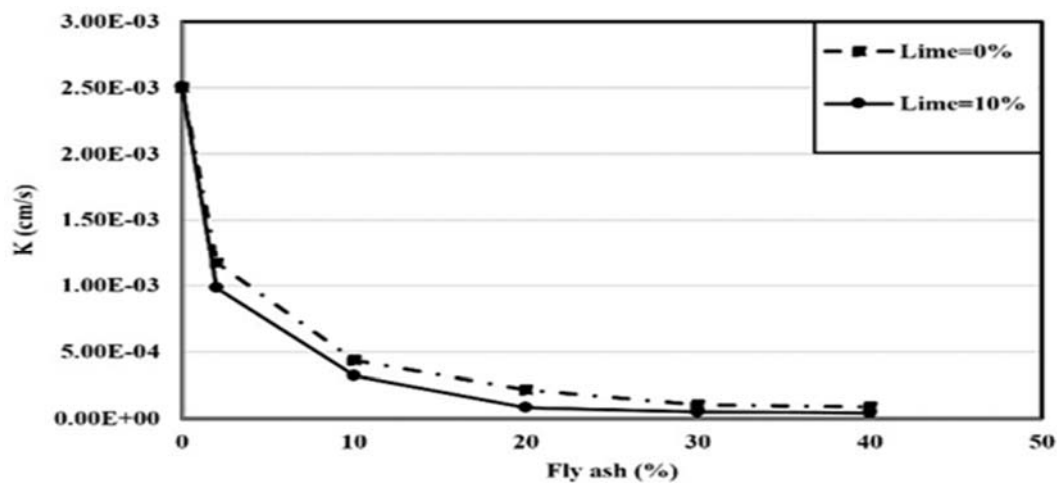
با مقایسه شکل‌های ۴ و ۵ می‌توان به این نتیجه رسید که مدت زمان عمل‌آوری اهمیت بیشتری در نمونه‌های تثبیت شده با خاکستر بادی و آهک نسبت به نمونه‌ها تثبیت شده تنها با خاکستر بادی دارد و این اثر در مقادیر خاکستر بادی



شکل ۶. تغییرات CBR برحسب مقدار خاکستر بادی و زمان عمل‌آوری برای نمونه‌ها با (الف) صفر درصد آهک (ب) ۱۰ درصد آهک (بیات و بحرینیان، ۱۳۹۹)

### ۳-۶-۳- آزمایش نفوذپذیری

در این تحقیق از آزمایش نفوذپذیری با بار افتان بر روی نمونه‌های ماسه با درصد‌های مختلف از خاکستر بادی و آهک برای یافتن ضریب نفوذپذیری استفاده شده است. آزمایش نفوذپذیری برای تعیین تأثیر خاکستر بادی بر روی میزان نفوذپذیری در نمونه‌های ماسه تثبیت شده با این مواد انجام گرفته است. در این آزمایش مخلوط خاک ماسه‌ای و افزودنی (خاکستر بادی یا مخلوط خاکستر بادی و آهک) در قالب‌های مخصوص این آزمایش آماده شده است. نمونه‌های تثبیت شده با پنج درصد وزنی خاکستر بادی ۲ درصد، ۱۰ درصد، ۲۰ درصد، ۳۰ درصد ۴۰ درصد در زمان عمل آوری هفت روزه مورد آزمون نفوذپذیری با هد افتان قرار گرفته‌اند که نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۷ ارائه شده است.

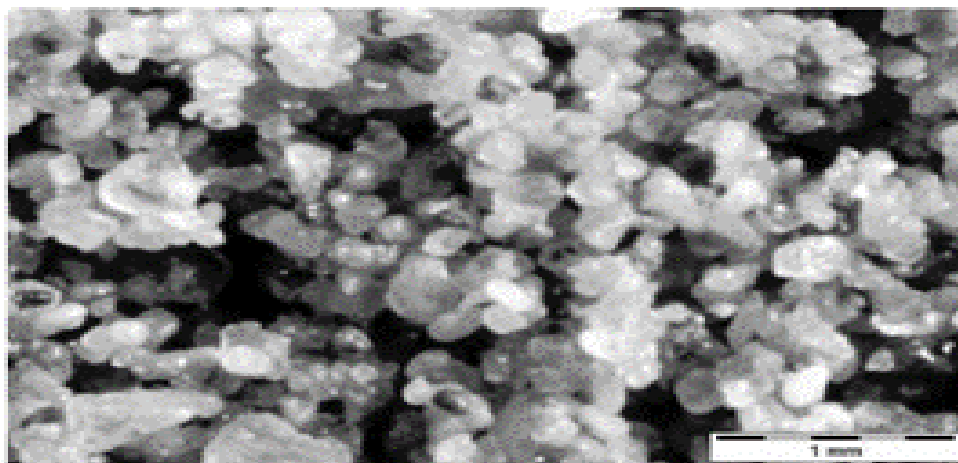


شکل ۷. نمودار تغییرات نفوذپذیری در نمونه‌های ماسه و خاکستر بادی (بیات و بحرینیان، ۱۳۹۹)

جهت بررسی دقیق‌تر اتفاق رخ داده در نمونه‌ها، عکس میکروسکوپی برای نمونه‌های دارای درصد‌های مختلف از خاکستر بادی و همچنین خاکستر بادی به همراه آهک تهیه شده است. عکس‌ها از نمونه‌های عمل آوری شده در ۲۸ روز با استفاده از یک دستگاه استریو میکروسکوپ تهیه شده است. که در شکل (۹) مشاهده می‌کنید. با بررسی عکس‌ها می‌توان نتیجه گرفت که خاکستر بادی ابتدا فضاهای خالی ماسه را پر نموده و پس از آن مانع تماس مناسبانه‌های ماسه بر روی یکدیگر می‌گردد و بعبارت دیگر دانه‌های ریز تر جای دانه‌های درشت‌تر ماسه را خواهند گرفت و باعث جدایش ذرات درشت ماسه از یکدیگر خواهد شد که این امر باعث کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر در این نمونه‌ها می‌گردد.

نتایج هر دو گروه آزمایش‌ها با آهک و بدون آهک در شکل ۶ بصورت سه بعدی نشان داده شده است. با توجه به شیب پوش رسم شده می‌توان اهمیت زمان عمل آوری در نمونه‌های حاوی آهک را نسبت به نمونه‌های بدون آهک مشاهده نمود همچنین مقایسه دو نمودار افزایش به نسبت بیشتر مقدار CBR را در نمونه‌های حاوی آهک نسبت به نمونه‌های بدون آهک نشان می‌دهد. نقطه مشترک در هر دو پوش، مقدار ماکزیمم CBR در مقادیر خاکستر بادی حدود ۲۰ درصد است. (بیات و بحرینیان، ۱۳۹۹)

با بررسی نتایج نشان داده شده در شکل ۷ می‌توان به نقش مهم خاکستر بادی در کاهش نفوذپذیری نمونه‌ها پی برد. هرچه که به مقدار خاکستر بادی اضافه شده است، نفوذپذیری نمونه نیز کاهش یافته است. این مسئله در نمونه‌های حاوی آهک نیز صادق است. با مقایسه دو نمودار مربوط به نمونه‌های تثبیت شده با آهک و خاکستر بادی و نمونه‌های تثبیت شده با آهک می‌توان به این نتیجه رسید که اثر اضافه شدن آهک بر روی کاهش ضریب نفوذپذیری در مقابل اثر اضافه شدن خاکستر بادی ناچیز است. در شکل ۸ به بررسی بافت‌های اولیه نمونه‌ها از طریق عکس‌های میکروسکوپی پرداخته شده است (بیات و بحرینیان، ۱۳۹۹).

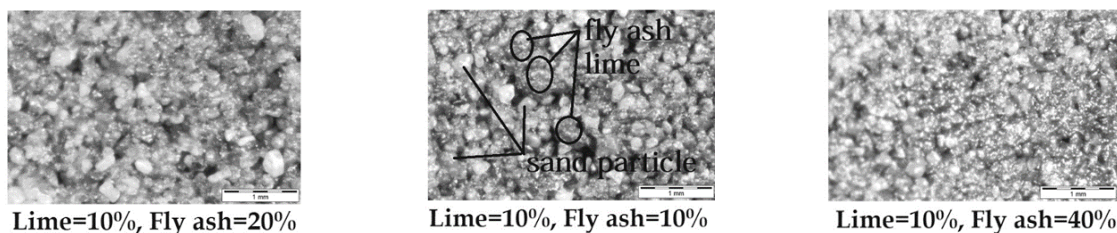


## Pure Sand

شکل ۸. بررسی بافت اولیه نمونه ها از طریق عکس های میکروسکوپی (بیات و بحرینیان، ۱۳۹۹)



شکل ۹. عکس میکروسکوپی از ماسه خالص مخلوط با خاکستر بادی بدون آهک (بیات و بحرینیان، ۱۳۹۹)



شکل ۱۰. عکس میکروسکوپی از ماسه خالص مخلوط با خاکستر بادی همراه با ۱۰ درصد آهک (بیات و بحرینیان، ۱۳۹۹)

ذرات خاکستر بادی و آهک می‌تواند ذرات ریز ماسه را به یکدیگر پیوند داده و موجب ایجاد پک ذرات بزرگتر شده که کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، بطوری که ذرات ریز ماسه بدلیل پیوند ایجاد شده بین شان رفتاری شبیه یک خاک درشت دانه را از خود نشان دهند. (بیات و بحرینیان، ۱۳۹۹)

از طرف دیگر ترکیب آهک و خاکستر بادی واکنش مناسب‌تری را ایجاد کرده است. با مقایسه عکس‌های نمونه‌های حاوی آهک که در شکل ۱۰ مشاهده می‌کنید و نمونه بدون آهک برای یک درصد مشخص خاکستر بادی می‌توان پیوند قویتر ایجاد شده بین دانه‌های خاک را در نمونه‌های تثبیت شده با خاکستر بادی همراه با آهک مشاهده نمود. در کل حضور

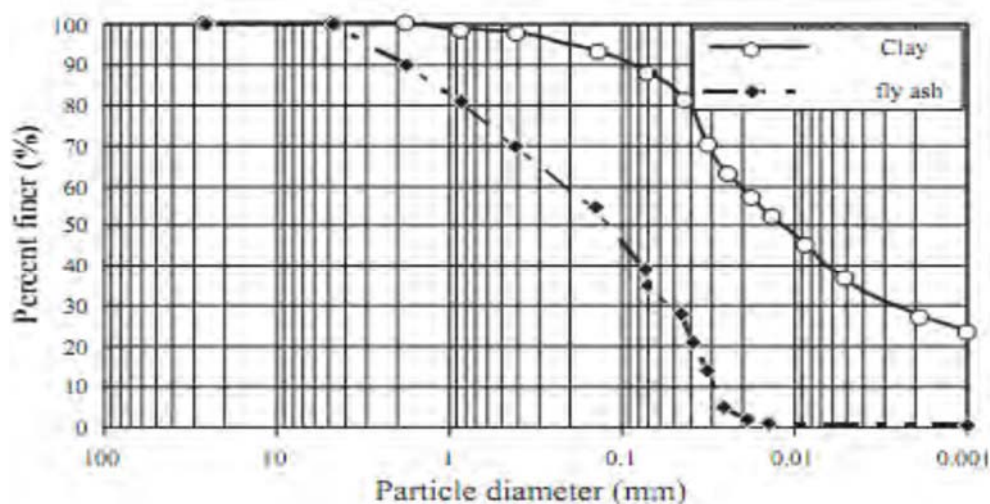
#### ۴- استفاده از خاکستربادی با آهک فراوان برای اصلاح خاک رس

عنوان یک ماده مهندسی برای استفاده از خواص پوزولانی آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نوع خاکستربادی فرصتی را برای استفاده کردن آن در جایی که هیچ فعالیت دیگری مورد نیاز نیست فراهم می‌کند و بنابراین جایگزینی مقرون به صرفه برای طیف گسترده‌ای از برنامه‌های کاربردی می‌باشد. خاکستربادی با آهک فراوان در برنامه‌های کاربردی برای اصلاح خواص مکانیکی خاک بیش از ۲۰ سال است که استفاده می‌شود. (فرخی و همکاران، ۱۳۹۳)

##### ۴-۱- آزمایش

خاک مورد آزمایش از نوع رس است و خاکستربادی با آهک زیاد نیز از نیروگاه‌هایی که با زغال سنگ کار می‌کنند بدست آمده است. دانه‌بندی خاک و خاکستر بادی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. خاک دارای رس با پلاستیسیته زیاد می‌باشد. بدلیل ظرفیت باربری ضعیف این خاک، سازه‌ها در این منطقه با مشکل نشست قابل توجهی روبرو هستند. خواص رس با CS و خاکستربادی با FA در جدول ۴ و ۵ نشان داده شده است. طبق خواص خاک، طبق طبقه بندی خاک یونیفاید خاک با پلاستیسیته بالا (CH) است و بسیار فعال بوده است.  $Ac = (1.53 > 1.25)$  و دارای پتانسیل تورم بالا ( $dh/h = 8.5\%$ ) می‌باشد. (فرخی و همکاران، ۱۳۹۳)

ساخت تولیدات فراوان از خاکستر بادی مزایای زیست محیطی قابل توجهی دارد از جمله کاهش آلودگی آب و هوا. افزایش استفاده از خاکستربادی به عنوان جایگزین سیمان پرتلند یا آهک باعث صرفه جویی در انرژی می‌شود چراکه خاکستربادی به عنوان مصالحی با انرژی بالا نام گذاری شده است. (فرخی و همکاران، ۱۳۹۳). استاندارد ASTM D618 تفاوت‌هایی را میان خاکستر بادی کلاس C و کلاس F قائل شده است. خاکستربادی کلاس F که به طور معمول از سوزاندن زغال سنگ آنتراسیت و یا بتمنس تولید شده و حاوی مقدار کمی آهک است. این خاکستربادی دارای خواص پوزولانی است که به خودی خود یا ارزش سیمانی ندارد و یا دارای ارزش سیمانی خیلی کمی می‌باشد، اما در حضور رطوبت و در دماهای معمولی با آهک واکنش می‌دهد و ترکیبات سیمانی تشکیل می‌دهد. (فرخی و همکاران، ۱۳۹۳) خاکستر بادی کلاس C به طور معمول از سوزاندن Sabbituminous و یا زغال سنگ چوب نما تولید می‌شود، معمولاً حاوی مقدار قابل توجهی آهک به همراه مواد پوزولانی است. این نوع خاکستربادی ممکن است هر دو خاصیت پوزولانی و سیمانی را از خود نشان دهد. اخیراً ترجیح داده شده است که در طبقه بندی خاکستر بادی، خاکستربادی کلاس F به عنوان خاکستر بادی با آهک کم و خاکستر بادی کلاس C به عنوان خاکستر بادی با آهک فراوان نامیده شود. خاکستربادی با آهک فراوان معمولاً به



