مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
تابستان ۱۳۹۹، جلد سیزدهم، شماره ۲، صفحه ۸۵ تا ۹۵

تأثیر خاکستر بادی و آهک بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ماسه‌ای

میثم بیات*[۱]، سید محمدحسین بحرینیان [۲]

دریافت مقاله: ۹۸/۰۶/۲۳ پذیرش مقاله: ۹۸/۱۰/۲۲

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 زغال‌سنگ 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 جهت تثبیت خاک کاربرد دارد. در این تحقیق، از نوعی خاکستر بادی (Fly ash) با خصوصیات شیمیایی متفاوت نسبت به دیگر مطالعه‌های مرتبط با هدف بهسازی خاک دانه‌ای موجود در مناطق مرکزی ایران استفاده شده است. آزمایش تراکم، نفوذپذیری و نسبت باربری کالیفرنیا (California bearing ratio) 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 به اضافه شدن خاکستر بادی تا ۲۰ درصد در خاک ماسه‌ای بدون آهک، باعث افزایش بیشتری در وزن مخصوص خشک حداکثر می‌شود و این مقدار با وجود ۱۰٪ آهک به مقدار ۱۰٪ کاهش می‌یابد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که مقدار ۲۰٪ خاکستر بادی یک مقدار بهینه جهت تثبیت خاک با یا بدون آهک است بطوریکه بیشترین مقدار نسبت باربری کالیفرنیا در این حدود خاکستر بادی بدست می‌اید. همچنین استفاده از خاکستر بادی رابطه مستقیم با کاهش نفوذپذیری نمونه‌ها دارد. در نهایت بر اساس عکس‌های میکروسکوپی از نمونه‌ها نیز نتایج تفسیر شده است.

کلید واژه‌ها: *خاکستر بادی، آهک، ماسه، نفوذپذیری، نسبت باربری کالیفرنیا*

۱. استادیار، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
* **مسئول مکاتبات** bayat.m@pci.iaun.ac.ir

۱. مقدمه

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 نسبتا 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 صرفه‌تر 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 ... جهت تثبیت انواع مختلف خاک‌ها و بهبود رفتار مکانیکی و خصوصیات فیزیکی آنها را اثبات کرده‌اند (Miller and Azad, 2000; Nalbantoglu and Gucbilmez, 2001; Rao et al., 2001; Aiban et al., 2006; Chun-Yang et al., 2006; Guney et al., 2007; Harichane et al., 2011; Yilmaz and Ozaydin, 2013; Asgari et al., 2015; Suthar and Aggarwal, 2018; Ghadir and Ranjbar, 2018; Yize et al., 2019).

آهک یکی از مواد تثبیت کننده جهت استفاده برای بهبود خواص خاک و به عنوان یکی از مقرون به صرفه ترین 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 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 معمولا 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: ترابی کاوه و حیدری، ۱۳۹۸). تکنولوژی بهینه سازی خاک با آهک به طور گسترده با کاربری‌های زیست محیطی و ژئوتکنیکی مانند جذب آب خاک‌های آلوده مرطوب، پایدار سازی شیب‌ها، درز بندی 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 مهدی‌زاده، ۱۳۹۳).

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 هزینه-های اجرایی و دفع مواد ضایعاتی، مورد مطالعه قرار گیرد (Pitroda, 2013) این مسئله مهم مهندسین و محققین 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 مشکل‌زا نباشند و همچنین از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشند.

عملیات تثبیت شیمیایی خاک با استفاده از آهک یا سیمان 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 نسبتا گران قیمت، می‌توان از مواد پوزولانی دیگر مانند خاکستر بادی استفاده نمود. استفاده از این ماده باعث کاهش تأثیرات مخرب سولفات‌ها (مثل 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 می-توان به سه مورد زیر اشاره نمود:

۱- خاکستر بادی که از سوختن زباله و یا سایر مواد ضایعاتی در کوره (در دمای بین ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی-

گراد) به دست می‌آید. خصوصیات پوزولانی این مواد با آسیاب شدن نیز بیشتر می‌گردد. این نوع خاکستر بادی دارای مقدار زیادی SiO2 است (فروزش و قربانی، ۱۳۹۰).

