

مطالعه آزمایشگاهی اثر اضافه شدن ضایعات کارخانه سنگ بر مقاومت خاک تثبیت شده با آهک و سیمان در برابر چرخه های ذوب و یخبندان

محسن صالحی^۱، میثم بیات^{۲*}، محسن سعادت^۳، مسعود نصری^۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۱۷

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۱۵

چکیده

با وجود تلاش‌های بسیاری که طی چند دهه اخیر برای کاهش تولید پسماندهای صنعتی و بهبود بهره‌وری از سوی بخش صنعت و سازمان‌های زیست محیطی انجام گرفته است، کاهش پسماندهای صنعتی کماکان پیچیده و پرهزینه هستند. یکی از روشهای مناسب با هدف کاهش هزینه و جایگزینی این نوع از پسماندها، مصرف انواع مختلف آن به عنوان افزودنی در صنعت ساخت و ساز در پروژه‌های عمرانی است. در این مقاله مقادیر وزن مخصوص خشک ماکزیمم، رطوبت بهینه و مقاومت برشی نمونه‌های تثبیت شده خاک ماسه لای‌دار بهسازی شده با ضایعات خرده سنگ حاصل از فعالیت صنایع سنگبری، مورد بررسی قرار گرفته است. اثر مقدار خرده سنگ، سیمان، آهک، زمان عمل آوری و تعداد سیکل‌های ذوب و یخبندان بعنوان متغیرهای اصلی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌های پراکتور اصلاح شده نشان می‌دهد که وزن مخصوص خشک ماکزیمم با افزایش خرده سنگ، سیمان یا آهک روند افزایشی دارد و همچنین رطوبت بهینه با افزایش خرده سنگ کاهش چشم‌گیری پیدا می‌کند. نتایج آزمایش CBR نشان می‌دهد که در تمامی نمونه‌ها، افزایش مدت زمان عمل آوری باعث افزایش چشم‌گیری در مقادیر CBR شده است. افزایش مقدار خرده سنگ در نمونه‌های تثبیت شده با آهک و سیمان باعث افزایش CBR شده است. افزایش مقادیر سیمان یا آهک در نمونه‌های تثبیت شده با مقادیر یکسانی از خرده سنگ در یک مدت زمان عمل آوری خاص، باعث افزایش مقاومت شده است. مقایسه نتایج بین نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و آهک نشان می‌دهد که نمونه‌های تثبیت شده با سیمان مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های تثبیت شده با آهک در شرایط یکسان دارد. نتایج آزمایش‌های ذوب و یخبندان نیز نشان می‌دهد که افزایش تعداد سیکل‌های ذوب و یخبندان موجب کاهش CBR نمونه‌های تثبیت شده با آهک و سیمان می‌شود. اثر تعداد سیکل‌های ذوب و یخبندان بر کاهش مقاومت نمونه‌ها با افزایش مقدار خرده سنگ، چشمگیرتر است.

کلید واژه‌ها: ماسه لای‌دار، خرده سنگ، تثبیت، سیمان، آهک، CBR.

۱. دانشجوی دکتری گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲. عضو هیات علمی گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران bayat.m@pci.iaun.ac.ir

۳. عضو هیات علمی گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۴. عضو هیات علمی گروه عمران، واحد دولت آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، دولت آباد

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

Hasanzadehshooiili, 2018; Ghadir and Ranjbar, 2018; Saadat and Bayat, 2019; Saygili and Dayan, 2019; Sukmak et al., 2019; Liu et al., 2019; Aryal and Kolay, 2020).

از طرف دیگر، در مناطقی که در فصل زمستان به دلیل کاهش دمای محیط، یخبندان در سطح و درون زمین اتفاق می‌افتد، خاک طبیعی یا خاک تثبیت شده در معرض چرخه‌های ذوب و یخ تکرار شونده در طی سال‌ها قرار می‌گیرد که ممکن است بافت خاک را تغییر دهد. مطالعه‌های گذشته نشان می‌دهد که ساختار، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک‌های تثبیت شده، تحت تأثیر چرخه ذوب و یخبندان، دچار تغییر می‌شود (Shihata and Baghdadi, 2001; Zhang et al., 2016; Elif Orakoglu et al., 2017; Ding et al., 2018; Kravchenko et al., 2018; Saygili and Dayan, 2019; Fan et al., 2019).

با وجود تلاش‌های بسیاری که طی چند دهه اخیر برای کاهش تولید پسماندهای صنعتی و بهبود بهره‌وری از سوی بخش صنعت و سازمان‌های زیست محیطی انجام گرفته است، روش‌های کاهش پسماندهای صنعتی کماکان پیچیده و پرهزینه هستند. یکی از موارد جایگزین با هدف کاهش هزینه و جایگزینی مناسب پسماندها، مصرف انواع مختلف پسماندهای صنعتی به عنوان مواد جایگزین برای صنعت ساخت و ساز در پروژه‌های عمرانی است (Rajput, 2018). به طور کلی، ۲۷ کشور در دنیا تولید کننده عمده انواع سنگ‌های ساختمانی هستند که از جمله کشورهای برتر در این زمینه، چین، ترکیه، هند، ایران و ایتالیا هستند که ۷۲ درصد از کل تولید دنیا را به خود اختصاص داده‌اند (Chouhan et al., 2020). در اثر تولید این سنگ‌ها مقادیر زیادی پسماند سنگی، شامل پودر سنگ، سنگ‌های ریز خرد شده، قطعات سنگی بزرگ و کوچک ایجاد می‌گردد (Chouhan et al., 2020). بطوریکه امروزه دفع زباله‌های کارخانه سنگ به یک مشکل جهانی تبدیل شده است که برای سلامتی انسان نیز خطرناک است و باعث ایجاد مشکلات زیست محیطی متعددی می‌شود (Tabatabaei and Mohammadi, 2013). شکل شماره (۱) نمایی از خطرات و آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از رها سازی این ضایعات در طبیعت را نشان می‌دهد که باعث بروز مشکلات زیادی در سلامت محیط زیست اطراف این نواحی صنعتی می‌گردد.