شکل ۱۱. دانه‌بندی خاک رس (فرخی و همکاران، ۱۳۹۳)

جدول ۴. برخی خواص خاک CS (فرخی و همکاران، ۱۳۹۳)

| Chemical composition (%)                             | CS    |
|------------------------------------------------------|-------|
| SiO <sub>2</sub>                                     | 63/25 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                       | 8/18  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                       | 3/56  |
| cao                                                  | 9/03  |
| mgo                                                  | 1/04  |
| Na <sub>2</sub> O                                    | 1/27  |
| K <sub>2</sub> O                                     | 1/37  |
| So <sub>3</sub>                                      | 0/00  |
| L.O.I                                                | 9/25  |
| <b>INDEX PROPERTIES</b>                              |       |
| Natural water content, w <sub>n</sub> (%)            | 25/1  |
| Liquid limit, w <sub>l</sub> , (%)                   | 71/01 |
| Plustic limit, w <sub>p</sub> , (%)                  | 29/7  |
| Plasticity index, pi, (%)                            | 41/3  |
| Sherikage limit, w <sub>s</sub> , (%)                | 17/6  |
| Wet unit weight, y <sub>n</sub> (kn/m <sup>3</sup> ) | 18/54 |
| Speeific weight, g <sub>s</sub>                      | 2/76  |
| Ifiner than no.200%                                  | 55/2  |

جدول ۵. برخی خواص FA طبق استاندارد ASTM D 618 (فرخی و همکاران، ۱۳۹۳)

| Chemical composition (%)                                                          | Fa    | ASTM D 618 limits (class c) |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------------|
| SiO <sub>2</sub>                                                                  | 24/23 |                             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                    | 15/27 |                             |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                    | 3/89  |                             |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +SiO <sub>2</sub> | 43/39 | >50                         |
| cao                                                                               | 42/25 |                             |
| mgo                                                                               | 0/74  |                             |
| Na <sub>2</sub> O                                                                 | 0/36  |                             |
| K <sub>2</sub> O                                                                  | 0/51  |                             |
| So <sub>3</sub>                                                                   | 6/77  | <5/0                        |
| L.O.I                                                                             | 1/20  | <6/0                        |
| Free cao                                                                          | 9/32  |                             |
| Insoluble residue                                                                 | 16/92 |                             |
| Physical propertice                                                               |       |                             |
| Specifie gravity                                                                  | 2/46  |                             |
| B line fineness (cm <sup>2</sup> /g)                                              | 34/60 |                             |
| Retained on 0.045 mm(%)                                                           | 28    | <34                         |
| 28-day strength activity index with pc (%)                                        | 84    | >75                         |

نمونه‌ها اندازه گیری شد که به ترتیب ۶/۵ درصد، ۵/۵ درصد، ۴/۵ درصد، ۲/۵ درصد، ۲/۳ درصد بدست آمد.

این نمونه‌های بدست آمده در رطوبت بهینه طبق استاندارد ASTM D4546-96 متراکم شدند. مشخصات تراکم و توضیحات مربوط به تراکم در جدول ۶ آمده است. از این نتایج دیده می‌شود که اضافه کردن خاکستربادی، وزن واحد خشک خاک را کاهش می‌دهد. این کاهش در درصد خاکستربادی بیشتر، واضح تر است و احتمالاً ناشی از کمتر بودن وزن مخصوص خاکستربادی در مقایسه با خاک باشد. (فرخی و همکاران، ۱۳۹۳)

مقدار  $Al_2O_3$  و  $SiO_2$  و  $Fe_2O_3$  خاکستربادی طبق استاندارد نیست، بنابراین این خاکستر بادی نه در کلاس C و نه در کلاس F قرار نمی‌گیرد. مقادیر صفر درصد، ۵ درصد ۱۰ درصد، ۱۵ درصد و ۲۰ درصد از خاک با خاکستر بادی جایگزین شده است. ۴ نمونه مختلف خاک و خاکستربادی در رطوبت بهینه طبق ASTM D1140 برای آزمایش پراکتور استاندارد آماده شده است. مخلوط خاک و خاکستر بادی با مقادیر درصدهای مختلف خاکستربادی و خاک مورد آزمایش قرار گرفت. مقدار تورم آزاد نمونه‌ها، فوراً بعد از آماده شدن

جدول ۶. مشخصات تراکم و توضیحات مربوط به مخلوط خاک و خاکستربادی (فرخی و همکاران، ۱۳۹۳)

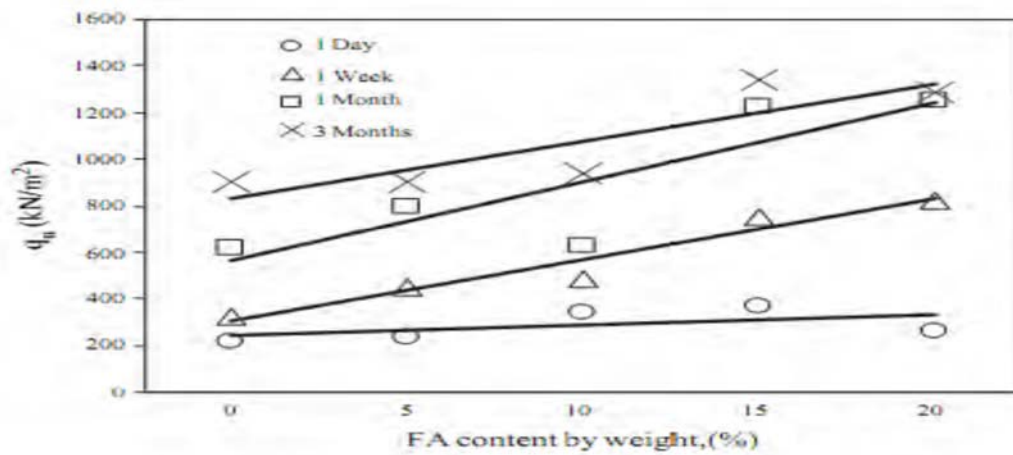
| Mixture | Fa(%) | Soil(%) | Dry unit weight, $\gamma_k (\frac{kn}{m})$ | Optimum water content (%) |
|---------|-------|---------|--------------------------------------------|---------------------------|
| Sfa0    | 0     | 100     | 14/52                                      | 22                        |
| Sfa5    | 5     | 95      | 14/23                                      | 22/5                      |
| Sfa10   | 10    | 90      | 14/13                                      | 22/9                      |
| Sfa15   | 15    | 85      | 13/83                                      | 23                        |
| Sfa20   | 20    | 80      | 13/64                                      | 24                        |

تجربی شامل بررسی تأثیر خاکستربادی با آهک فراوان بر روی برخی خواص مکانیکی خاک رس با پلاستیسیته بالا می‌باشد. (فرخی و همکاران، ۱۳۹۳)

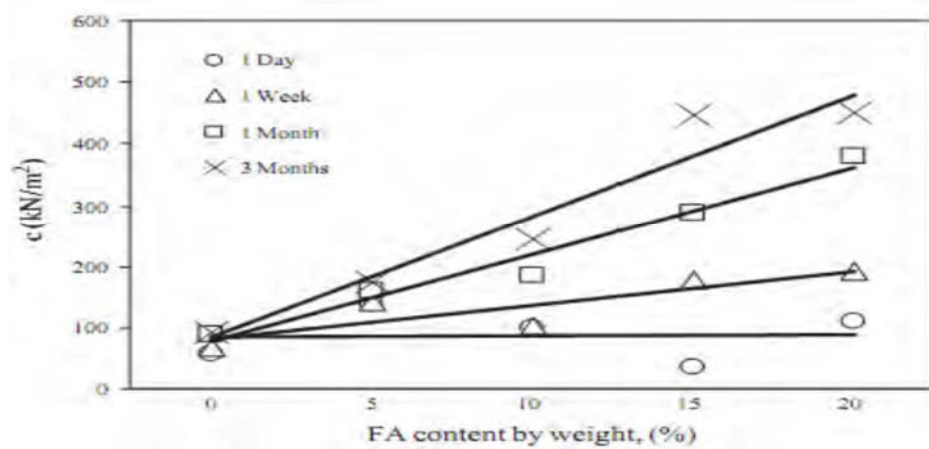
#### ۴-۲- بحث

با مشاهده شکل‌ها به وضوح ملاحظه می‌شود که مقدار qu-fa شکل (۱۲) و مقدار C-FA در شکل (۱۳) با افزودن خاکستربادی تا ۱۵ درصد هم مقادیر qu و هم مقادیر C را افزایش می‌دهد. افزایش خاکستر بادی به مقدار ۲۰ درصد تأثیر جزئی برای خواص فوق‌الذکر در مقایسه با مخلوط ۱۵ درصد خاکستربادی دارد.

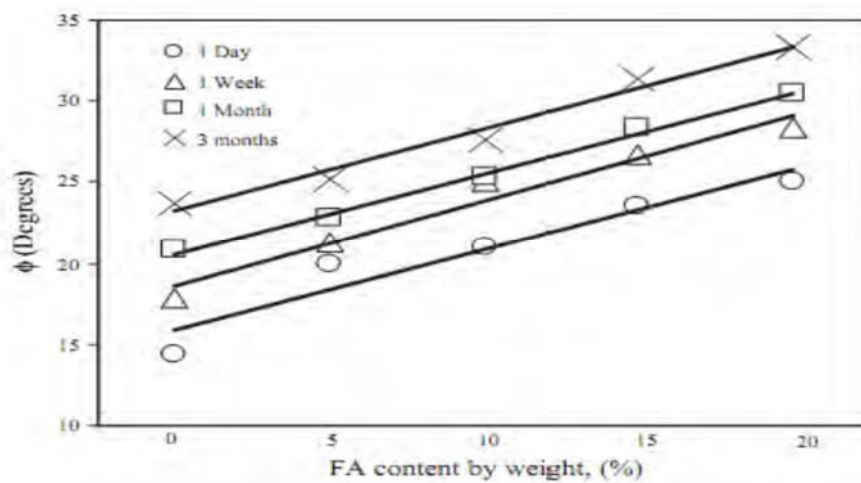
برای هر مخلوط، نمونه‌ای استوانه‌ای ۱۰۰×۵۰ میلی‌متر برای آزمایش فشاری محدود نشده و نمونه ۲۰×۶۰×۶۰ میلی‌متر برای آزمایش برش مستقیم آماده شده‌اند و به ترتیب طبق استانداردهای ASTM D3080 , ASTM D2166 انجام شده‌اند. آزمایش برش مستقیم زهکشی نشده است و بارگذاری با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه است. نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM D3080-98 آماده شده و چون نمونه‌ها اشباع نشده بودند، هیچ فشار آب حفره‌ای اضافی را نباید در آن انتظار داشت. ۶ نمونه برای هر مخلوط آماده شده بود، برای اصلاح و به منظور جلوگیری از دست دادن بیش از حد رطوبت، نمونه‌ها بعد از جدا شدن از قالب توسط یک غشاء پوشانده می‌شوند. نمونه‌ها در آزمایشگاه به مدت‌های ۱، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نگه داری شدند. دما و رطوبت نسبی آزمایشگاه به ترتیب ۱۷ سانتی‌گراد  $\pm 23$  و  $\pm 17$  60 درصد می‌باشد. نمونه‌ها برای محاسبه‌ی مقدار ظرفیت باربری qu و همچنین پارامترهای مقاومت برشی، چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی  $\phi$  مورد آزمایش قرار گرفتند. مطالعه‌ی



شکل ۱۲. تغییرات با مقدار  $fa$  (فرخی و همکاران، ۱۳۹۳)

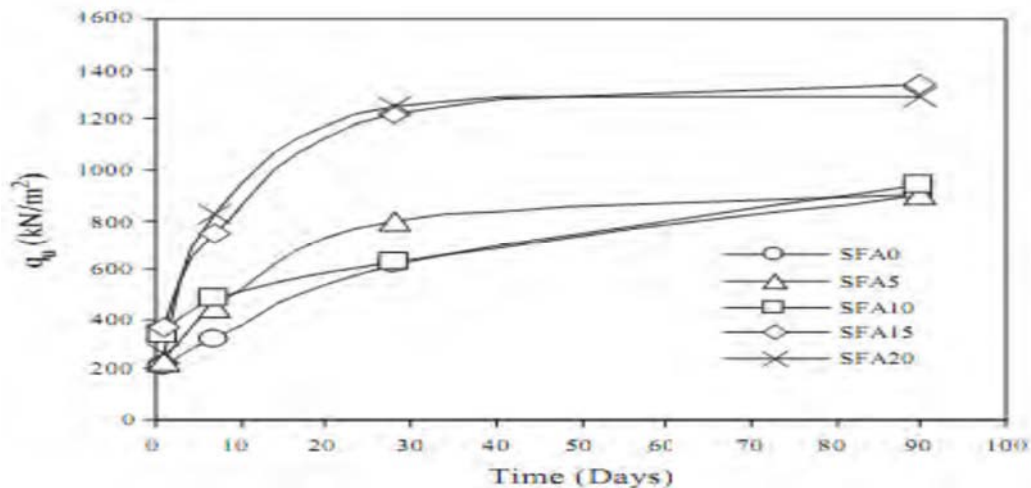


شکل ۱۳. تغییرات  $C$  با مقدار  $fa$  (فرخی و همکاران، ۱۳۹۳)