۲- خاکستر بادی به جا مانده از احتراق زغال‌سنگ پودر شده در کوره که از محصولات نیروگاه‌ها با سوخت زغال-سنگ است. یک گرد بسیار ریزدانه 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).

۳- 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، واکنش‌پذیری 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 محدودیت 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. کومار و همکاران (Kumar et al., 2016) عملکرد ترکیب پودر سنگ آهک و خاکستر بادی را برای تثبیت سازی خاک متورم شونده برای استفاده در کف‌سازی در پیاده‌رو مورد پژوهش قرار داده‌اند. در این پژوهش نمونه‌ها دارای ۹٪ پودر سنگ آهک بوده و همچنین میزان خاکستر بادی در نمونه‌ها از صفر تا بیست درصد متغیر در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که هرچه درصد خاکستر بادی در نمونه‌ها افزایش یابد، میزان رطوبت بهینه افزایش و وزن مخصوص خشک حداکثر نمونه-ها نیز کاهش می‌یابد. از طرف دیگر افزایش خاکستر بادی همواره میزان نفوذپذیری نمونه‌ها را کاهش می‌دهد. 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. راجو و همکاران (Raju et al., 2015) به بررسی تأثیر خاکستر بادی بر روی خاک متورم شونده پرداختند و خصوصیاتی مانند شاخص تورم، مقاومت فشاری محصور نشده و CBR را برای نمونه‌ها با درصدهای مختلف خاکستر بادی (۰٪، ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪) مورد ارزیابی قرار دادند که بر اساس نتایج بدست آمده مشخص گردید که شاخص تورم با افزایش خاکستر بادی تا ۲۰٪ کاهش می‌یابد و بعد از آن افزایش خاکستز بادی، شاخص تورم را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر مقاومت فشاری محصور نشده تا ۱۰٪ خاکستر بادی روند کاهشی و سپس تا ۲۰٪ روند افزایشی را نشان می‌دهد. نمودار مقادیر آزمایش CBR نیز دارای در ۲۰٪ خاکستر بادی به حالت اوج خود رسیده است. تکهلماتوم و همکاران (Takhelmatum et al., 2013) تأثیر خاکستر بادی با میزان آسیاب شدگی متفاوت (بصورت درشت‌تر 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٪ خاکستر بادی ریز بعنوان بهینه‌ترین حالت بدست آمد. بس (Bose, 2012) اثر خاکستر

بادی بر روی رفتار مکانیکی خاک رس را مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش خاکستر بادی، از میزان خصوصیات شکل پذیری خاک رسی و شاخص تورم کاسته خواهد شد و همچنین حداکثر وزن مخصوص خشک در نمونه‌ها تا ۲۰٪ خاکستر بادی روند افزایشی با افزایش خاکستر بادی داشته و بعد از آن کاهش می‌یابد. حداکثر مقاومت فشاری محصور نشده نیز در نمونه‌ها با ۲۰٪ خاکستر بادی بدست آمده و برای مقادیر بیشتر خاکستر بادی، مقاومت فشاری روند کاهشی دارد. ساهو (Sahu, 2001) و کومار و همکاران (Kumar et al., 2014) با بررسی‌های آزمایشگاهی نشان داد که استفاده از خاکستر بادی جهت تثبیت خاک باعث افزایش حداکثر وزن مخصوص خشک، کاهش میزان رطوبت بهینه و همچنین کاهش در میزان نفوذپذیری خواهد شد.

کیم (Kim, 2005) به بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی مخلوط خاکستر بادی برای استفاده در خاکریزهای 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 ثبیت خاک در محل دارای صرفه اقتصادی است.

فرخی و همکاران (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 ٦٪ آهک را با درصدهای مختلفی از خاکستر بادی مخلوط شده و به همراه خاک تحت آزمایش CBR قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که ٦٪ آهک به همراه ۳٪ خاکستر بادی به شکل مؤثری می‌تواند به بهبود خاک رس بستر کمک کرده و باعث ایجاد واکنش پوزولانی می‌گردد.

نوروزی و همکاران (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 عمدتا 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.