از گذشته تا به امروز، ساخت و ساز پروژه‌های مهندسی روی لایه‌های خاک ضعیف یا نرم برای مهندسین بسیار چالش برانگیز بوده است و به دلیل نشست‌های نامتقارن و خصوصیات مقاومتی ضعیف، مشکلات اساسی ایجاد کرده است (Al Adili et al., 2012). مفهوم تثبیت خاک به صورت درجا و با استفاده از افزودنی‌های مختلف، از مدت‌ها قبل از توسعه جوامع بشری بدلیل کمبود بستر مناسب جهت انجام فعالیت‌های عمرانی وجود داشته است. بعنوان مثال اسناد تاریخی نشان می‌دهد که رومی‌ها برای بهبود قابلیت سرویس دهی مسیرهای تردد، خاک را با پودر سنگ آهک بهسازی می‌کردند (Ellaby, 2010). از تکنیک‌های مختلف بهسازی خاک می‌توان به استفاده از الیاف طبیعی یا مصنوعی، تثبیت با سیمان، آهک و پوزولان اشاره کرد. انتخاب و اثربخشی روش بهبود خاک به نوع خاک و شرایط پروژه بستگی دارد. با این حال، درک رفتارهای مکانیکی خاک بهسازی شده بر اساس مشاهدات تجربی، یک پارامتر مهم برای تعیین روش بهسازی خاک است. در تحقیق‌های گذشته همچنین از انواع مواد پوزولانی از قبیل خاکستر بادی، متاکائولین، خاکستر پوسته برنج به عنوان مواد افزودنی همراه با آهک و سیمان برای تثبیت خاک استفاده شده است که به حفاظت از محیط زیست نیز کمک می‌کند (Pandian and Krishna, 2003; Al-Rawas et al., 2005; Beeghly and Schrock, 2009; Harichane et al., 2011; Hossain and Mol, 2011; Kumar, 2011; Vakili et al., 2013; Stefanidou et al., 2017; Cheng et al., 2018). فرآیند انجام واکنش‌های سیمانی در خاک تثبیت شده با آهک یا سیمان که در دوره عمل آوری صورت می‌پذیرد، با اشغال فضای بین ذرات خاک در اثر ایجاد پیوند سیمانی در محل تماس بین ذرات، منجر به بهبود قابل توجه در خصوصیات مکانیکی خاک می‌شود (Hossain and Mol, 2011). تاکنون محققین با استفاده از مطالعه‌های آزمایشگاهی، رفتار مکانیکی خاک تثبیت شده با سیمان یا آهک را بطور جامع مورد ارزیابی قرار داده‌اند که بیشتر روی مقاومت فشاری تک محوری، نسبت باربری کالیفرنیا، مقاومت کششی و دوام متمرکز بوده است (Bayat et al., 2013; Ojuri et al., 2017; Boz et al., 2018; Cheng et al., 2018; Ghorbani and

درصدهای مختلف پسماند خرده سنگی، سیمان و آهک انجام شده است.

۲. مواد و روش‌ها

در این تحقیق از خاک ماسه لای دار استفاده شده است که از منطقه سگزی واقع در شرق اصفهان جمع‌آوری شده است. خصوصیات فیزیکی و ژئوتکنیکی خاک مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است. منحنی دانه‌بندی خاک و خرده سنگ‌های مورد استفاده در این تحقیق نیز در شکل (۲) ارائه شده است. خرده سنگ مورد استفاده از جنس گرانیت بوده که از پسماند کارخانه‌های سنگ موجود در محل تحقیق، به دست آمده است. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آهک و سیمان نیز در جدول (۲) ارائه شده است. در این تحقیق خاک مورد استفاده با درصدهای مختلفی از سنگدانه با رطوبت طبیعی مخلوط شده (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی خاک) و با استفاده از آهک یا سیمان با نسبت‌های ۰، ۳، ۵ و ۷ درصد و پس از رساندن رطوبت کل مخلوط به نسبت رطوبت بهینه بدست آمده از آزمایش تراکم اصلاح شده، تثبیت شده است. بعد از عمل‌آوری در دوره‌های مختلف (۷، ۱۴، ۲۸ و ۶۰ روز)، آزمایش CBR روی نمونه‌ها انجام شده است. از این آزمایش در طراحی ضخامت لایه‌ها در راهسازی استفاده می‌شود. و هدف از آن تعیین ظرفیت باربری مقطع است. برای هر مقدار از نفوذ سنبه به داخل خاک، نسبت مقدار بار به بار استاندارد برای همان مقدار نفوذ سنبه در نمونه استاندارد شده بنام نسبت باربری کالیفرنیا یا عدد CBR نامیده می‌شود. معمولاً مقدار بار برای نفوذ ۲/۵ میلی‌متر قرائت می‌شود تا به عنوان معیار سنجش قرار گیرد ولی چنانچه در فاصله نفوذ ۲/۵ میلی‌متر تا ۵ میلی‌متر مقادیر بزرگتری از آنچه که برای نفوذ ۲/۵ میلی‌متر بدست آمد، بزرگترین مقدار بدست آمده به عنوان عدد CBR در نظر گرفته می‌شود. اثر تعداد سیکل‌های ذوب و یخبندان نیز بر روی مقاومت نمونه‌های عمل‌آوری شده در ۲۸ روز نیز بررسی شده است. تعداد سیکل‌های ذوب و یخبندان ۵، ۱۰ و ۱۵ سیکل در نظر گرفته شده است. قبل از انجام آزمایش‌های CBR، آزمایش