شکل ۱۴. تغییرات  $\phi$  با مقدار  $fa$  (فرخی و همکاران، ۱۳۹۳)

داده است. این افزایش با افزایش مقدار خاکستربادی، زیاد می‌شود، صرف نظر از مقدار خاکستربادی افزوده سرعت افزایش در مقاومت بالاتر از ۲۲ روز است. بالاتر از ۲۲ روز هیچ افزایش قابل توجهی وجود ندارد. به نظر می‌رسد که تأثیر افزودن خاکستر بادی بر زیر ۱۰ درصد نسبتاً کم است. در همین حال، تفاوت بین مقادیر  $q_u$  بین ۱۵ تا ۲۰ درصد ناچیز است (فرخی و همکاران، ۱۳۹۳)

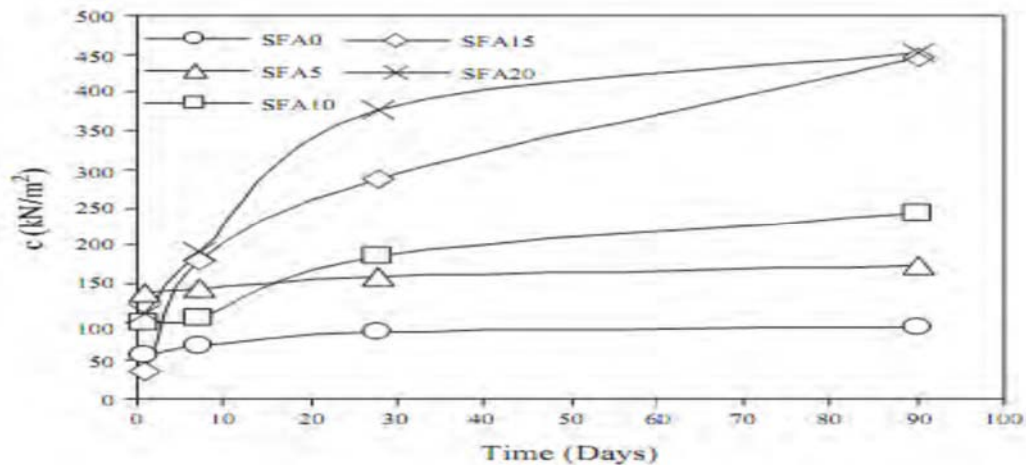


شکل ۱۵. تغییرات در طول دوره درمان (فرخی و همکاران، ۱۳۹۳)

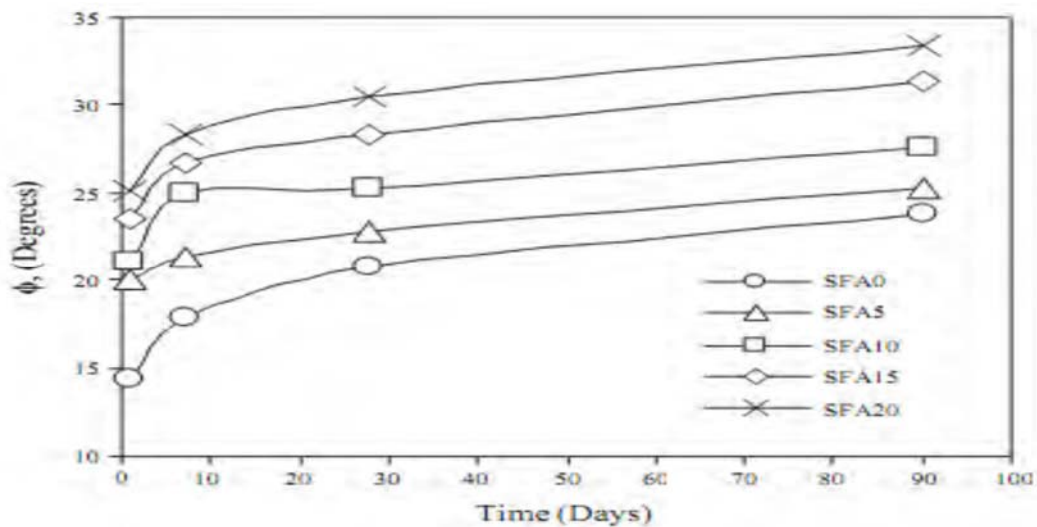
نظر از مقدار خاکستر بادی، افزایش می‌یابد. این ممکن است باعث از دست دادن رطوبت نمونه‌ها در طول مدت درمان شود. با وجود کاغذ غشای ارتجاعی تقریباً ۵۰ درصد کاهش در مقدار رطوبت برخی از نمونه‌ها در طول ۹۰ روز دوره درمان ثبت شده است. علاوه بر این، زاویه اصطکاک داخلی به طور قابل توجهی همراه با افزایش خاکستربادی، افزایش می‌یابد. این احتمالاً ناشی از این حقیقت است که زاویه اصطکاک داخلی خاکستربادی بیشتر از خاک است.

تأثیر افزودن خاکستربادی بر زاویه اصطکاک داخلی مخلوط‌ها در شکل ۱۴ نشان داده شده است. زاویه اصطکاک داخلی با افزایش زمان، با صرف نظر کردن از مقدار خاکستر بادی در مخلوط، افزایش می‌یابد. علاوه بر این، افزایش زاویه اصطکاک داخلی با افزایش خاکستربادی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. تأثیر افزودن خاکستر بادی بر مقاومت محدود نشده برای ۹۰ روز در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همان طور که انتظار می‌رفت، افزودن خاکستربادی، ظرفیت باربری را افزایش

تغییرات چسبندگی  $C$  زمان در شکل ۱۵ نشان داده شده است. اضافه کردن ۵ درصد خاکستربادی تأثیر ناچیزی بر  $C$  در طول زمان بهبودی دارد. اما، افزایش قابل توجهی در  $C$  در زمان طولانی‌تر در نمونه‌های شامل ۱۵ یا ۲۰ درصد خاکستر بادی وجود دارد. این تأثیر ممکن است به افزایش چسبندگی خاک بر اثر واکنش ذرات ریز خاکستربادی و تأثیر خود سخت شدن مربوط به حضور آهک آزاد و بخش محلول در آب خاکستربادی، نسبت داده شود. در شکل ۱۶ تغییرات  $C$  در طول درمان نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۱۷ می‌توان دید افزایش زاویه اصطکاک داخلی با گذشت زمان با صرف



شکل ۱۶. تغییرات  $C$  در طول دوره درمان (فرخی و همکاران، ۱۳۹۳)



شکل ۱۷. تغییرات  $\phi$  در طول دوره درمان (فرخی و همکاران، ۱۳۹۳)

#### ۳-۴- ارزیابی آماری نتایج آزمایش

با تجزیه و تحلیل رگرسیون چندگانه روابط زیر بین  $Fa$  خاک، زمان و  $\phi$  بدست آمده است.

$$Q_u(kn/m^2) = fa(\%) + t(days) \quad (۱)$$

$$c(kn/m^2) = fa(\%) + t(days) \quad (۲)$$

$$\phi(0) = fa(\%) + t(days) \quad (۳)$$

بهبود مقادیر  $C$  و  $\phi$  با افزودن خاکستر بادی به خاک ممکن است ناشی از واکنش پوزولانیک و مشخصات خود سیمانیته خاکستر بادی است. این حقیقت در زمان‌های طولانی‌تر بیشتر معلوم است. علاوه بر این، اصلاح در مشخصات مقاومتی خاک مخلوط شده با خاکستر بادی یا خاک به تنهایی در بخشی به از دست دادن بخشی از رطوبت نمونه در طول مدت بهبود مربوط می‌شود. (فرخی و همکاران، ۱۳۹۳)

## ۵- بررسی عامل زمان و درصد مخلوط آهک و

### خاکستر بادی بر خواص فیزیکی و مکانیکی خاک

#### ریزدانه

بعضی پروژه‌ها با خاک‌های ریزدانه نامناسب مواجه می‌شود که بهسازی خواص مهندسی آن‌ها الزامی است. یکی از روش‌های اصلاح خاک، استفاده از مواد افزودنی است که علاوه بر توجیه اقتصادی باید قابلیت تولید و دسترسی انبوه مناسب نیز داشته باشد. آهک یکی از افزودنی‌ها است که در اثر ایجاد واکنش پوزولانی سبب تقویت خاک می‌شود؛ ولی اگر خاک حاوی یون سولفات باشد یا این که خاک تثبیت شده در معرض آب سولفاته قرار گیرد، حضور آهک نه تنها باعث کاهش تورم لایه تثبیت شده نمی‌شود. بلکه نتیجه عکس داده و سبب افزایش تورم و کاهش مقاومت می‌شود. افزودن خاکستر بادی موجب کم شدن تأثیرات مخرب سولفات‌ها همچون افزایش حجم و ترک خوردگی و نیز کاهش کرناسیون در خاک تثبیت شده با آهک یا سیمان شده و مخلوط و یون کلسیم را افزایش می‌دهد و باعث افزایش و تسریع واکنش پوزولانی می‌شود. در این جا تأثیر بر خواص ژئوتکنیکی مخلوط خاک و آهک بررسی می‌شود. خاک استفاده شده بادی و درصد معینی از آهک مخلوط شده و با آزمایش‌های مقاومت برشی و حدود اتربرگ اثر خاکستر بادی بر مخلوط آهک و خاک بررسی شد. این آزمایش‌ها برای نمونه‌های اشباع ۷ و ۲۸ روزه انجام شد تا تأثیر زمان نیز بر این پدیده آزمایش شود. نتایج حاصل شده بیانگر تأثیر بسیار زیاد خاکستر بادی در مقاومت برشی است به گونه‌ای که نسبت به نمونه شاهد، پارامتر چسبندگی تا ۷۰۰ درصد افزایش در نمونه‌های ۲۸ روزه و تا ۶۰۰ درصد افزایش در نمونه‌های ۷ روزه نشان داده است. در زاویه اصطکاک داخلی نیز ۶۹ درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد مشاهده شده است. بسیاری از طرح‌های اجرایی مانند احداث شبکه‌های آبیاری و زهکشی، جاده سازی، احداث دایک و سدهای خاکی ممکن است با کمبود مصالح خاکی مناسب مواجه شود. بنابراین باید مصالح موجود، اصلاح شده و مقاومت آن‌ها افزایش یابد. یکی از راه‌های اصلاح خاک، افزودن مواد تقویتی است و از این طریق استفاده از مواد ضعیف و در دسترس میسر شده و از حمل مصالح از دور دست و تحمل هزینه‌های گزاف پرهیز می‌شود. این موضوع در مناطقی که مصالح موجود محدود به خاک‌هایی مثل لس، ماسه،

رس چاق و یا رس و اگر باشد اهمیت زیاد و تأثیر اقتصادی فراوانی دارد. از افزودنی‌ها می‌توان به آهک، سیمان، خاکستر پوسته برنج، پوزولان‌ها، میکروسلیس، سولفات آلومینیم و خاکستر بادی اشاره کرد. روش تقویت خاک با آهک از دوران باستان متداول بوده است و از سال ۱۹۴۵ اصلاح خاک با آهک شکفته در آمریکا رایج شد (طاحونی، ۱۳۷۳). مهمترین واکنش‌هایی که افزودنی‌ها در خاک سبب می‌شوند، واکنش تبادل یونی، واکنش پوزولانی و واکنش هیدراسیون است که مهمترین آنها واکنش پوزولانی است. این واکنش بین آهک، آب و مواد سیلیس دارو آلومینیم دار خاک انجام می‌شود. ایجاد مواد سیمانی اعث افزایش مقاومت برشی خاک می‌شود، تابع زمان است و در نبود رطوبت متوقف می‌شود. (Agannath, et al., 2004)

استفاده از مواد پوزولانی مانند خاکستر بادی، تأثیر موادافزوده شده آهک را بیشتر و تسریع می‌کند. آهک سبب بهبود خصوصیات رفتاری خاک‌های ریزدانه رسدار همچون تورم، مقاومت برشی، قابلیت جذب آب و مشخصه‌های خمیری اما با توجه به حدود اتربرگ می‌شود (Bell, 1998) محدودیت‌هایی که برای استفاده از آهک وجود دارد، افزودن آهک به خاک ممکن است منجر به تأثیرات نامطلوبی بر خواص خاک تثبیت شده شود. این واکنش‌های مخرب عبارتند از: کرناسیون، تأثیر سولفات‌ها، تأثیر مواد آلی، تأثیر سولفیدها و نمک طعام. در صورتیکه خاک حاوی یون سولفات باشد یا این که خاک تثبیت شده در معرض آب سولفاته قرار گیرد، حضور آهک نه تنها باعث کاهش تورم لایه تثبیت شده نمی‌شود، بلکه نتیجه عکس داده و سبب افزایش تورم و این پدیده به علت کاهش مقاومت می‌شود. (Sherwood, 1993). انجام واکنش‌های شیمیایی بین کانی‌های رس، آهک و سولفات اتفاق می‌افتد که منجر به تشکیل کانی‌های اترینگات و تاماسایت شده و این کانی‌ها با جذب آب به شدت متورم خاکستر بادی می‌شوند. (Bell, 1988), (Nicholson, et al., 1994)

از اکسیدهای سیلیسیم، آلومینوم، آهن و کلسیم تشکیل شده است و امروزه از نیروگاه‌هایی که برای تولید برق از ذغال سنگ استفاده می‌کنند به دست می‌آید. (Acosta et al., 2003)

این محصول در ایران تولید نمی‌شود و با احتساب هزینه تولید و حمل از هندوستان به ایران، قیمت آن حدود هر کیلوگرم ۳۰۰۰ ریال است خاکستر بادی باعث کاهش آثار بالا و گسترده‌گی کاربرد آهک می‌شود و با توجه به قیمت پایین آن مقرون به