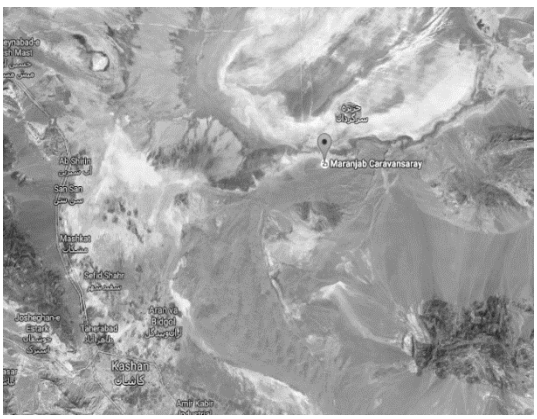
با توجه به موارد اشاره شده در بالا و مقادیر بهینه متفاوت بدست آمده برای مقدار خاکستر بادی و آهک یا سیمان مورد استفاده در خاک‌های مختلف، می‌توان به این نتیجه رسید که برای هر نوع، بایستی مقادیر بهینه خاکستر بادی به اضافه سیمان یا اهک با آزمایش‌های آزمایشگاهی تعیین شود. به همین دلیل در این تحقیق، مقدار بهینه خاکستر بادی با یا بدون آهک برای منطقه‌ای در شمال اصفهان از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی با مدت زمان عمل آوری متفاوت بدست آمده است. در نهایت نیز از طریق عکسهای میکروسکوپی، نتایج آزمایش‌ها تفسیر شده است.

۲. مواد و روش‌ها

برای تحقیق حاضر از یک نوع ماسه با دانه‌بندی تقریبا 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، ١٤ و ۲۸ روزه) انجام شده است.

۲-۱. مشخصات ماسه و خاکستر بادی

خاک تهیه شده برای این پژوهش یک نمونه از ماسه با دانه-بندی 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 ٥٤ 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 کوهای پیر حاجات و اُزبک کوه و از جنوب به محور ارتباطی خور- طبس محدود می‌گردد. با توجه به کویری بودن منطقه، ۱۹۰۰ کیلومتر مربع (۳۱٪ 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 داده‌شده است که طبق طبقه بندی یونیفاید (*USCS*) خاک مورد استفاده ماسه بد دانه‌بندی شده (*SP*) است.

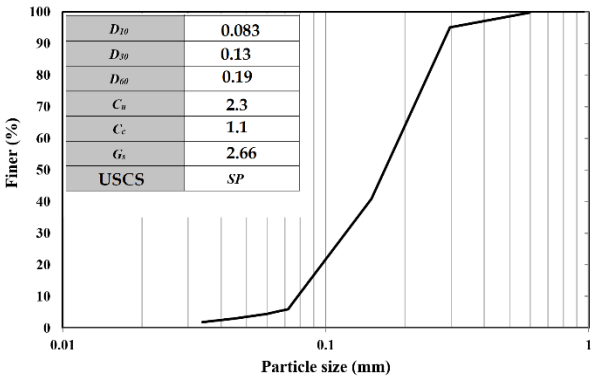


شکل۱. عکس ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه

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

شکل۲. محل برداشت ماسه مورد استفاده در آزمایش‌ها

در این پژوهش از خاکستر بادی با خاصیت سیمانی شدن زیاد که به صورت فله‌ای در کیسه‌های ۲۵ کیلویی از شرکت شهرک بتن اصفهان خریداری و استفاده گردیده است که دارای کد MZYLG-AB است. مشخصات شیمیایی خاکستر بادی مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل۳– منحنی دانه‌بندی ماسه مورد استفاده

جدول ۱. مشخصات شیمیایی خاکستر بادی

Composition	Value (%)
SiO_2	94-95
Al_2O_3	1-2
CaO	0.6
Na_2O	0.32
K_2O	0.12
Fe_2O_3	2-3
SO_3	0.12

۳. برنامه آزمایش‌ها

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، ٤۰ درصد برای میزان خاکستر بادی در ماسه درنظر گرفته شده اند و نیز عمل‌آوری نمونه‌ها در مدت زمان‌های ۲، ۷، ١٤ و ۲۸ نیز مورد بررسی گرفته است.

٤. 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.