شکل ۱. تخلیه و رهاسازی باطله‌های صنایع تولید سنگ ساختمانی (در محدوده قبل از پلیس راه اصفهان-تهران)

اکثر مطالعه‌های انجام شده تاکنون بر استفاده از پسماندهای صنعتی در بخش‌های مختلف پروژه‌های عمرانی نظیر تثبیت خاک (Hossain and Mol 2011, Yilmaz et al., 2015; Saygili and Dayan, 2019; Panfilova et al., 2020) بتن (Rana et al., 2017; Rajput, 2018)، بتن پلیمری (Tonet and Gorninski, 2013)، ملات (Singh Chouhan et al. 2019)، بلوک‌های سیمانی (Carvalho et al. 2014)، آجر (Li et al., 2019b; Gavali et al., 2019; Barros et al., 2020) و همچنین بستر جاده (Cabalar et al. 2017) متمرکز بوده است. با وجود این مطالعه‌ها، تاکنون مطالعه‌ای در مورد تاثیر استفاده از پسماند صنایع سنگبری بر رفتار مکانیکی خاک تثبیت شده با آهک و سیمان تحت تاثیر چرخه‌های ذوب و یخبندان ارائه نشده است. اگر چه در مطالعه‌های گذشته، استفاده از پودر پسماند ناشی از فعالیت صنایع سنگبری به همراه آهک برای تثبیت خاک گزارش شده است که نتایج بیانگر افزایش وزن واحد حجم خاک و همچنین کاهش حد روانی و دامنه خمیری خاک رسی بدلیل استفاده از پودر سنگ بوده است (Sivrikaya et al., 2014).

هدف از مطالعه حاضر، بررسی اثر ضایعات خرده سنگ، سیمان، آهک، مدت زمان عمل‌آوری و چرخه‌های ذوب و یخبندان بر خصوصیات فیزیکی و ژئوتکنیکی ماسه لای دار است. آزمایش‌هایی همچون اندازه‌گیری pH، تراکم اصلاح شده‌ی پروکتور و نسبت باربری کالیفرنیا در شرایط رطوبت بهینه یا اشباع با در نظرگیری چرخه‌های ذوب و یخبندان روی نمونه‌هایی با

Property/ composition	Cement	Lime
Specific gravity	3.14	2.33
Specific surface area (m ² /kg)	320	285
CaO (%)	60.4	-
Ca(OH) ₂ (%)	-	96
SiO ₂ (%)	15.9	0.5
Al ₂ O ₃ (%)	9.5	0.2
SO ₃ (%)	6.4	-
Fe ₂ O ₃ (%)	4.1	0.07
MgO (%)	0.9	0.8
K ₂ O (%)	0.7	-
TiO ₂ (%)	0.1	-

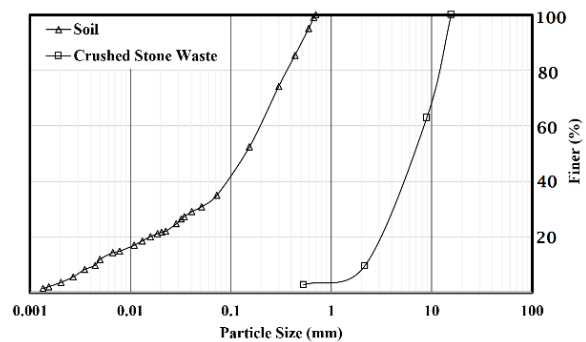
با استفاده از بسته‌بندی مناسب، از کاهش رطوبت نمونه‌ها طی دوره‌های عمل آوری ۷، ۱۴، ۲۸ و ۶۰ روزه جلوگیری شده است. قبل از انجام آزمایش CBR اشباع، نمونه‌ها به مدت ۹۶ ساعت در حوضچه آب قرار داده شده است. جهت انجام آزمایش‌های ذوب و یخبندان نیز نمونه‌ها ۲۸ روزه را برای اشباع شدن در حوضچه آب به مدت ۹۶ ساعت قرار داده شده است. تعداد چرخه‌های ذوب و یخبندان برابر ۵، ۱۰ و ۱۵ سیکل در اینجا انتخاب شده است. مدت زمان و دمای چرخه‌های ذوب و یخبندان برابر با ۱۶ ساعت یخبندان در دمای ۱۰- درجه سانتیگراد و ۸ ساعت ذوب یخ در دمای محیط در نظر گرفته شد.