صرفه است. میزان کلسیم محلول با اضافه کردن خاکستر بادی زیاد می شود و فعالیت پوزولانی افزایش می یابد. PH. اضافه کردن خاکستر بادی به صورت قابل توجهی مقدار سیلیکای خاک از ساختمان، pH را افزایش می دهد. با بالا رفتن ورقه ای چهاروجهی اش و آلودگی های خاک از ساختمان ورقه ای می گیرد (Mckennon, 1994), (Sezer et al., 2006). مهمترین اهداف تثبیت خاک، افزایش مقاومت برشی است و به دلیل این که تحقیقاتی که تاکنون انجام شده شیمیایی بوده باید در زمینه تأثیر خاکستر بادی بر مشخصات ژئوتکنیکی مخلوط، تحقیقات مفصلی بر خاک های ایران که بیشتر منشأ آهکی دارند انجام شود و با نتایج پژوهشگران خارج از کشور مقایسه شود. (بنده زاده وهکاران، ۱۳۹۰)

## ۶- تأثیر افزودن آهک و خاکستر بادی

### بر مقاومت تکمحوری خاک های سیلتی

بحث بهسازی خاک هم در شالوده سازه ها و هم در بستر راهها با توجه به پیشرفت علمی مهندسی عمران بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بعضاً خاک های طبیعی موجود در محل پروژه های عمرانی به لحاظ خصوصیات مهندسی، برای تحمل نیروی وارده مناسب نیستند؛ به عنوان مثال در بسیاری از مواقع لایه های فوقانی و یا حتی تحتانی خاک مطلوب نبوده و باید برداشته شده و با خاکی مناسب جایگزین شوند. اما این امر در پروژه هایی مانند راهسازی و علی الخصوص ساختمانی صرفه اقتصادی نداشته و به سبب مشکل دسترسی به منابع قرضه مناسب، منطقی نمی باشد. در چنین شرایطی اصلاح خاک به شیوه های مختلف به عنوان راهکاری موثر مطرح می شود. یکی از راه های مقابله با مشکلات این نوع خاکها، تثبیت خاک است. تثبیت خاک شامل فعالیت هایی است که در نتیجه آنها مشخصات مهندسی خاک بهبود یافته و به ویژگی های مورد نظر نزدیک می شود. این اقدامات باعث افزایش مقاومت، کاهش تورم، کاهش نفوذپذیری، افزایش کارایی و اثرات سودمند دیگر می شود. (داس، ۱۳۸۳)

در تثبیت با مصالح، استفاده از آهک بسیار متداول است. آهک به دلیل دامنه وسیع، قیمت مناسب، در دسترس بودن و اثرات دائمی در طیف گسترده ای از خاک ها کاربرد زیادی دارد. همچنین خاکستر بادی به عنوان ماده زائد حاصل از نیروگاه های حرارتی، خاصیتی برای استفاده در صنعت ندارد پس اگر بتوان

شرایطی را فراهم کرد که از این مواد، به دلیل وجود خاصیت پوزولانی، در بحث تثبیت خاک استفاده شود، می تواند از نظر زیست محیطی و اقتصادی مفید واقع شود (داس، ۱۳۸۳). وجود رس ها در واکنش با آهک بر امر تثبیت تأثیر بسزایی دارد ولی در زمینه خاک های فاقد چسبندگی یا با چسبندگی کم مانند خاک های سیلتی تثبیت خاک با آهک کیفیت واقعی خود را بروز نمی دهد. از سوی دیگر کاهش زمان تثبیت خاک می تواند باعث کاهش هزینه ها در انجام پروژه ها شود. از فاکتورهایی که در این پژوهش مد نظر قرار گرفته است استفاده از ماده ای می باشد که به کمک آن بتوان علاوه بر کاهش زمان تثبیت، مقاومت طرح را نیز بالاتر برد و عملکرد کاملی از طرح تثبیت خاک سیلتی بدست آورد. پژوهش هایی که پیش از این بر روی خاک های رسی و خاک های سیلیسی در ترکیب با آهک انجام شده است، حاکی از تسریع و مقاومت بهتر این طرحها در زمان اضافه شدن خاکستر بادی می باشد و این تأثیر مثبت سبب شد تا برای بهسازی خاک مورد نظر از آهک و خاکستر بادی استفاده شود. علاوه بر اینها توجه به قیمت کم و صرفه اقتصادی خاکستر بادی در قیاس با دیگر مکمل های آهک و سیمان برای تثبیت خاک همگی از عوامل موثر بر انتخاب این مصالح برای بهسازی خاک می باشد. (داس، ۱۳۸۳)

نظر به گسترش ساخت و ساز در سال های اخیر در منطقه شهریار واقع در غرب استان تهران و وسعت قابل توجه زمین های دارای خاک با طبقه بندی (ML سیلت با حد روانی کم) در این نواحی، از خاک این منطقه به عنوان منابع قرضه برای انجام آزمایش ها استفاده شد. (فرح بخش وهکاران، ۱۳۹۸)

## ۶-۱- مصالح مورد استفاده

### ۶-۱-۱- آهک

استفاده از آهک در تثبیت خاک ها به عنوان یک روش بهسازی اقتصادی به طور گسترده انجام می پذیرد. اضافه کردن آهک به خاک باعث به وجود آمدن واکنش هایی می شود که این واکنش ها باعث ایجاد بهبود در خواص اولیه خاک می شوند و از جمله می توان به موارد زیر اشاره نمود. (داس، ۱۳۸۳)

- الف- کاهش حد روانی،
- ب- افزایش حد خمیری،
- ج- کاهش نشانه خمیری

د-افزایش حد انقباض

ه-افزایش کارایی

و- بهبود خواص مقاومتی خاک

ز- کاهش تورم

آهک با بروز فعل و انفعالات شیمیایی اثرات مهمی بر روی مشخصات فنی خاک‌ها می‌گذارد. اضافه کردن آهک به خاکهای ریزدانه باعث بروز چندین واکنش نظیر واکنش تبادل یونهای مثبت، واکنش تجمع و واکنش شیمیایی می‌شود. شدت نسبی این واکنشها بستگی به خصوصیات فیزیکی- شیمیایی خاک به ویژه نوع کانیهای رسی، یونهای سدیم قابل جایگزین شدن، آهن قابل ترکیب، نسبت سیلیس به آلومین و درجه هوازدهی خاک دارد. (فرح بخش وهمکاران، ۱۳۹۸)

عوامل مختلفی بر انجام واکنش خاک و آهک مؤثر هستند، از جمله این موارد می‌توان به میزان رس اشاره کرد. اگر میزان رس از حد مشخصی کمتر باشد، واکنشها انجام نمی‌شود؛ به همین علت وجود رس کافی برای انجام واکنش لازم است. می‌توان گفت باید حداقل ۲۵ درصد خاک از الک شماره ۲۰۰ عبور کند تا تثبیت با آهک ثمربخش باشد. (داس، ۱۳۸۳)

همچنین میزان pH محیط مهم است، به طوریکه باید حداقل مقدار PH از ۱۰ بیشتر باشد تا باعث انجام واکنش بین آهک و

رس شود. در برخی از مراجع حداقل مقدار PH برای انجام واکنش بین آهک و رس ۱۲/۴ بیان شده است. در ضمن نوع و غلظت کاتیونهای موجود در محیط و نوع کانی رسی نیز اهمیت دارد. (بهنیا و همکاران، ۱۳۷۸)

واکنشهای آهک و خاک در جریان تثبیت خاک با آهک سه نوع فعل و انفعال شیمیایی بین خاک و آهک در مجاورت آب به وقوع می‌پیوندد که عبارتند (هاشمی طبابایی و اقایی ارایسی، ۱۳۷۸)

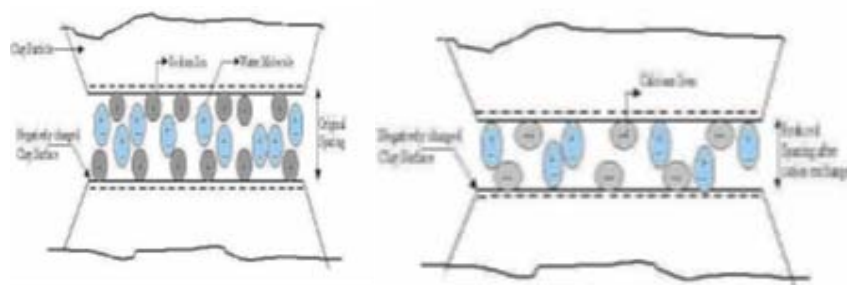
الف (واکنش تبادل یونی، مجتمع شدن و لخته شدن)

ب (کربناته شدن)

ج (واکنش پوزولانی)

الف- واکنش تبادل یونی، مجتمع شدن و لخته شدن

اصولاً واکنش تبادل یونهای مثبت بین آهک و خاک آنی بوده و به مجرد تماس آهک با اکثر خاکهای ریزدانه حاصل می‌شود. واکنش تبدالی معمولاً باعث بروز تغییرات مهمی در مشخصات فیزیکی و شیمیایی رس می‌شود. این واکنش باعث تغییر ساختار خاک از مجتمع به موازی می‌شود. مکانیزم این واکنش در شکل ۱۸ نشان داده شده است. (داس، ۱۳۸۳)



شکل ۱۸. مکانیزم تبادل کاتیونی (Yazici, 2004)

ب \_ کربناته شدن

کربناته شدن واکنش کوتاه مدت و مضر است که باعث جلوگیری از انجام واکنشهای دیگر شده و خاصیت خمیری خاک را افزایش می‌دهد. اگر رس خاصیت پوزولانی نداشته باشد یا میزان آهک زیاد باشد، کربناته شدن اتفاق می‌افتد.

کربناته شدن باعث کاهش آهک محیط، در نتیجه کاهش مقاومت و سایر فواید آهک می‌شود.

ج \_ واکنش پوزولانی

بطور خلاصه می‌توان گفت تبادل کاتیونی و مجتمع شدن باعث افزایش حد انقباض و حد خمیری و کاهش حد روانی و بهبود کارایی خاک می‌شوند و واکنش پوزولانی باعث تشکیل

ژل‌های هیدراته و افزایش قابل ملاحظه مقاومت در درازمدت می‌شود. تبادل کاتیونی و واکنش پوزولانی باعث کاهش تورم خاک می‌شوند (Rajasekaran, 1990).

خاک‌ها را می‌توان از نظر واکنش با آهک به دو گروه تقسیم‌بندی کرد:

الف- (خاک‌های واکنش‌زا)

ب- (خاک‌های بدون واکنش)

خاک‌های واکنش‌زا خاک‌هایی هستند که پس از تثبیت با آهک و عمل آمدن به مدت ۲۸ روز در گرمای ۲۰ درجه سانتیگراد بیش از ۳/۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع افزایش مقاومت فشاری محدود نشده از خود نشان دهند و خاک‌های بدون واکنش خاک‌هایی هستند که افزایش مقاومتشان در شرایط مشابه کمتر از ۳/۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع باشد. اگر چه افزودن آهک به خاک‌های بدون واکنش ممکن است که باعث شود تغییرات محسوسی در خواص خمیری خاک‌ها ایجاد شود، اما صرف نظر از نوع و درصد آهک مصرفی همچنین شرایط عمل آوری مخلوط، این تغییرات باعث ایجاد واکنش پوزولانی در خاک‌های بدون واکنش نمی‌شود. آهک معمولاً با اغلب خاک‌هایی که دامنه خمیری آنها بین ۱۰ تا ۵۰ درصد است واکنش می‌دهد. عموماً خاک‌های با دامنه خمیری کمتر از ۱۰ نیاز به پوزولان برای ایجاد واکنش با آهک دارند. پوزولانهایی مانند خاکستر بادی، سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی و شیبست‌های رسی منبسط شده می‌توانند برای این منظور بکار روند. (Hausmann, 1990).

## ۶-۱-۲- خاکستربادی

خاکستربادی ماده‌ای زائد است که از سوختن ذغال سنگ به ویژه در نیروگاه‌ها حاصل و در فیلترها به صورت غبار تهیه می‌شوند. این ماده یک گرد بسیار ریزدانه است که ترکیبی از سیلیس، آلومینیوم، اکسیدها و قلیاهای مختلف می‌باشد. این ماده دارای طبیعت پوزولانی بوده و می‌تواند با آهک هیدراته واکنش داده و فرآیند سمانتاسیون بوجود آورد. به همین علت مخلوط آهک و خاکستربادی می‌تواند برای پایداری نمودن اساس و زیراساس جاده‌ها و همچنین بهبود خاک زیر سازه‌ها مورد

استفاده قرارگیرد. به طور معمول از خاکستربادی در بهبود مقاومت بتن بهره گرفته می‌شود. گاهی با اضافه کردن آن در کنار سیمان و گاهی به عنوان جایگزین آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. آزمایش‌های انجام شده بر روی مقاومت فشاری بتن قبل و بعد از اضافه شدن خاکستربادی مبین بالا رفتن مقاومت فشاری بتن تا مقدار ۶۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می‌باشد. البته ثبات کیفیت خاکستر بادی در بهبود خواص مقاومتی آن اهمیت فراوان دارد که در این خصوص استاندارد ASTM C618 و یا استاندارد BS 3892 ضوابط سختگیرانه‌ای برای حداقل کیفیت مورد تایید خاکسترهای بادی با مشخصات مختلف وضع کرده است. انواع خاکستربادی بر اساس استاندارد ASTM C618 بر اساس زیر می‌باشد.

گروه C: خاکستربادی با خاصیت خودگیری

گروه F: خاکستربادی با فعالیت پوزولانی

اندازه ذرات خاکستربادی در دامنه‌های حدود نیم الی سیصد میکرون قرار دارند. به عنوان مثال طبق ضوابط استانداردهای مطرح شده باید ۹۰ درصد از اندازه ذرات خاکستربادی گروه F کوچکتر از ۴۵ میکرون باشند. چگالی نسبی این ماده نیز بر اساس ماده اولیه تولید کننده آن متغیر و بین ۲/۲ تا ۲/۹۵ گزارش شده که به طورمتوسط چگالی مخصوص معادل ۲/۵ را به آن نسبت داد. مزایای استفاده از خاکستربادی را در تثبیت خاک می‌توان به شرح زیر نام برد:

الف - افزودن درصد کمی از آهک و یا سیمان تا حد زیادی مقاومت آن را بهبود می‌بخشد.