٤-١. آزمایش تراکم پروکتور اصلاح شده

در این تحقیق، آزمایش تراکم پروکتور اصلاح شده با استفاده از چکشی به وزن ۱۰ پوند و ارتفاع سقوط ۱۸ اینچ و تعداد ۲۵ ضربه در پنج لایه تراکم، در قالبی به قطر ٤ اینچ استفاده انجام شده است. آزمایش تراکم پروکتور اصلاح شده بر روی نمونه‌های حاوی ماسه و خاکستر بادی با درصدهای مختلف بدون آهک و همچنین با ۱۰٪ آهک انجام شد که نتایج آنها برای درصدهای ۲، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ٤۰ درصد از خاکستر بادی در جدول (۲) و (۳) ارائه شده است.

جدول ۲. نتایج آزمایش تراکم اصلاح شده ماسه همراه با درصدهای مختلف خاکستر بادی بدون آهک

$\gamma_{d-\max}\left(gr/cm^3\right)$	ω_{opt} (%)	Fly ash (%)
1.69	13.5	0
1.69	13.7	2
1.71	14.3	10
1.75	14.5	20
1.74	14.8	30
1.72	15	40

نتایج نشان می‌دهد که افزایش خاکستر بادی مقدار درصد رطوبت بهینه، ω_{opt}، را افزایش داده ولی مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر، $\gamma_{d-\max}$، با افزایش خاکستر بادی تا ۲۰٪ برای حالت بدون آهک و تا ۱۰٪ برای حالت وجود ۱۰٪ آهک افزایش یافته و بعد از آن افزایش خاکستر بادی به ماسه میزبان، مقدار آن را کاهش داده است. بعبارت دیگر اضافه کردن۲۰٪ خاکستر بادی بدون آهک و ۱۰٪ خاکستر بادی بهمراه ۱۰٪ آهک موجب بیشترین مقدار $\gamma_{d-\max}$ شده است. مقایسه دو جدول (۲) و (۳) با یکدیگر نشان می‌دهد که وجود ۱۰٪ آهک در خاک میزبان، مقدار رطوبت بهینه در برخی موارد کمی افزایش داده است.

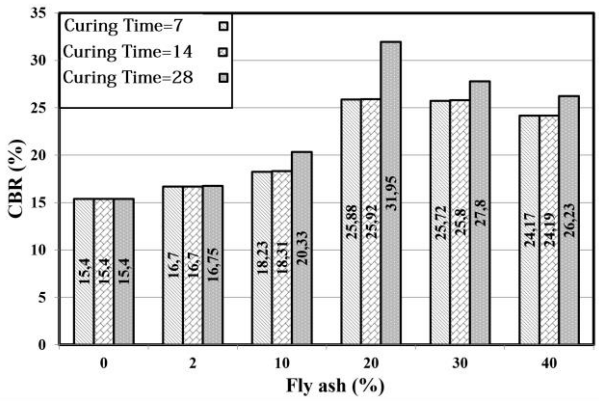
جدول ۳. نتایج آزمایش تراکم اصلاح شده ماسه همراه با درصدهای مختلف خاکستر بادی و ۱۰٪ آهک

$\gamma_{d-\max}\left(gr/cm^3\right)$	ω_{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
1.67	15.3	40

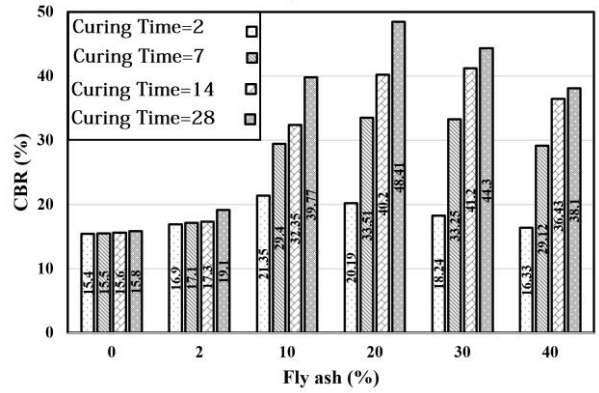
٤-٢. آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)

برای انجام آزمایش CBR، ابتدا خاک با رطوبت بهینه را در قالبی با قطر ٦ 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 *mm/min* 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 میلی‌متراز 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 ماسه‌ای مخلوط شده است، در زمان‌های عمل آوری ۷، ١٤ و ۲۸ روز در شکل (٤) ارائه شده است. همانطور که در شکل ٤ دیده می-شود، مدت زمان عمل آوری در مدت زمانهای بیشر یعنی ۲۸