۳. نتایج و بحث

اثر اضافه شدن آهک و سیمان بر مقدار pH اندازه‌گیری شده در نمونه‌های عمل‌آوری شده ۲۸ روزه در شکل (۳) نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری pH، ۱۰ گرم از خاک تثبیت شده با آهک یا سیمان را درون لوله آزمایشی حاوی ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شده و لوله حاوی نمونه و آب مقطر به مدت یک ساعت قبل از اندازه‌گیری pH، تکان داده شده است. نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری pH نشان می‌دهد که اضافه شدن آهک و سیمان باعث افزایش pH خاک شده است. در یک مقدار ثابت از آهک و سیمان، آهک اثر بیشتری در افزایش pH نسبت به سیمان دارد. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌کنید، حد اشباع نمونه‌ها در حدود ۳ درصد سیمان یا آهک است و بعد از آم افزایش مقدار سیمان و آهک تاثیر ناچیزی بر تغییر pH دارد.

اندازه‌گیری pH و آزمایش پروکتور اصلاح شده روی نمونه‌ها انجام شده است.

جهت آماده سازی نمونه‌ها، ابتدا مقدار لازم از ضایعات سنگ (۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی) به خاک طبیعی اضافه شده و سپس هرکدام با سیمان و آهک مورد نظر به طور جداگانه به نسبت ۰، ۳، ۵ و ۷ وزنی خاک و پس از رساندن رطوبت مخلوط به رطوبت بهینه بدست آمده از نتایج آزمایش تراکم اصلاح شده، بطور کامل مخلوط شده است. در مرحله بعد، مخلوط حاصل، حدود ۱۶ ساعت در یک بسته بندی پلاستیکی قرار داده شد تا رطوبت در آن بطور یکنواخت پخش شده و به تعادل برسد. بعد از آن، نمونه‌های CBR مطابق با ASTM D1883 تهیه شده است.

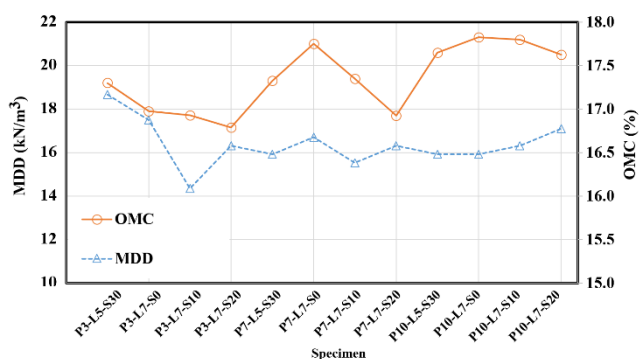


شکل ۲. منحنی دانه‌بندی خاک و ضایعات خرده سنگ مورد مطالعه

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و ژئوتکنیکی خاک مورد استفاده

Characteristics	Values and descriptions
Specific gravity	2.7
Passing No. 200 sieve (%)	35
Plasticity index (%)	NP
Unified Soil Classification System (USCS)	SM
pH	8.80
Optimum water content (%)	18.90
Maximum dry unit weight (kN/m ³)	16.19