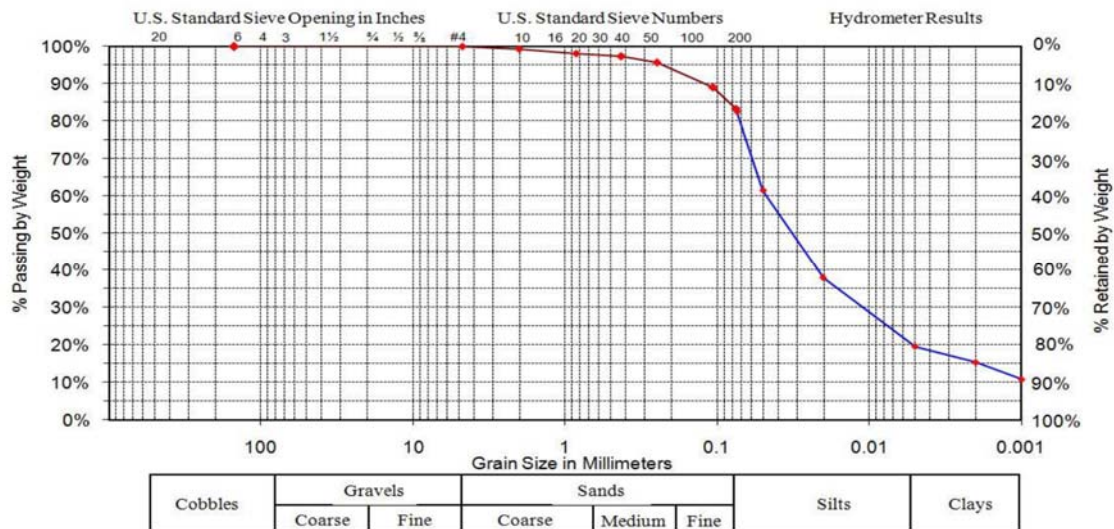
ب- با اضافه کردن خاکستربادی پایداری افزایش می‌یابد.

ج - اختلاط آن با خاک باعث کاهش شکل‌پذیری و خصوصیات پلاستیسیته زیر اساس می‌شود.

## ۶-۲- مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک پایه

### ۶-۲-۱- دانه بندی

آزمایش دانه‌بندی به روش الک و هیدرومتری براساس استاندارد شماره ASTM D421 و ASTM D422 انجام پذیرفته است که نتایج آن در شکل (۱۹) قابل ملاحظه می‌باشد.



شکل ۱۹. منحنی دانه بندی خاک پایه مورد استفاده در این پژوهش (فرح بخش و همکاران، ۱۳۹۸)

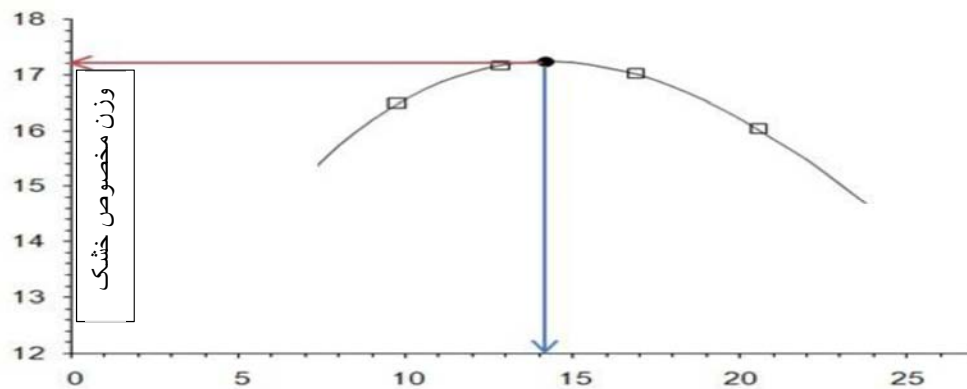
### ۶-۲-۳- تراکم

آزمایش تراکم استاندارد مطابق استاندارد ASTM D698 انجام پذیرفته است. که نتایج در شکل (۲۰) قابل ملاحظه می باشد.

### ۶-۲-۶- حدود اتربرگ

آزمایش تعیین حدود اتربرگ خاک طبق استاندارد ASTM D4318 انجام پذیرفته و مقدار شاخص پلاستیسیته بدین صورت بدست آمده است.

$$PI = LL - PL = 23.77 - 21.79 = 1.98$$



شکل ۲۰. منحنی آزمایش تراکم (رابطه بین وزن مخصوص و درصد رطوبت) خاک پایه (فرح بخش و همکاران، ۱۳۹۸)

### ۶-۲-۴- مقاومت فشاری تک محوری

این آزمایش بر اساس دستورالعمل استاندارد ASTM D2166 و بر روی نمونه های خاک تثبیت شده با مقدار ۵ و ۸ درصد آب و ۰ و ۴ درصد خاکستر بادی در بازه های یک،

هفت و بیست و هشت روزه بر حسب رطوبت بهینه حداکثر هر نمونه انجام پذیرفته است تا بهترین نمونه که باعث مناسبترین مقاومت فشاری تک محوری می گردد را به عنوان درصد اختلاط بهینه معرفی نماید. نمونه ای تحت آزمایش تکمحوری در شکل (۲۱) قابل ملاحظه است.



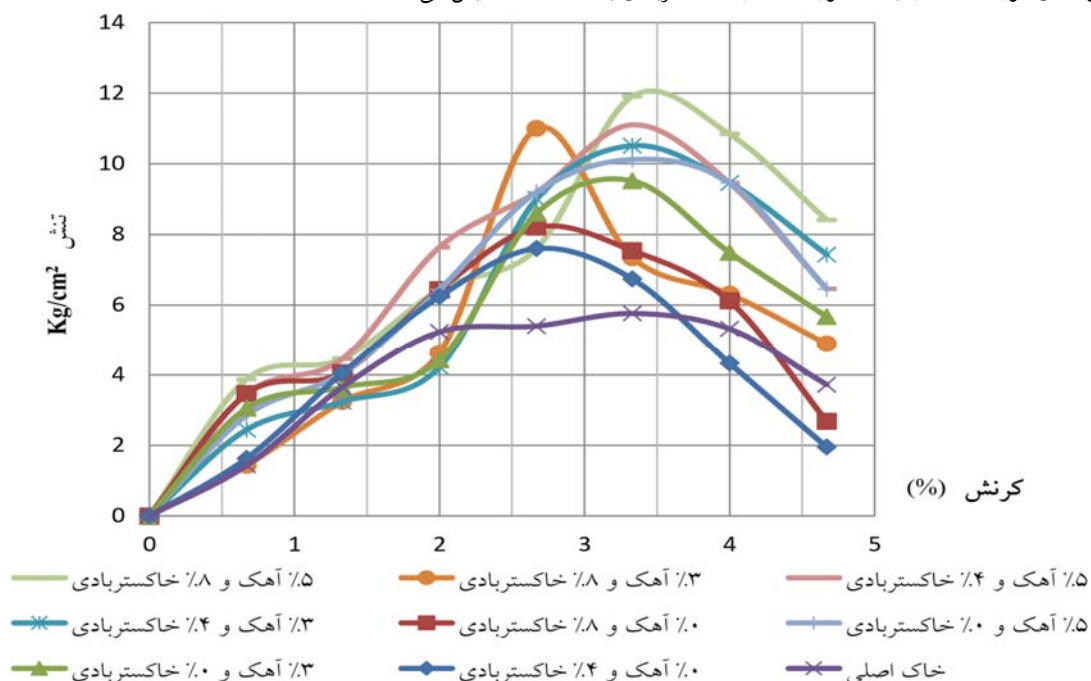
شکل ۲۱. تصویرگسیختگی نمونه تحت آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (فرح بخش و همکاران، ۱۳۹۸)

## ۷-مقاومت فشاری

### ۷-۱- مقاومت فشاری تک محوری یک روزه:

نسبت‌های اختلاط مختلف در مدتزمان عمل‌آوری یک روزه نمایش می‌دهد.

شکل ۲۲ نتایج حاصل از انجام آزمایش تک محوری بر روی نمونه‌های مورد مطالعه را با حضور آهک و خاکستر بادی با



شکل ۲۲. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری نمونه های یک روزه با نسبت های اختلاط مختلف (فرح بخش و همکاران، ۱۳۹۸)

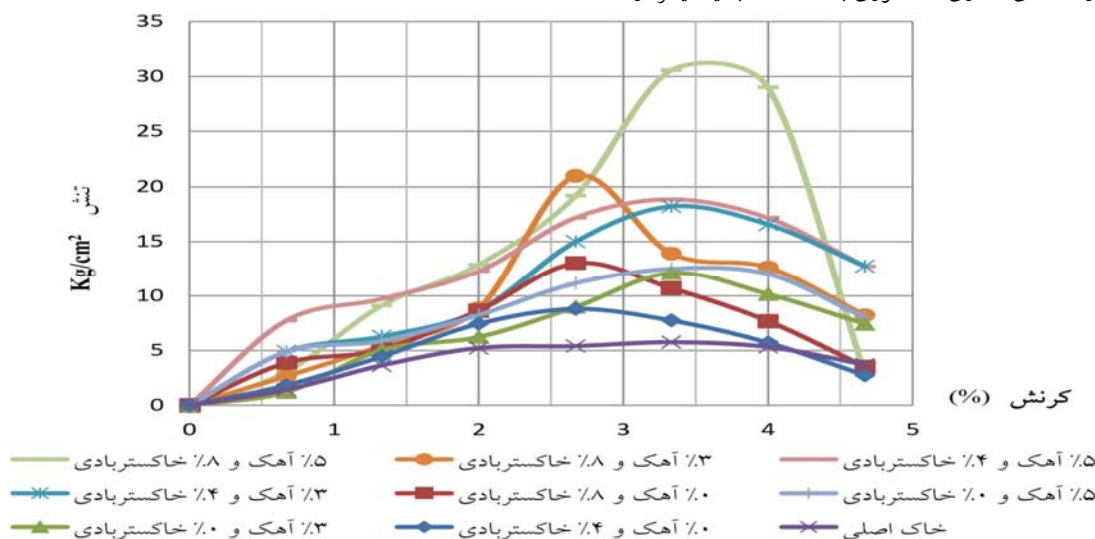
افزودن ۵ درصد آهک و ۸ درصد خاکستر بادی است که به رقمی در حدود ۱۲ کیلوگرم بر سانتی مترمربع رسیده است، این در حالی است که مقاومت خاک اصلی حدود ۶ کیلوگرم بر سانتیمترمربع می‌باشد که مبین رشد صد درصدی مقاومت فشاری تک محوری خاک تثبیت شده پس از یک روز عمل آوری است. موضوع افزایش مقاومت فشاری در مابقی

شکل ۲۲ که رفتار نمونه‌های مورد مطالعه را با حضور آهک و خاکستر بادی با نسبت‌های اختلاط مختلف در مدتزمان عمل آوری یک روزه مدنظر قرار داده است، نشان دهنده رشد مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های تثبیت شده نسبت به خاک اصلی حتی در مدت زمان عمل آوری یک روز می‌باشد. بیشینه مقاومت فشاری تک‌محوری بدست آمده حاصل از

عمل آوری ناکافی برای انجام فعل و انفعالات بین خاک و مواد افزودنی می‌باشد که این روند در زمان‌های عمل آوری بیشتر سرعت و شتاب سریعتری به خود خواهد گرفت.

## ۲-۷- مقاومت فشاری تکمحوری هفت روزه:

در شکل ۲۳ رفتار نمونه‌های مورد مطالعه را با حضور آهک و خاکستر بادی با نسبت‌های اختلاط مختلف در مدت زمان عمل آوری هفت روزه ارائه شده است.



شکل ۲۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تکمحوری نمونه‌های هفت روزه با نسبت‌های اختلاط مختلف (فرح بخش و همکاران، ۱۳۹۸)

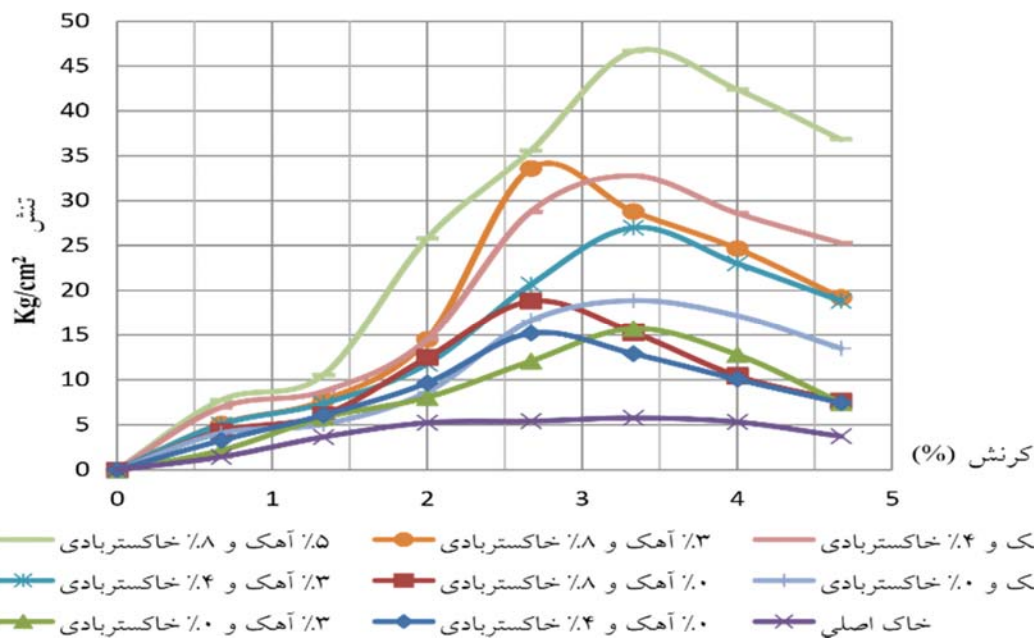
گردید اما لازم به ذکر است که مابقی نسبت‌های اختلاط نیز نمودی نزدیک به هم داشته‌اند و به صورت کلی رفتار مقاومتی خاک، در اثر افزودن افزودنیها با درصدهای مختلف، در مدت زمان عمل آوری یکروزه از حدود ۱/۵ برابر تا حدود ۲ برابر مقاومت خاک پایه افزایش پیدا کرده است. دلیل نزدیکی نتایج عمل آوری یک روزه از حدود مقاومت‌های فشاری تک محوری بدست آمده به یکدیگر، زمان عمل آوری ناکافی برای انجام فعل و انفعالات بین خاک و موادافزودنی می باشد که این روند در زمان‌های عمل آوری بیشتر سرعت و شتاب سریعتری به خود خواهد گرفت.