روزه اثر محسوستری دارد. در صورتی که اختلاف نتایج بین روزهای عمل آوری ۷ و ١٤ روزه ناچیز است. از طرف دیگر بیشترین مقدار CBR برای یک مدت زمان عمل آوری معین، مربوط به نمونه‌های ۲۰٪ خاکستر بادی است. بعبارت دیگر، مقدار CBR با افزایش خاکستر بادی تا ۲۰٪ روند افزایشی و بعد از آن با اضافه شدن بیشتر خاکستر بادی، مقدار آن کاهش می‌یابد، اگر چه طبق نتایج آزمایش تراکم بیشترین مقدار $\gamma_{d-\max}$ مربوط به نمونه‌های حاوی ۱۰٪ خاکستر بادی است. همچنین این آزمایش برای نمونه‌های ترکیبی درصدهای مختلف خاکستر بادی و آهک به مقدار ۱۰٪ به عنوان مواد افزودنی به خاک نیز انجام شد که نتایج آن نیز در شکل (۵) آورده شده است.

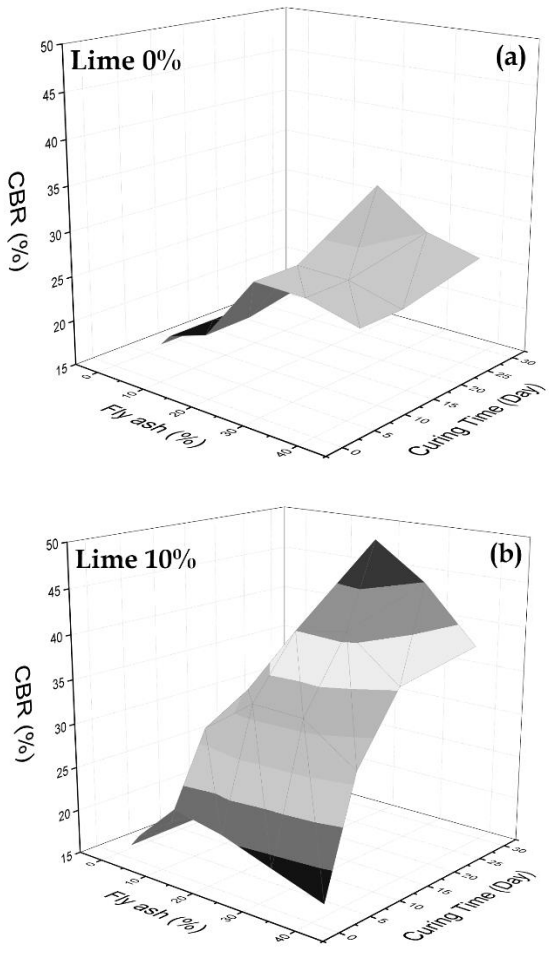


شکل ٤. نتایج CBR برای درصدهای مختلف خاکستر بادی بدون آهک در زمان‌های عمل آوری مختلف



شکل ۵. نتایج CBR برای درصدهای مختلف خاکستر بادی با ۱۰٪ آهک در زمان‌های عمل آوری مختلف

با مقایسه شکل‌های (٤) و (۵)، می‌توان به این نتیجه رسید که مدت زمان عمل آوری 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 معادل ۲۰٪ نسبت به سایر نمونه‌ها با درصدهای دیگر خاکستر بادی محسوستر است. در اینجا نیز برای یک مدت زمان عمل آوری معین، نمونه‌ها با ۲۰٪ خاکستر بادی بیشترین مقدار CBR را کسب نموده‌اند.