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آهک و سیمان

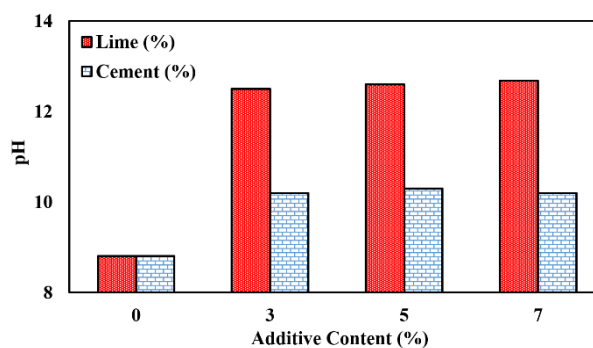


شکل ۴. نتایج آزمایش تراکم اصلاح شده خاک آزمایشی با

افزودنی های خرده سنگ، سیمان و آهک

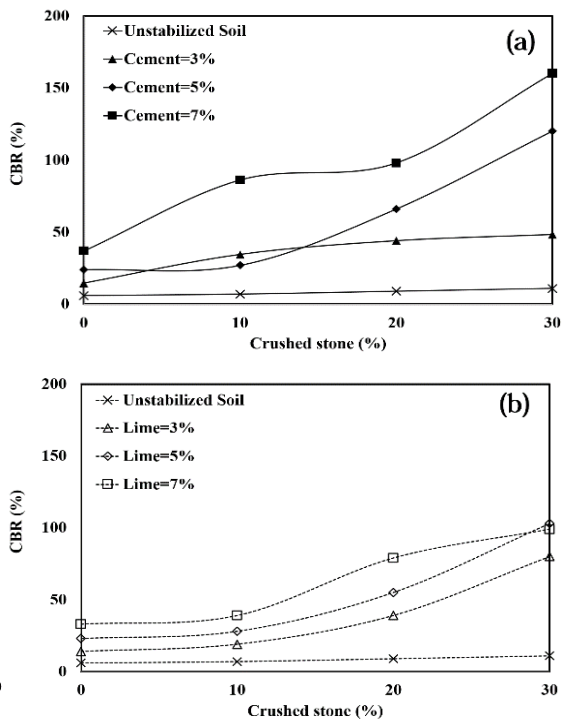
اثر مقدار خرده سنگ بر CBR نمونه های تثبیت شده با سیمان و آهک در روزهای عمل آوری در شکل های (۵) تا (۸) ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که اضافه شدن خرده سنگ به نمونه های تثبیت شده با آهک و سیمان باعث افزایش CBR شده است. از طرف دیگر در یک مقدار ثابت از خرده سنگ، افزایش آهک یا سیمان باعث افزایش مقاومت نمونه ها در تمامی زمان های عمل آوری شده است. اثر آهک یا سیمان بر افزایش مقاومت نمونه ها با افزایش مقدار خرده سنگ چشمگیرتر است، بطوری که افزایش سیمان یا آهک در نمونه های حاوی ۳۰ درصد خرده سنگ موجب افزایش بیشتری در مقاومت نسبت به نمونه های حاوی مقادیر کمتری از خرده سنگ شده است. در یک زمان عمل آوری و مقدار خرده سنگ ثابت افزایش مقاومت نمونه های تثبیت شده با سیمان بیشتر از نمونه های تثبیت شده با آهک است. در تمامی نمونه ها با هر مقدار از خرده سنگ، آهک یا سیمان، افزایش زمان عمل آوری نیز باعث افزایش مقاومت نمونه ها شده است. اضافه شدن مقامت نمونه های خاکی با اضافه شدن آهک و سیمان در مطالعات قبلی نیز گزارش شده است (Croft, 1967; Kamon et al, 1996; Jongpradist et al.,

2010; Hamidi and Hooresfand, 2013; Kamei et al., 2013; Sharma, 2018; Ghadir and Ranjbar, 2018; Ignat et al., 2019; Pongsivasathit et al., 2019; Aryal and Kolay, 2020)

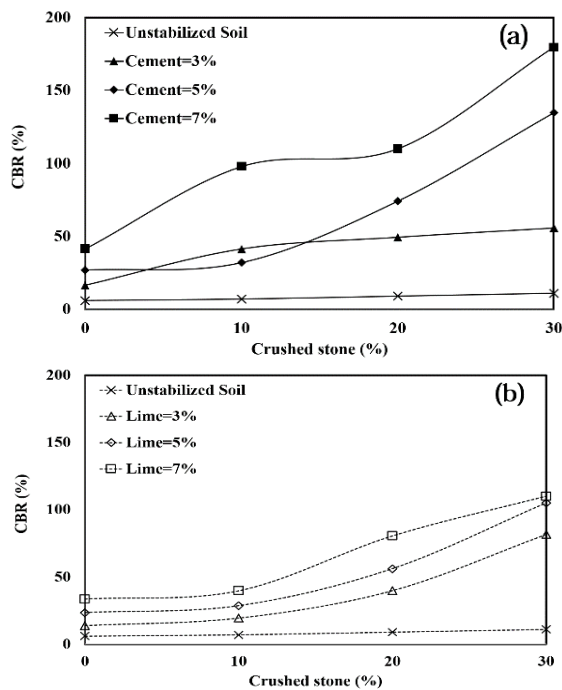


شکل ۳. اثر اضافه شدن سیمان و آهک بر pH خاک

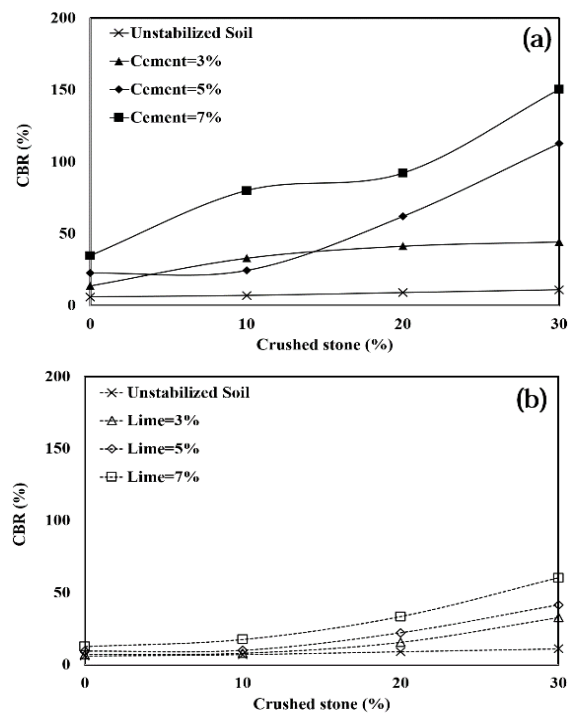
آزمایش تراکم اصلاح شده ی خاک بر اساس ASTM- D1557 2012 روی نمونه های حاوی درصد های مختلف آهک، سیمان و خرده سنگ انجام شده است. تغییرات وزن مخصوص خشک ماکزیمم و رطوبت بهینه نسبت به درصد آهک، سیمان و خرده سنگ در شکل (۴) ارائه شده است. در این شکل OMC نشان دهنده مقدار رطوبت بهینه و MDD نشان دهنده مقدار وزن مخصوص خشک بیشینه است. نتایج آزمایش نشان می دهد که افزایش خرده سنگ باعث افزایش وزن مخصوص خشک ماکزیمم و کاهش درصد رطوبت بهینه شده است. نمودار افقی در شکل (۴)، اسامی نمونه ها را نشان می دهد که در اینجا S نشان دهنده درصد خرده سنگ در نمونه، L نشان دهنده درصد آهک و C نشان دهنده درصد سیمان در نمونه است. بعنوان مثال C5-S30 نشان دهنده نمونه ای حاوی ۵ درصد سیمان و ۳۰ درصد خرده سنگ است. افزایش آهک یا سیمان در نمونه باعث افزایش کمی در وزن مخصوص خشک ماکزیمم و کاهش کمی در درصد رطوبت بهینه شده است. اگرچه تغییرات مقدار خرده سنگ اثر مهم تری بر تغییرات وزن مخصوص خشک ماکزیمم و درصد رطوبت بهینه نسبت به تغییرات آهک و سیمان داشته است.