## ۷-۳- مقاومت فشاری تک محوری بیست و هشت روزه

شکل ۲۴ رفتار نمونه‌های مورد مطالعه را با حضور آهک و خاکستر بادی با نسبت‌های اختلاط مختلف در مدت زمان عمل آوری بیست و هشت روزه نمایش داده است.

نسبت‌های اختلاط نیز به چشم می‌خورد. گرچه نسبت فوق به عنوان بیشینه مقاومت فشاری تک محوری یک روزه معرفی گردید اما لازم به ذکر است که مابقی نسبت‌های اختلاط نیز نمودی نزدیک به هم داشته‌اند و به صورت کلی رفتار مقاومتی خاک، در اثر افزودن افزودنی‌ها با درصدهای مختلف، در مدت زمان عمل آوری یکروزه از حدود ۱/۵ برابر تا حدود ۲ برابر مقاومت خاک پایه افزایش پیدا کرده است. دلیل نزدیکی نتایج مقاومت های فشاری تکمحوری بدست آمده به یکدیگر، زمان

شکل ۲۳ که رفتار نمونه‌های مورد مطالعه را با حضور آهک و خاکستر بادی با نسبت‌های اختلاط مختلف در مدتزمان عمل آوری هفت روزه مدنظر قرار داده است، نشان دهنده رشد چند برابری مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های تثبیت شده نسبت به خاک اصلی در مدت زمان عمل آوری هفت روزه هستند. بیشینه مقاومت فشاری تکمحوری بدست آمده حاصل از افزودن ۵ درصد آهک و ۸ درصد خاکستر بادی است که به رقمی در حدود ۳۱ کیلوگرم بر سانتیمترمربع رسیده است، این در حالی است که مقاومت خاک اصلی حدود ۶ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می‌باشد که مبین رشد صد درصدی مقاومت فشاری تک محوری خاک تثبیت شده پس از یک روز عمل آوری است. موضوع افزایش مقاومت فشاری در مابقی نسبت‌های اختلاط نیز به چشم می‌خورد. گرچه نسبت فوق به عنوان بیشینه مقاومت فشاری تکمحوری یک روزه معرفی



شکل ۲۴. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های ۲۸ روزه با نسبت‌های اختلاط مختلف (فرح بخش و همکاران، ۱۳۹۸)

آهک به خاک سیلتی مورد بحث، مقاومت فشاری به رقمی حدود ۱۶ کیلوگرم بر سانتیمترمربع رسیده است و همچنین در اثر افزودن تنها ۵ درصد آهک مقاومت فشاری به حدود ۱۹ کیلوگرم بر سانتیمترمربع نزدیک ۲/۵ تا ۳ برابر مقاومت نهایی بدست آمده نسبت به مقاومت خاک پایه می‌باشد. اما هنگامیکه همراه شده است، که به ترتیب افزودن آهک از اضافه نمودن خاکستر بادی به مخلوط کمک گرفته شده نتایج قابل توجه‌های بدست آمده است، به عنوان مثال زمانی که از نسبت‌های اختلاط آهک و خاکستر بادی به صورت توأمان و به ترتیب به میزان ۳ و ۴ درصد استفاده شده مقدار مقاومت برابری مقاومت بدست آمده در قیاس با شرایط خاک پایه حداکثر نمونه به ۲۷ کیلوگرم بر سانتیمترمربع رسیده که مبین نمو ۴/۵ برابری مقاومت بدست آمده در قیاس با شرایط خاک پایه است. (فرح بخش و همکاران، ۱۳۹۸)

#### ۷-۴- تأثیر مدت زمان عمل آوری بر مقادیر مقاومت

##### فشاری تک محوری

بررسی نتایج مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های تثبیت شده با آهک و خاکستر بادی در مدت زمان‌های مختلف عمل آوری نشان دهنده بهبود مقاومت تک محوری خاک تثبیت شده با گذشت زمان می‌باشد که به دلیل پوزولانی بین افزودنی‌ها و خاک مورد مطالعه با یکدیگر بوده است؛ یعنی نمونه‌هایی که

باتوجه به شکل ۲۴ پیشینه مقاومت بدست آمده پس از بیست و هشت روز عمل آوری به حدود ۴۷ کیلوگرم بر سانتی مترمربع رسیده است که ناشی از ترکیب خاک اصلی همراه با ۵ درصد آهک و ۸ درصد خاکستر بادی می باشد این ارتقای مقاومت در قیاس با مقدار مقاومت خاک اصلی که حدود ۶ کیلوگرم بر سانتیمترمربع می‌باشد رقم قابل توجهی است.

نکته قابل استنتاج دیگر آن است که هر چند مقادیر پیشینه مقاومت متناظر با افزودن مقادیر به ترتیب ۳ و ۵ درصد برای آهک به تنهایی با ۴ و ۸ درصد برای خاکستر بادی به تنهایی با خاک پایه تقریباً برابرند اما کرنش متناظر با مقاومت پیشینه در موارد استفاده از آهک بیشتر بوده و نمونه‌ها شکل پذیری بیشتری از خود نشان داده‌اند. این روند از بررسی و مقایسه در رفتار سایر نمونه‌ها نیز قابل نتیجه‌گیری است به گونه‌ای که می‌توان چنین عنوان نمود که افزودن آهک بدون تغییر محسوس در شکل پذیری خاک و یا اندکی افزایش آن موجب بالا رفتن مقاومت خاک سیلتی می‌شود اما افزودن خاکستر بادی ضمن بالا بردن مقاومت پیشینه موجب کاهش شکل پذیری می‌گردد. از نکات قابل تأمل دیگری که از شکل ۲۴ نتیجه می‌شود آن است که مقاومت نهایی بدست آمده هنگام استفاده از آهک به صورت مجزا، کمتر از زمانی بوده است که از حضور خاکستر بادی، به عنوان مکمل آهک، کمک گرفته شده است. یعنی همانطور که اشاره شد در اثر افزودن تنها ۳ درصد

بین خاک و افزودنی‌ها تقریباً شکل نهایی به خود گرفته و درصد بالایی از مقاومت نهایی خاک تثبیت شده در این مدت بدست می‌آید همچنین تامین مقاومت مورد انتظار از خاک تقویت شده در کمترین زمان، مسئله بسیار مهمی در پیشبرد اهداف زمانبندی اجرای سازه‌های مختلف عمرانی خواهد بود، که باید توسط طراح مد نظر قرار گیرد. نتایج جدول ۷ از نقطه نظر نسبت مقاومت فشاری تک محوری بر حسب مدتزمان عمل آوری و به ازای مقادیر مختلف آهک و خاکستر بادی است که در شکل‌های ۲۵ الی ۲۸ نیز به تفکیک ارائه گردیده است. (فرح بخش و همکاران، ۱۳۹۸)

در مدت بیست و هشت روز عمل آوری شده‌اند مقاومت بیشتری را نسبت به نمونه‌های هفت روزه و به همین ترتیب نمونه‌های هفت روزه نیز مقاومت بیشتری را نسبت به نمونه‌های یک روزه از خود نشان می‌دهند. همچنین می‌توان بیان داشت که حتی با گذشت تنها یک روز از زمان عمل آوری نمونه‌ها، مقاومت بیشتری نسبت به قبل از تثبیت خاک با آهک و خاکستر بادی پدید آمده‌است. این مقدار ۶۰ تا ۸۰ درصد مقاومت حداکثری نمونه‌ها می‌باشد. لازم به ذکر است که در مدت زمان عمل آوری بیست و هشت روزه، برخلاف مدتزمان‌های عمل آوری یک روزه و هفت روزه، فعالیت‌های

جدول ۷. نتایج بهبود مقاومت فشاری تک محوری خاک تثبیت شده با آهک و خاکستر بادی به تفکیک زمان عمل آوری نسبت به خاک پایه

(فرح بخش و همکاران، ۱۳۹۸)

| درصد<br>آهک | درصد خاکستر بادی | نسبت مقاومت فشاری تک محوری خاک بهسازی شده به خاک پایه |        |         |
|-------------|------------------|-------------------------------------------------------|--------|---------|
|             |                  | ۱ روزه                                                | ۷ روزه | ۸۸ روزه |
| ۵           | ۸                | ۱۱/۱۱                                                 | ۳۰/۵۸  | ۴۶/۶۶   |
| ۳           | ۸                | ۱۱                                                    | ۸۰/۱۱  | ۳۳/۵۱   |
| ۵           | ۴                | ۱۱/۱۱                                                 | ۱۸/۸۶  | ۳۸/۷۶   |
| ۳           | ۴                | ۱۰/۵۱                                                 | ۱۸/۸۱  | ۸۶/۱۸   |
| ۵           | ۰                | ۱۰/۱۸                                                 | ۱۸/۸۵  | ۱۸/۸۵   |
| ۰           | ۸                | ۸/۸                                                   | ۱۳     | ۱۸/۷۱   |
| ۰           | ۴                | ۷/۶                                                   | ۸/۸    | ۱۵/۱۱   |
| ۳           | ۰                | ۱/۵۸                                                  | ۱۸/۱۱  | ۱۵/۰۷   |
| ۰           | ۰                | ۵/۷۶                                                  | ۵/۷۶   | ۵/۷۶    |

#### ۷-۴-۱- تأثیر مدت زمان بر عمل آوری خاکستربادی

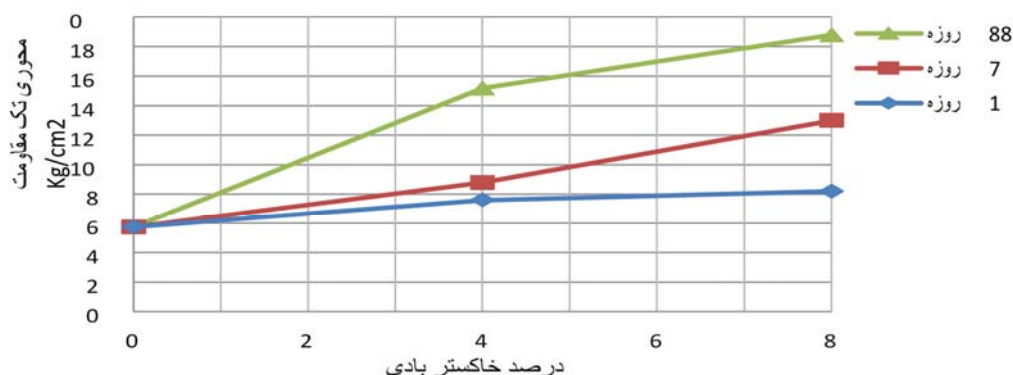
شکل ۲۵ شرایط نمونه را بدون حضور آهک و تنها با حضور خاکستربادی با درصدهای مختلف و تحت زمان‌های عمل آوری متفاوت نشان داده است. همانگونه که از نمودار قابل استنباط است شیب نمودار در حالت یک روز عمل آوری به دلیل عدم شکل گیری صحیح فعالیت‌های پوزولانی خاکستربادی با خاک، رشد چندانی در قیاس با مدت‌زمانهای عمل آوری بلندتر به خود نگرفته است. پس از هفت روز عمل آوری، نمودار شیب تندتری نسبت یک روز عمل آوری خاکستربادی دارد که نشان از تقویت فعالیت‌های بین خاکستربادی و خاک مورد مطالعه می‌باشد. پس از بیست و هشت روز عمل آوری، تأثیر واقعی حضور خاکستربادی بر روی مقاومت فشاری تک محوری به وضوح قابل لمس است. نمودار در بازهی صفر الی ۴ درصد خاکستربادی شیب صعودی تری نسبت به بازهی ۴ الی ۸ درصد دارد که نشان از کافی بودن تأثیر خاکستربادی به میزان ۴ درصد بر شکل‌گیری مقاومت فشاری ایده‌آل خاک مورد مطالعه می‌باشد و در صورت افزودن مقدار بیش از ۴ درصد روند افزایشی مقاومت فشاری تکمحوری به نسبت کمتری ادامه پیدا خواهد نمود (فرح بخش و همکاران، ۱۳۹۸)

شکل ۲۶ واقع در صفحه بعد شرایط نمونه را بدون حضور خاکستربادی و تنها با حضور آهک با درصدهای مختلف و تحت زمان‌های عمل آوری متفاوت نشان داده‌شده است. با دقت در نمودار قابل مشاهده است طبق انتظارات فعالیت‌های مقاومتی شکل گرفته بین آهک و خاک مورد مطالعه با گذشت زمان تأثیر بیشتری از خود نمایان می‌سازد. همچنین در مدت‌های عمل آوری یکروزه و هفت روزه شیب نمودار، مخصوصاً در نسبت‌های اختلاط بیش از ۳ درصد آهک، تقریباً شرایط یکسانی دارد. (فرح بخش و همکاران، ۱۳۹۸)

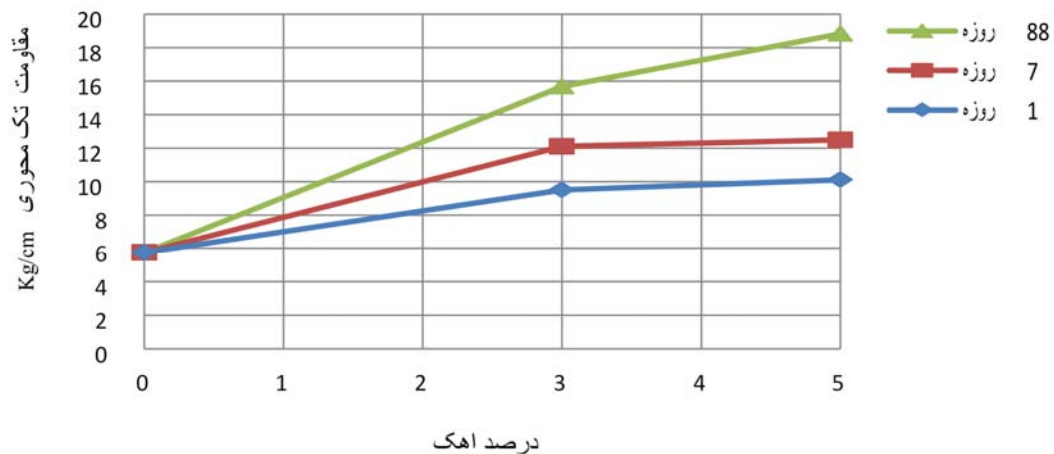
#### ۷-۴-۲- تأثیر مدت زمان بر عمل آوری آهک