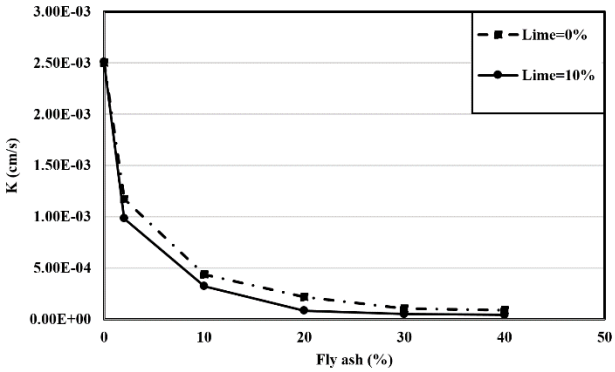
شکل ٦. تغییرات CBR بر حسب مقدار خاکستر بادی و زمان عمل آوری برای نمونه‌ها با (a) ۰٪ آهک (b) ۱۰٪ آهک

نتایج هر دو گروه آزمایش‌ها (با اهک و بدون آهک) در شکل (٦) بصورت سه بعدی نشان داده شده است. با توجه به شیب پوش رسم شده می‌توان اهمیت زمان عمل آوری در نمونه-

های 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٪ است.

۳-٤. آزمایش نفوذپذیری

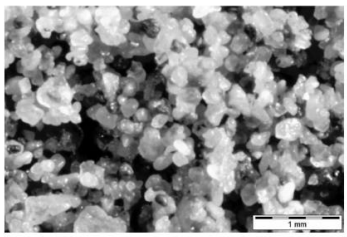
در این تحقیق از آزمایش نفوذپذیری با بار افتان بر روی نمونه‌های ماسه با درصدهای مختلف از خاکستر بادی و آهک برای یافتن ضریب نفوذپذیری استفاده شده است. آزمایش نفوذپذیری برای تعیین تأثیر خاکستر بادی بر روی میزان نفوذپذیری در نمونه‌های ماسه تثبیت شده با این مواد انجام گرفته است. در این آزمایش مخلوط خاک ماسه‌ای و افزودنی (خاکستر بادی یا مخلوط خاکستر بادی و آهک) در قالب‌های مخصوص این آزمایش آماده شده است. نمونه‌های تثبیت شده با پنج درصدِ وزنی خاکستر بادی (۲٪، ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ٤۰٪) در زمان عمل‌آوری 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

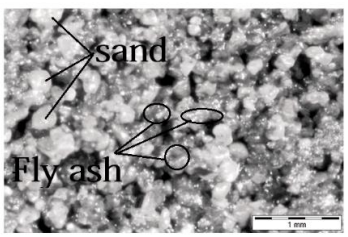
با بررسی نتایج نشان داده دشه در شکل ۷ می‌توان به نقش مهم خاکستر بادی در کاهش نفوذپذیری نمونه‌ها پی برد. هرچه که به مقدار خاکستر بادی اضافه شده است، نفوذپذیری نمونه نیز کاهش یافته است. این مسئله در نمونه‌های حاوی آهک نیز صادق است. با مقایسه دو نمودار مربوط به نمونه-های تثبیت شده با آهک و خاکستر بادی و 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 ناچیر است.

٤-٤. بررسی بافت اولیه نمونه‌ها از طریق عکس‌های میکروسکوپی

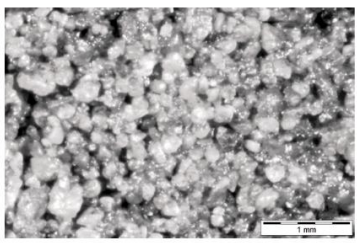


Pure Sand

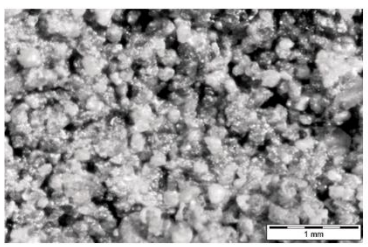
شکل ۸ عکس میکروسکوپی از ماسه خالص



Lime=0%, Fly ash=10%



Lime=0%, Fly ash=20%

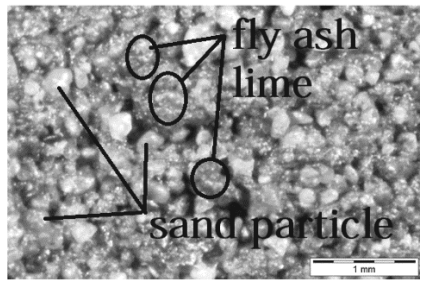


Lime=0%, Fly ash=40%

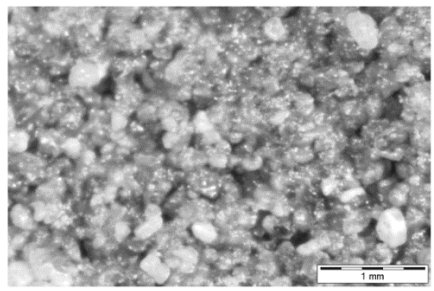
شکل ۹. عکس میکروسکوپی از ماسه خالص مخلوط با خاکستر بادی بدون آهک