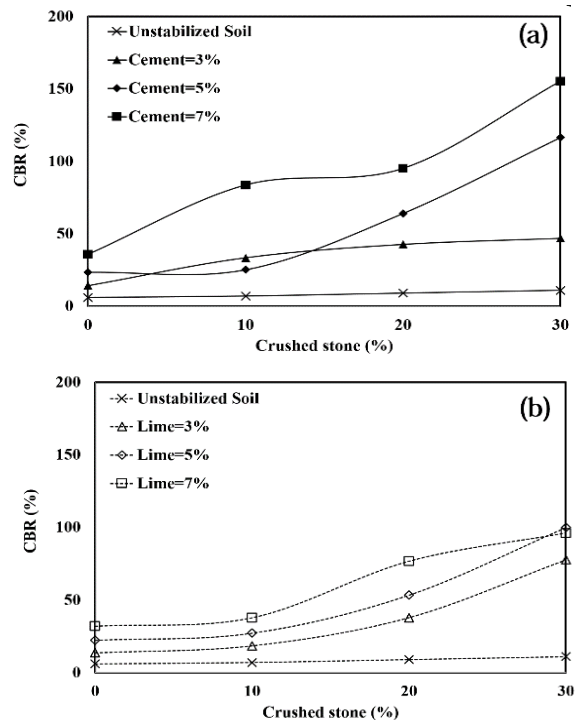
شکل ۷. اثر خرده سنگ بر CBR نمونه‌های عمل‌آوری شده در ۲۸ روز (a) خاک تثبیت شده با سیمان (b) خاک تثبیت شده با آهک



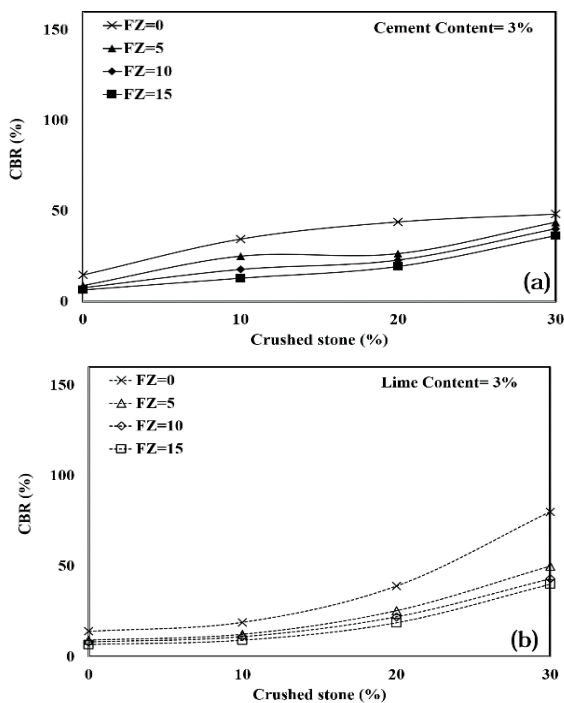
شکل ۸. اثر خرده سنگ بر CBR نمونه‌های عمل‌آوری شده در ۶۰ روز (a) خاک تثبیت شده با سیمان (b) خاک تثبیت شده با آهک



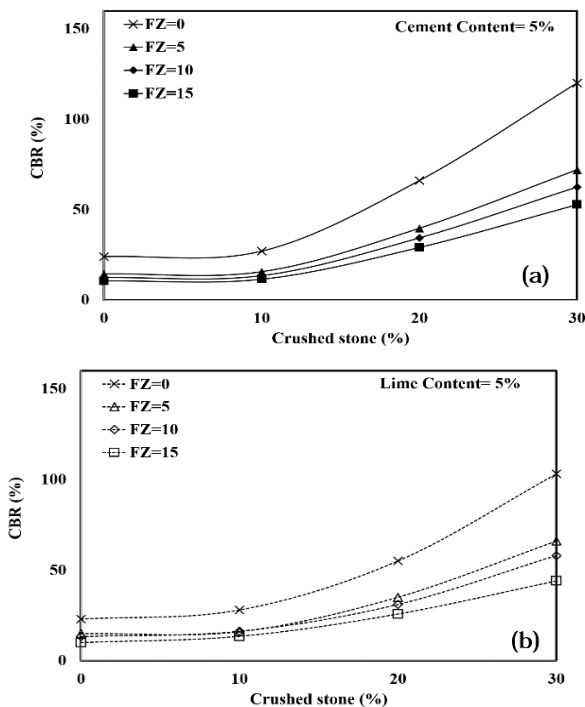
شکل ۵. اثر خرده سنگ بر CBR نمونه‌های عمل‌آوری شده در ۷ روز (a) خاک تثبیت شده با سیمان (b) خاک تثبیت شده با آهک