با گذشت مدت زمان بیست و هشت روز عمل آوری، گرچه رشد مقاومت فشاری تک محوری در بازدهی ۳ الی ۵ درصد نسبت به زمان‌های عمل آوری کوتاه‌تر رشد بهتری داشته است اما باید بیان شود که در هر سه مدت زمان عمل آوری، نمودار در بازهی صفر الی ۳ درصد شیب صعودی تری دارد. این مسئله به وضوح نشانگر این موضوع است که حضور آهک به میزان ۳ درصد شرایط مقاومتی نمونه‌های مورد بررسی را تا حد بسیار قابل قبولی افزایش داده‌است، و این میزان، در قیاس با شیب نمودار در بازهی بیش از ۳ درصد آهک صفر از کیفیت بیشتری برخوردار است. (فرح بخش و همکاران، ۱۳۹۸)

شکل ۲۵. تأثیر زمان عمل آوری بر مقادیر مقاومت فشاری تکمحوری خاک تثبیت شده با خاکستربادی و بدون حضور آهک (فرح بخش و همکاران، ۱۳۹۸)



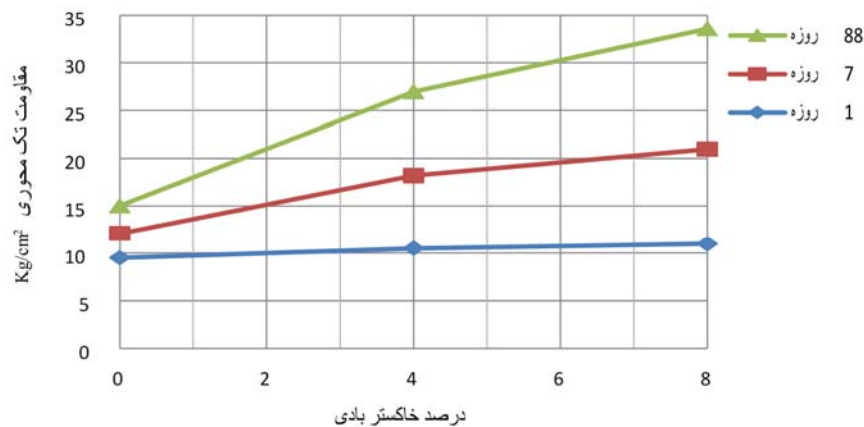
شکل ۲۵. تأثیر زمان عمل آوری بر مقادیر مقاومت فشاری تکمحوری خاک تثبیت شده با خاکستربادی و بدون حضور آهک (فرح بخش و همکاران، ۱۳۹۸)



شکل ۲۶. تأثیر زمان عمل آوری بر مقادیر مقاومت فشاری تکمحوری خاک تثبیت شده با آهک و بدون حضور خاکستربادی (فرح بخش و همکاران، ۱۳۹۸)

#### ۷-۴-۳- تأثیر مدت زمان بر عمل آوری خاکستربادی توأم با ۳ درصد آهک

شکل ۲۷ شرایط نمونه مورد مطالعه را با حضور ۳ درصد آهک در کنار درصدهای مختلف از خاکستربادی و تحت زمان های عمل آوری متفاوت نشان داده است.



شکل ۲۷. تأثیر زمان عمل آوری بر مقادیر مقاومت فشاری تک محوری خاک تثبیت شده با خاکستربادی و ۳ درصد آهک (فرح بخش و همکاران، ۱۳۹۸)

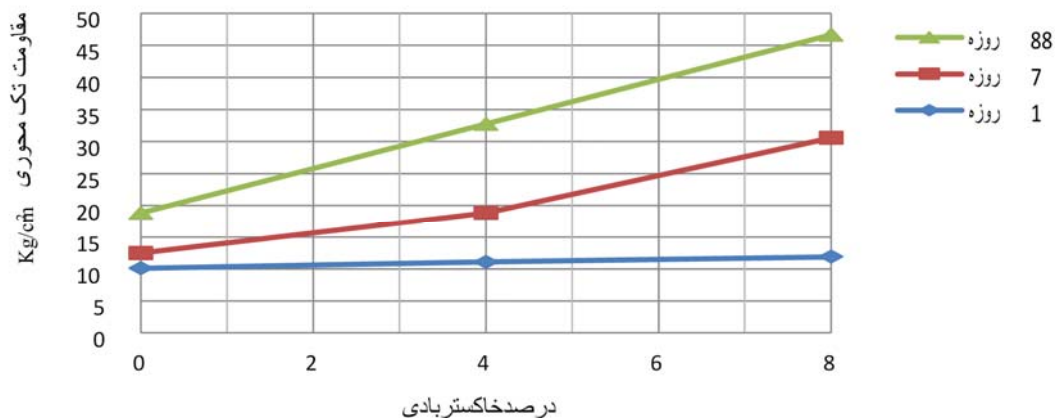
در کنار ۳ درصد آهک، برای افزایش مقاومت فشاری تک محوری هفت روزه خواهد بود. در مدت زمان عمل آوری بیست و هشت روزه نمونه ها، شیب نمودار تندتر از زمان های عمل آوری پیشین گشته و نمودار تقریباً روند یکسانی را به خود گرفته است که به بیان کافی بودن مدت زمان شکل گیری فعالیت های بین افزودنی ها و خاک اصلی و در نتیجه تولید مقاومت نهایی می پردازد. همچنین نمودار شیب صعودی تری را در بازهی صفر الی ۴ درصد خاکستربادی نسبت به بازهی ۴ الی ۸ درصد تجربه می کند، که نشان می دهد حضور

به طور مشخص حضور ۳ درصد آهک در کنار درصدهای مختلف از خاکستر بادی به دلیل شکل گیری فعالیت های پوزولانی، نیاز به زمان کافی برای تقویت مقاومت خاک مدنظر دارد به همین علت در مدت زمان عمل آوری یک روزه تأثیر اضافه نمودن افزودنیها بر مقاومت فشاری تک محوری خاک سیلتی مورد مطالعه ناچیز بوده است. نمودار در مدت زمان عملاً وری هفت روزه شیب صعودی تری را در بازهی صفر الی ۴ درصد خاکستر بادی نسبت به بازهی ۴ الی ۸ درصد تجربه می کند، که نشان از کافی بودن ۴ درصد خاکستربادی،

#### ۷-۴-۴-تأثیر مدت زمان بر عمل آوری خاکستربادی توام با ۵ درصد آهک

شکل ۲۸ شرایط نمونه مورد مطالعه را با حضور ۴ درصد آهک در کنار درصدهای مختلف از خاکستربادی و تحت زمان‌های عمل آوری متفاوت مورد بررسی قرار داده است.

خاکستربادی به میزان ۴ درصد، در کنار ۳ درصد آهک، شرایط مقاومتی نمونه‌های مورد بررسی را تا حد بسیار قابل قبولی افزایش داده‌ها است، و این میزان، در قیاس با شیب نمودار در بازه‌ی بیش از ۴ درصد خاکستر بادی، از کیفیت بیشتری برخوردار است. (فرح بخش و همکاران، ۱۳۹۸)



شکل ۲۸. تأثیر زمان عمل آوری بر مقادیر مقاومت فشاری تک محوری خاک تثبیت شده با خاکستر بادی و ۵ درصد آهک

(فرح بخش و همکاران، ۱۳۹۸)

درصد رطوبت بهینه، وزن مخصوص خشک حداکثر، مقدار CBR و ضریب نفوذپذیری بررسی شده است. از طرف دیگر، بافت اولیه نمونه‌ها با درصدهای مختلف خاکستر بادی و آهک از طریق عکس‌های میکروسکوپی با هم مقایسه شده است. نتایج بدست آمده بصورت خلاصه در زیر ارائه شده است:

بر اساس نتایج آزمایش تراکم پروکتور تأثیرپذیری مستقیم میزان رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر در اثر افزایش درصد خاکستر بادی در نمونه‌ها را می‌توان یافت. بطوریکه افزایش خاکستر بادی مقدار درصد رطوبت بهینه،  $\omega_{opt}$  را افزایش داده ولی مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر،  $\gamma_d - max$  با افزایش خاکستر بادی تا ۲۰ درصد برای حالت بدون آهک و تا ۱۰ درصد برای حالت وجود ۱۰ درصد آهک افزایش یافته و بعد از آن افزایش خاکستر بادی به ماسه میزبان، مقدار آن را کاهش داده است. بعبارت دیگر اضافه کردن ۲۰ درصد خاکستر بادی بدون آهک و ۱۰ درصد خاکستر بادی به همراه ۱۰ درصد آهک موجب بیشترین مقدار  $\gamma_d - max$  مقدار شده است.

نتایج آزمایش نسبت باربری کالفرنیا نشان می‌دهد که اضافه کردن خاکستر بادی تا ۲۰ درصد به ماسه باعث افزایش عدد

حضور ۴ درصد آهک نیز در کنار درصدهای مختلف از خاکستربادی به دلیل شکل‌گیری فعالیت به مانند شرایط بند پوزولانی، نیاز به زمان کافی برای تقویت مقاومت خاک مدنظر دارد به همین علت در مدت زمان عمل‌آوری یک روزه تأثیر اضافه نمودن خاکستربادی بر مقاومت فشاری تک محوری خاکسیلتی مورد مطالعه ناچیز بوده است. نمودار در مدت زمانهای عمل آوری هفت روزه و حتی بیست و هشت روزه در حضور نسبت‌های بیشتری از افزودنی‌ها نسبت افزایش ۲ درصد آهک بیشتر شیب تقریباً یکسانی به خود گرفته است که نشان می‌دهد پس از گذشت مدت زمان کافی از عمل آوری نمونه‌ها رفتار مقاومتی خاک مورد بحث روند متعادلی پیدا کرده است.

#### ۸-نتیجه‌گیری

در این جا مجموعه ای از آزمایشهای تراکم پروکتور اصلاح شده، نسبت باربری کالفرنیا و نفوذپذیری بر روی نمونه‌های بازسازی شده خاک ماسه تثبیت شده با خاکستر بادی یا خاکستر بادی به همراه آهک انجام شده است. بر اساس نتایج اثر خاکستر بادی به تنهایی و یا به همراه آهک بر روی

در این مقاله خاک رس به طور رضایت‌مندی با ۱۵ درصد خاکستر بادی تثبیت شد. (فرخی و همکاران، ۱۳۹۳)

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مقاومت فشاری تکمحوری انجام شده بیشترین مقاومت مربوط به نسبت اختلاط ۵ درصد آهک و ۸ درصد خاکستر بادی به میزان ۴۴/۶۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد، که نشان دهنده رشد هشت برابری نسبت به مقاومت فشاری تکمحوری خاک سیلتی منطقه‌ی مورد مطالعه می‌باشد، اما باید خاطر نشان شود که با توجه به مسئله‌ی صرفه اقتصادی راهکار ارائه بهبود مشخصات خاک، نسبت اختلاط ۳ درصد آهک و ۴ درصد خاکستر بادی با توجه به نیل به مقاومت ۲۰/۶۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و رشد بیش از ۳/۵ نسبت اختلاط خاک سیلتی منطقه‌ی شهریار با آهک و خاکستر بادی به منظور بهبود مشخصات مقاومتی پیشنهاد می‌گردد. در هر صورت لازم به ذکر است که انتخاب درصد اختلاط مناسب به مقدار نیروی وارده از سوی سازه حادثی بر روی خاک مدنظر بستگی دارد. علاوه بر این مقایسه مقاومت نمونه‌ها در فاصله عمل‌آوری یک تا بیست و هشت روز نشان می‌دهد نمونه‌های تثبیت شده با آهک خاکستر بادی افزایش مقاومت بیشتری را در مقایسه با نمونه‌های تثبیت شده با آهک به تنهایی دارند که خود بیانگر تأثیر مثبت خاکستر بادی در بهبود مقاومت بلند مدت خاک است.

همچنین می‌توان نتیجه گرفت ترکیب افزودنی‌های تثبیت کننده مورد استفاده در این پژوهش اثرات پرکنندگی بهتر و افزایش دانسیته مناسب‌تر بر خاک سیلتی دارند که سهم افزایش دانسیته با مدت زمان افزایش می‌یابد، همچنین ترکیب افزودنی‌های تثبیت کننده مورد استفاده می‌تواند به طور مؤثری سبب بهبود مقاومت فشاری خاک سیلتی شود. از نقطه نظر مکانیکی و قابلیت اجرا، ترکیب افزودنی‌های تثبیت کننده مورد استفاده یک طرح اقتصادی و معقول را نتیجه خواهد داد. خاک سیلتی تثبیت شده مقاومت اولیه‌ی بالا و سختی سراسری بالایی دارد و به خوبی می‌تواند نیازهای بستر سازه‌ها و راه‌ها را برآورده کند. (فرح بخش و همکاران، ۱۳۹۸)

## ۹- مراجع

- بیات، میثم و بحرینیان، سید محمدحسین (۱۳۹۹). تأثیر خاکستر بادی و آهک بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک

نسبت باربری کالیفرنیا می‌گردد. در صورتی که مقدار خاکستر بادی در نمونه‌ها از ۲۰ درصد افزایش یابد به دلیل کاسته شدن از تماس مستقیم دانه‌های ماسه بر روی یکدیگر، مقدار  $CBR$  کاهش می‌یابد. زمان عمل‌آوری تأثیر چندانی بر افزایش  $CBR$  نمونه‌های حاوی خاکستر بادی تنها ندارد و در صورت اضافه نمودن آهک به نمونه‌ای دارای خاکستر بادی،  $CBR$  نیز افزایش می‌یابد و شیب این افزایش بدلیل افزایش خاکستر بادی تا ۲۰ درصد و همچنین مدت زمان عمل‌آوری بیشتر از حالت بدون آهک است. بر اساس آزمایش‌های نفوذپذیری انجماد شده و نتایج آنها می‌توان بیان کرد که حضور خاکستر بادی در ترکیب نمونه‌ها باعث کاهش در میزان نفوذپذیری خواهد شد و هرچه درصد خاکستر بادی در نمونه‌ها افزایش یابد، از نفوذپذیری ماسه بیشتر کاسته می‌گردد. همچنین با افزودن آهک به نمونه‌ها نیز همین نتیجه حاصل می‌شود و می‌توان گفت که ترکیب خاکستر بادی و آهک بیش‌تر از میزان نفوذپذیری می‌کاهد. اگر چه نقش خاکستر بادی در کاهش نفوذپذیری خیلی بیشتر از آهک است. با توجه به نتایج بدست آمده در بهبود نسبی نسبت باربری کالیفرنیا و کاهش مناسب نفوذپذیری خاک توسط خاکستر بادی، می‌توان بیان کرد که از ترکیب این مواد برای پروژه‌های متفاوت همانند لندفیل‌های زباله و زیرسازی راه‌ها می‌توان بهره برد. (بیات و بحرینیان، ۱۳۹۹).