جهت بررسی دقیق‌تر اتفاق رخ داده در نمونه‌ها، عکس میکروسکوپی برای نمونه‌های دارای درصدهای مختلف از

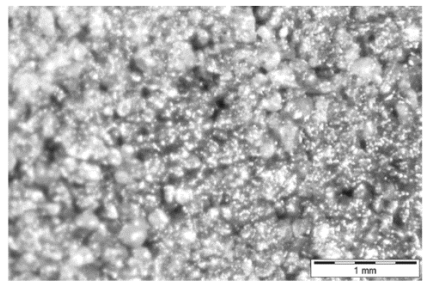
خاکستر بادی و همچنین خاکستر بادی به همراه آهک تهیه شده است. عکس‌ها از نمونه‌های عمل آوری شده در ۲۸ روز با استفاده از یک دستگاه استریو میکروسکوپ تهیه شده است. با بررسی عکس‌ها می‌توان نتیجه گرفت که خاکستر بادی ابتدا فضاهای خالی ماسه را پر نموده و پس از آن مانع تماس مناسب دانه‌های ماسه بر روی یکدیگر می‌گردد و بعبارت دیگر دانه‌های ریزتر 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. از طرف دیگر ترکیب آهک و خاکستر بادی واکنش مناسب‌تری را ایجاد کرده است.



Lime=10%, Fly ash=10%



Lime=10%, Fly ash=20%



Lime=10%, Fly ash=40%

شکل ۱۰. عکس میکروسکوپی از ماسه خالص مخلوط با خاکستر بادی همراه با ۱۰٪ آهک

با مقایسه عکس‌های نمونه‌های حاوی آهک و 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 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، بطوریکه ذرات ریز ماسه بدلیل پیوند ایجاد شده بینشان رفتاری شبیه یک خاک درشت دانه را از خود نشان دهند.

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق مجموعه‌ای از آزمایش‌های تراکم پروکتور اصلاح شده، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) 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 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:

۱- بر اساس نتایج آزمایش تراکم پروکتور تأثیر پذیری 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، ω_{opt}، را افزایش داده ولی مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر، $\gamma_{d-\max}$، با افزایش خاکستر بادی تا ۲۰٪ برای حالت بدون آهک و تا ۱۰٪ برای حالت وجود ۱۰٪ آهک افزایش یافته و بعد از آن افزایش خاکستر بادی به ماسه میزبان، مقدار آن را کاهش داده است. بعبارت دیگر اضافه کردن ۲۰٪ خاکستر بادی بدون آهک و ۱۰٪ خاکستر بادی بهمراه ۱۰٪ آهک موجب بیشترین مقدار $\gamma_{d-\max}$ شده است.

۲- نتایج آزمایش نسبت باربری کالفرنیا نشان می‌دهد که اضافه کردن خاکستر بادی تا ۲۰ درصد به ماسه باعث افزایش عدد 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 عمل آوری تأثیر چندانی بر افزایش CBR نمونه‌های حاوی خاکستر بادی تنها ندارد و در صورت اضافه نمودن آهک به نمونه‌های دارای خاکستر بادی، CBR نیز افزایش می‌یابد و شیب این افزایش بدلیل افزایش خاکستر بادی تا ۲۰٪ و همچنین مدت زمان عمل‌آوری بیشتر از حالت بدون آهک است.

۳- بر اساس آزمایش‌های نفوذپذیری انجام 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 اهک 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.

منابع

ترابی کاوه, مهدی, حیدری, علی. ارزیابی ویژگیهای مهندسی خاک های مارنی تثبیت شده توسط آهک و نانوکامپوزیت (مطالعه موردی: خاک مارنی منطقه سنقر) .نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، ۱۳۹۸.