تأثیر خاکستر بادی با آهک فراوان بر روی نمونه خاک  $CH$  مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد: به علت وزن مخصوص کمتر خاکستر بادی نسبت به خاک، حداکثر چگالی خشک با افزایش خاکستر بادی کاهش می‌یابد. در ضمن مقدار رطوبت بهینه با افزایش خاکستر بادی افزایش می‌یابد. افزودن خاکستر بادی مقاومت فشاری محدود نشده‌ی خاک را افزایش می‌دهد بیش از ۲۸ روز هیچ افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری محدود نشده وجود ندارد. افزایش قابل توجهی در چسبندگی در زمان‌های طولانی‌تر در نمونه‌های حاوی خاکستر بادی با درصد بیشتر وجود دارد. این تأثیر ممکن است ناشی از افزایش چسبندگی خاک با واکنش پوزولانی ذرات ریز خاکستر بادی و اثر سخت شدن آن مربوط به حضور آهک آزاد با بخش محلول در آب خاکستر بادی می‌باشد. اصلاح خواص مکانیکی خاک مخلوط شده با خاکستر بادی یا خاک به تنهایی، در بخشی می‌تواند به از دست‌دادن رطوبت نمونه در طول مدت بهبودی وابسته باشد. برای خواص مورد بررسی

- ماسه‌ای. نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی ایران. ۱۳(۲)، ۸۵-۹۵
- ایران دوست، فرهاد، جوادین، سید ادیس (۱۳۸۹). تکنولوژی بتن و آزمایشگاه همراه با طرح اختلاط. شهر/شوب.
- ترابی کاوه، مهدی وحیدری، علی (۱۳۹۸). ارزیابی ویژگیهای مهندسی خاک‌های ماری تثبیت شده توسط آهک و نانوکامپوزیت (مطالعه موردی: خاک ماری منطقه سنقر). نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی ایران. ۱۲(۲)، ۵۵-۶۹.
- روشندل، پ. (۱۳۷۸). بررسی روش‌های مختلف تثبیت خاک و مصالح سنگی روسازی راه. ژئوتکنیک و مقاومت مصالح، شماره ۸۳.
- نجفی، الف، مهدی‌زاده، ح. (۱۳۹۳). بررسی و مطالعه مواد شیمیایی تثبیت کننده خاک‌های نرم، کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران، ایران، ۱۲ و ۱۳ آذر.
- فرخی، فرهنگ، حسینی، سید مهدیس، دوستی، مجید (۱۳۹۳). استفاده از خاکستریادی با آهک فراوان برای اصلاح خاک رس. اولین کنگره ملی مهندسی ساخت و ارزیابی پروژه‌های عمرانی.
- بنده زاده، امید، داودی، محمد هادی، استانه، محمد فرید. (۱۳۸۹). بررسی عامل زمان و درصد مخلوط آهک و خاکستر بادی بر خواص فیزیکی و مکانیکی خاک ریزدانه. چهارمین همایش بین‌المللی. عمران مدرس. دوره یازدهم. شماره ۳.
- باقری‌پور، ایمان. (۱۳۸۱). تثبیت خاک‌های ریزدانه به وسیله افزودن میکروسیلیکا به همراه آهک یا سیمان. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه مازندران.
- باقریان، ابوالقاسم. (۱۳۸۲). تثبیت بستر راه‌های مازندران با استفاده از آهک و خاکستر پسته برنج. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه مازندران.
- طاحونی، شاهپور. (۱۳۷۳). اصول مهندسی ژئوتکنیک. جلد دوم، انتشارات دانشگاه امیرکبیر.
- هاشمی طباطبایی، سعید. (۱۳۸۶). استفاده از آهک جهت بهسازی خواص مقاومتی و تغییر شکل خاک‌های ریزدانه. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- فرح بخش، سدید، حق بین، مریم، اقبالی. امیر حسین (۱۳۹۸). تاثیر افزودن آهک و خاکستر بادی بر مقاومت تک
- محوری خاک‌های سیلتی. نشریه نخبگان علوم مهندسی. جلد ۴. شماره ۲.
- داس، برانجا . (۱۳۸۹). اصول مهندسی ژئوتکنیک (چاپ چهاردهم). تهران: مؤسسه انتشاراتی پارس آئین.
- جلد دوم، مهندسی پی، ترجمه طاحونی.
- بهنیا، کامبیز، طباطبایی، ابوالحسن (۱۳۷۸). مکانیک خاک (چاپ یازدهم). مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران.
- هاشمی طباطبایی، سعید، اقبالی اربی. عطا (۱۳۷۸). مقایسه تاثیر آهک زنده و شکفته بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک اصلاح شده. نشریه علوم زمین، سال هفدهم، شماره ۶۷.
- Amu, Olugbenga O., Oluwale Fakunle Bamisaye, and Iyiola Akanmu Komolafe. (2011). The suitability and lime stabilization requirement of some lateritic soil samples as pavement. Int. J. Pure Appl. Sci. Technol 2, No. 1, 29-46.
- Diamond, Sidney, and Earl B. Kinter. (1965). Mechanisms of soil-lime stabilization. Highway Research Record 92, 83-102.
- Kaniraj, Shenbaga R., and Vasant G. Havanagi. (2001). Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced fly ash-soil mixtures. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 127, No. 7, 574-584.
- Kumpiene, Jurate, Anders Lagerkvist, and Christian Maurice. (2007). Stabilization of Pb-and Cu-contaminated soil using coal fly ash and peat. Environmental Pollution 145, No. 1, 365-373.
- Collins RJ, Ciesielski SK. Utilization of waste materials in civil engineering construction. New York: ASCE.
- Pitroda, J. (2013). A study of utilization aspect of stone waste in Indian context. Vol. 2.
- Shen, Weiguo, Mingkai Zhou, and Qinglin Zhao. Study on lime-fly ash-phosphogypsum binder. (2007). Construction and Building Materials 21, No. 7, 1480-1485.
- Yeheyis, Muluken B., Julie Q. Shang, and Ernest K. Yanful. (2008). Characterization and environmental evaluation of Atikokan coal fly ash for environmental applications. Journal of Environmental Engineering and Science 7, No. 5, 481-498.
- Hausmqnn MR. Engineering principles of ground modification. Singapore, McGraw-Hill.

-Ghiasi, V., & molaei tari, P. (2023). Investigating the potential application of biochar on soil water retention properties (swrc) with different textures in geotechnical engineering structures. *Road*.

**doi: 10.22034/road.2023.353589.2073**

-Ghiasi, V., & Eskandari, S. (2024). Improvement of Alluvial Soils Using Cement Injection Method. *Road*, 32(118), 209-232.

**doi: 10.22034/road.2022.323689.2016**

-Ghiasi, V., & Zakavi, I. (2023). Geosynthetics of Stone Columns- A Review. *Road*, 31(117), 143-170.

**doi: 10.22034/road.2022.333550.2033**

-Ghiasi, V., Haghtalab Joraghani, M., & Rashno, S. (2023). An Overview of Chemical Soil Stabilization Methods. *Road*, 31(116), 151-166.

**doi: 10.22034/road.2022.312705.1988**

-Nicholson PG, Kashyap V., Fujii CF. (1994). Lime and fly ash admixture improvement of tropical Hawaiian soils. *Transp Res Rec*.1440:71

-Sherwood, P. T. Soil Stabilisation with Cement and Lime. (1993). State-of-the-Art Review, HMSO, LondonUK.

-Sezer A., Inan G, Yilmaz HR, Ramyar K. Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay. *Build Environ*2006, 41.

-Hausmann, M.R. (1990). Engineering Principles of Ground Modification. McGraw.

-Hill. Book. Inc. Yazici, V., (2004). Stabilization of Expansive Clays Using Granulated Blast Furnace Slag (GBFS).

-GBFS-Lime Combinations and GBFS Cement.

-Rajasekaran, G., (2005). Sulphate Attack and Ettringite Formation in the Lime and Cement Stabilized Marine Clays. *Ocean Engineering*, Vol. 32.

-Hausmann, M.R., (1990). Engineering Principles of Ground Modification. McGraw-Hill. Book. Inc. ASTM C618, D422, D421, D4318, D2166 & BS 3892.

-ASTM D618, (2021). Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing.

-TEAS. Activity report. Ankara; [in Turkish].

-Chu SC, Kao HS. A study of engineering properties of a clay modified by fly ash and slag. In: SharpKD, editor. Fly ash for soil improvement-geotechnical special publication. New York. ASCE.

-Inan G, Sezer A. A review on soil stabilization techniques and materials used. *MBGAK proceedings. P.* [in Turkish].

-Senol A, Bin-Shafique MdS, Edil TB, Benson CH. Use of class C fly ash for stabilization of soft subgrade. *ACE Proceedings*.

-Turner JP. Evaluation of western coal fly ashes for stabilization of low volume roads. In: Wasemiller MA, Hoddinott B, editors. Testing soils mixed with waste or recycled materials. *ASTM STP*.

-Kaniraj S, Havanagi VG. Compressive strength of cement stabilized fly ash-soil mixtures. *Cement and Concrete Research*.

-Acosta, H. Edil, T., and Benson, C., (2003). Soil stabilization and drying using fly ashGeoengineering Rep.No.03-03, Dept. of civil and environmental engineering, univ. of wisconsin- madison, *Madison*, wis.

-Bell, F.G., (1988). Stabilization and treatment of clay soils with lime, part 1, Basic principles, *Ground Engineering*, Vol.21, 10- 15.

-Cokca, E. (2001). Use of class c fly ashes for the stabilization of an expansive soil. *J. geotech. Geoenviron. Eng.* 127, 7, 568-573.

-Mackennon, JT. (1994). Method for stabilizing clay bearing soils by addition of silica and lim international application published under the patent cooeration treaty, *publication Number: wo 94/06884*.

-Ghiasi, V., & madah, S. (2022). Investigation of increasing shear strength of dispersive clays using additives. *Road*.

**doi: 10.22034/road.2022.324512.2023**

-Ghiasi, V., & Tavagho Hamedani, H. (2022). A review of soil improvement with waste and recycled materials and its impact on soil parameters. *Road*.

**doi: 10.22034/road.2022.324228.2019**

- Ghiasi, V., & Molaei Tari, P. (2022). Geotechnical design of landfills and solutions for their construction in different soils. *Road*.

**doi: 10.22034/road.2022.324326.2020**

- ASTM D422, (2017). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.
- ASTM D421, (2017). Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size (Standard Withdrawn).
- ASTM D4318, (2017). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.
- ASTM D4218, (2017). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)).
- BS 3892-1 Pulverized-fuel ash. (1997). Specification for pulverized-fuel ash for use with Portland cement (Withdrawn).
- ASTM D1140, (2017). Standard Test Methods for Amount of Material in Soils Finer Than the No. 200 (75-um) Sieve.
- ASTM D4546-96, (2017). Standard Test Methods for Amount of Material in Soils Finer Than the No. 200 (75-um) Sieve.
- ASTM D3080-98, (2017). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.
- ASTM D3080, (2004). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained.
- ASTM D2166, (2000). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive soil.
- ASTM C618, (2015). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.

# An Overview of the Use of Fly Ash for Soil Stabilization

*Vahed Ghiasi, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil and Architecture Engineering,  
Malayer University, Malayer, Iran.*

*Ali Najhdghorbani, B.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Malayer University,  
Malayer, Iran.*

*E-mail: v.ghiasi@malayeru.ac.ir*

Received: June 2024- Accepted: September 2024

## ABSTRACT

The use of waste materials from various factories and industries in the soil to improve engineering properties is one of the new methods in this field. Wind ash is also an essential by-product of coal-fired power plants or from heating the wastes of some factories, which has suitable pozzolanic properties and is used in construction projects for use in concrete and geotechnical projects for soil stabilization. In this review study, a type of fly ash with different chemical properties has been used compared to other studies related to improving soil grain in the central regions of Iran. Density, permeability, and the load-bearing ratio of California (California Bearing Ratio) According to the results, research can be done on samples with different percentages of fly ash with or without lime. Further increase in dry specific gravity is maximized, and this amount is reduced to 10% in the presence of 10% lime. Due to the lower specific gravity of ash than soil, the maximum dry density decreases with increasing ash density. Optimal increases with increasing ash strength adding ash increases the unrestricted compressive strength of soil; there is no significant increase in unconfined compressive strength for more than 28 days. Considerable increase in adhesion over longer times in samples Contains ash with a higher percentage. This effect is possible. Due to the rise of soil adhesion with the pozzolanic reaction of fine ash particles, its hardening effect is related to the presence of free lime with water-soluble ash parts. Modification of the mechanical properties of soil mixed with fly ash or soil alone may depend on the moisture loss of the sample during the recovery period.

**Keywords:** Lime, Fly Ash, Sand, Permeability, California Bearing Ratio