روشندل، "بررسی روش‌های مختلف تثبیت خاک و مصالح سنگی روسازی راه"، ژئوتکنیک و مقاومت مصالح، شماره ۸۳، ۱۳۷۸.

نجفی، ا، مهدی‌زاده، ح، "بررسی و مطالعه مواد شیمیایی تثبیت کننده خاک‌های نرم"، اولین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی تهران، ایران، آذر ۱۳۹۳.

Aiban, SAa, HMa Al-Ahmadi, IMb Asi, ZUa Siddique, and O. S. B. Al-Amoudi. "Effect of geotextile and cement on the performance of sabkha subgrade." Building and Environment41, no. 6 ,2006, 807-820.

Asgari, M. R., A. Baghebanzadeh Dezfuli, and M. Bayat. "Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with cement/lime." Arabian Journal of Geosciences 8, no. 3 ,2015, 1439-1452.

Amu, Olugbenga O., Oluwole Fakunle Bamisaye, and Iyiola Akanmu Komolafe. "The suitability and lime stabilization requirement of some lateritic soil samples as pavement." Int. J. Pure Appl. Sci. Technol 2, no. 1, 2011, 29-46.

Diamond, Sidney, and Earl B. Kinter. "Mechanisms of soil-lime stabilization." Highway Research Record 92, 1965, 83-102.

Ghadir, Pooria, and Navid Ranjbar. "Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement." Construction and Building Materials 188, 2018, 361-371.

Guney, Yucel, Dursun Sari, Murat Cetin, and Mustafa Tuncan. "Impact of cyclic wetting–drying on swelling behavior of lime-stabilized soil." Building and Environment 42, no. 2, 2007, 681-688.

Harichane, Khelifa, Mohamed Ghrici, and Said Kenai. "Effect of curing time on shear strength of cohesive soils stabilized with combination of lime and natural pozzolana." 2011, 90-96.

Kaniraj, Shenbaga R., and Vasant G. Havanagi. "Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced fly ash-soil mixtures." Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering127, no. 7, 2001, 574-584.

Kumpiene, Jurate, Anders Lagerkvist, and Christian Maurice. "Stabilization of Pb-and Cu-contaminated soil using coal fly ash and peat." Environmental pollution 145, no. 1, 2007, 365-373.

Miller, Gerald A., and Shahriar Azad. "Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust." Construction and building materials 14, no. 2, 2000, 89-97.

Nalbantoglu, Zalihe, and Emin Gucbilmez. "Improvement of calcareous expansive soils in semi-arid environments." Journal of arid environments 47, no. 4, 2001, 453-463.

Pan, Yize, Joseph Rossabi, Chonggen Pan, and Xinyu Xie. "Stabilization/solidification characteristics of organic clay contaminated by lead when using cement." Journal of hazardous materials 36, 2019, 132-139.

Pitroda, J, "A study of utilization aspect of stone waste in Indian context", volume 2, 2013.

Rao, S. M., B. V. V. Reddy, and M. Muttharam. "The impact of cyclic wetting and drying on the swelling behaviour of stabilized expansive soils." Engineering geology 60, no. 1-4, 2001, 223-233.

Shen, Weiguo, Mingkai Zhou, and Qinglin Zhao. "Study on lime–fly ash–phosphogypsum binder." Construction and Building Materials 21, no. 7, 2007, 1480-1485.

Suthar, Manju, and Praveen Aggarwal. "Bearing ratio and leachate analysis of pond ash stabilized with lime and lime sludge." Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 10, no. 4, 2018, 769-777.

Yeheyis, Muluken B., Julie Q. Shang, and Ernest K. Yanful. "Characterization and environmental evaluation of Atikokan coal fly ash for environmental applications." Journal of environmental engineering and science 7, no. 5, 2008, 481-498.

Yilmaz, Yuksel, and Vehbi Ozaydin. "Compaction and shear strength characteristics of colemanite ore waste modified active belite cement stabilized high plasticity soils." Engineering Geology 155, 2013, 45-53.

Yin, Chun-Yang, Hilmi Bin Mahmud, and Md Ghazaly Shaaban. "Stabilization/solidification of lead-contaminated soil using cement and rice husk ash." Journal of hazardous materials 137, no. 3, 2006, 1758-1764.