شکل ۶. اثر خرده سنگ بر CBR نمونه‌های عمل‌آوری شده در ۱۴ روز (a) خاک تثبیت شده با سیمان (b) خاک تثبیت شده با آهک



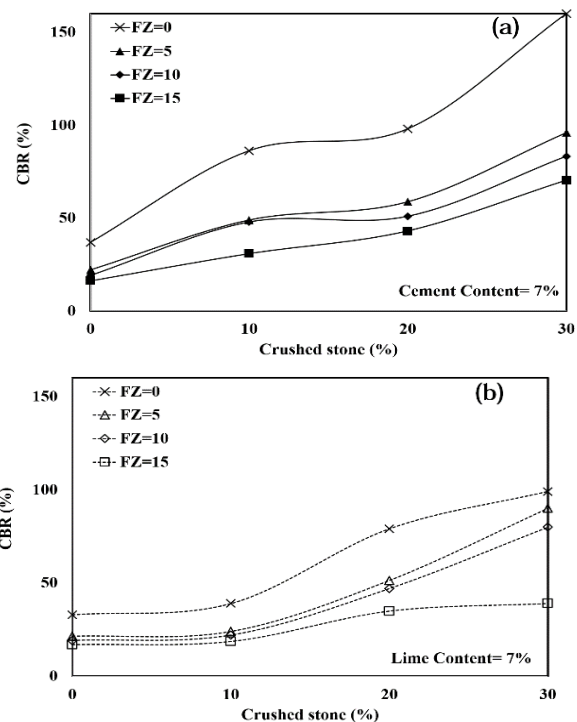
شکل ۹. اثر سیکل های ذوب و یخبندان بر CBR نمونه های عمل آوری شده در ۲۸ روز (a) خاک تثبیت شده با ۳٪ سیمان (b) خاک تثبیت شده با ۳٪ آهک



شکل ۱۰. اثر سیکل های ذوب و یخبندان بر CBR نمونه های عمل آوری شده در ۲۸ روز (a) خاک تثبیت شده با ۵٪ سیمان (b) خاک تثبیت شده با ۵٪ آهک

اثر سیکل های ذوب و یخبندان بر اساس مقدار خرده سنگ، آهک و سیمان بر مقاومت نمونه ها در شکل های (۹) تا (۱۱) ارائه شده است. همانطور که در نتایج دیده می شود، افزایش تعداد سیکل های ذوب و یخبندان موجب کاهش مقاومت نمونه ها شده است. اثر تعداد سیکل های ذوب و یخبندان بر کاهش مقاومت نمونه ها با افزایش مقدار خرده سنگ افزایش می یابد، به طوری که در نمونه های حاوی مقادیر بالای خرده سنگ، کاهش مقاومت ناشی از افزایش تعداد سیکل های ذوب و یخبندان چشمگیرتر است. نتایج نشان می دهد که بیشترین کاهش مقاومت نمونه ها بر اثر سیکل های ذوب و یخبندان، معمولاً در ۵ سیکل اول ذوب و یخبندان اتفاق می افتد و بعد از آن افزایش تعداد سیکل های ذوب و یخبندان اثر کمتری در کاهش مقاومت دارد. از طرف دیگر با افزایش سیمان یا آهک در نمونه ها، اثر سیکل های ذوب و یخبندان روی کاهش مقاومت بیشتر است، به طوری که کاهش مقاومت در نمونه های حاوی ۷ درصد سیمان یا آهک نسبت به نمونه های حاوی ۳ یا ۵ درصد سیمان یا آهک، با افزایش تعداد سیکل های ذوب و یخبندان بیشتر است. بنابراین می توان با استناد به نتایج آزمایشات ذوب و یخبندان، نسبت بهینه مصرف پسماند خرده سنگ با سیمان یا آهک را بطور جداگانه تعیین نمود. همانطور که از شکل ۱۰ مشخص است با افزایش نسبت ضایعات سنگی در نمونه ها در کنار ۵٪ سیمان، مقاومت خاک نیز روند افزایشی با الگوی مشخصی داشته است. پس از ۱۵ سیکل ذوب و یخ با نسبت ۲۰٪ خرده سنگ و ۵٪ سیمان، مقدار CBR خاک در عدد حداقل ۳۵ ثابت شده است که عدد مناسبی جهت قرار گرفتن در پارامترهای طراحی در پروژه های عمرانی می باشد. همچنین در شکل ۱۱، با مصرف ۲۰٪ وزنی خرده سنگ، ۷٪ آهک و پس از انجام ۱۵ سیکل ذوب و یخ، عدد CBR خاک در حدود ۳۵ ثابت شده است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که جهت بهسازی خاک آزمایشی، مصرف ۲۰٪ پسماند خرده سنگ به همراه ۵٪ سیمان یا ۷٪ آهک بهینه بوده و نتیجه مقاومتی مناسبی ایجاد می نماید.

نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری pH نشان می‌دهد که اضافه شدن آهک و سیمان باعث افزایش pH خاک شده است. در یک مقدار ثابت از آهک و سیمان، آهک اثر بیشتری در افزایش pH نسبت به سیمان دارد. افزایش خرده سنگ باعث افزایش وزن مخصوص خشک ماکزیمم و کاهش درصد رطوبت بهینه شده است. از طرف دیگر افزایش آهک یا سیمان در نمونه باعث افزایش کمی در وزن مخصوص خشک ماکزیمم و کاهش کمی در درصد رطوبت بهینه شده است. اگرچه تغییرات مقدار خرده سنگ اثر بیشتری بر تغییرات وزن مخصوص خشک ماکزیمم و درصد رطوبت بهینه نسبت به تغییرات آهک و سیمان داشته است. نتایج آزمایش‌های CBR نشان می‌دهد که اضافه شدن خرده سنگ به نمونه‌های تثبیت شده با آهک و سیمان باعث افزایش مقاومت شده است. از طرف دیگر در یک مقدار ثابت از خرده سنگ، افزایش آهک یا سیمان باعث افزایش مقاومت نمونه‌ها در تمامی زمان‌های عمل‌آوری شده است. اثر آهک یا سیمان بر افزایش مقاومت نمونه‌ها با افزایش خرده سنگ چشمگیرتر می‌گردد، بطوری که افزایش سیمان یا آهک در نمونه‌های حاوی بیشترین مقدار خرده سنگ (یعنی ۳۰ درصد خرده سنگ) موجب افزایش بیشتری در مقاومت نسبت به نمونه‌های بدون خرده سنگ یا حاوی مقادیر کمتری از خرده سنگ شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در یک زمان عمل‌آوری و مقدار خرده سنگ ثابت، افزایش مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با سیمان بیشتر از نمونه‌های تثبیت شده با آهک است. در تمامی نمونه‌ها تثبیت شده با هر مقدار از خرده سنگ، آهک یا سیمان، افزایش زمان عمل‌آوری، باعث افزایش مقاومت نمونه‌ها شده است. نتایج آزمایش‌های ذوب و یخبندان روی نمونه‌های تثبیت شده با آهک و سیمان که در مدت زمان ۲۸ روز عمل‌آوری شده است، نشان می‌دهد که افزایش تعداد سیکل‌های ذوب و یخبندان موجب کاهش مقاومت نمونه‌ها شده است. اثر تعداد سیکل‌های ذوب و یخبندان بر کاهش مقاومت نمونه‌ها با افزایش مقدار خرده سنگ افزایش می‌یابد. بیشترین کاهش مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با آهک یا سیمان با هر مقدار از خرده سنگ بر اثر اعمال سیکل‌های ذوب و



شکل ۱۱. اثر سیکل‌های ذوب و یخبندان بر CBR نمونه‌-

های عمل‌آوری شده در ۲۸ روز (a) خاک تثبیت شده با ۷٪

سیمان (b) خاک تثبیت شده با ۷٪ آهک

همچنین دوام و پایداری مقاومت ایجاد شده در طول زمان، حتی پس از تجربه نمودن سیکل‌های متعدد ذوب و یخ نیز مناسب خواهد بود. کاهش مقاومت خاک تثبیت شده در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان در کارهای محققین گذشته نیز مشاهده شده است (Liu et al., 2010; Ding et al., 2018; Boz and Sezer, 2018; Li et al., 2019a; Lu et al., 2020).

نتیجه‌گیری

در این تحقیق مجموعه‌ای از آزمایش‌های اندازه‌گیری pH، پروکتور اصلاح شده و CBR روی نمونه‌های تهیه شده از خاک‌های ماسه لای دار که با خرده‌سنگ مخلوط شده و با سیمان و آهک تثبیت شده، انجام شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، اثر درصد خرده سنگ، آهک یا سیمان، زمان عمل‌آوری و تعداد سیکل‌های ذوب و یخبندان بر خصوصیات مکانیکی و مقاومت برشی نمونه‌ها بررسی شده است. نتایج بدست آمده بصورت خلاصه در زیر ارائه شده است:

خاکهای سست (۲۰٪ وزنی)، میتوان با مصرف افزودنیهای سیمان و آهک (به ترتیب برابر ۵٪ و ۷٪)، از دوام و پایداری مقاومت ایجاد شده حتی پس از تجربه ۱۵ سیکل ذوب و یخ نیز اطمینان داشت.

یخبندان، معمولاً در ۵ سیکل اول ذوب و یخبندان اتفاق می افتد و بعد از آن افزایش تعداد سیکل های ذوب و یخبندان اثر کمتری در کاهش مقاومت دارد. از طرف دیگر با افزایش سیمان یا آهک در نمونه ها، اثر سیکل های ذوب و یخبندان بر کاهش مقاومت بیشتر است. بنابراین با مصرف پسماندهای خرده سنگی در بهسازی خاک ضمن ایجاد مقاومت باربری مناسب در

منابع

- Al Adili, A., Azzam, R., Spagnoli, G., and Schrader, J. 2012. Strength of soil reinforced with fiber materials (Papyrus). *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 48(6): 241–247. doi:10.1007/s11204-012-9154-z.
- Al-Rawas, A.A., Hago, A.W., and Al-Sarmi, H. 2005. Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. *Building and Environment*, 40(5): 681–687. doi:10.1016/j.buildenv.2004.08.028.
- Aryal, S., and Kolay, P.K. 2020. Long-Term Durability of Ordinary Portland Cement and Polypropylene Fibre Stabilized Kaolin Soil Using Wetting–Drying and Freezing–Thawing Test. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 6(1). Springer International Publishing. doi:10.1007/s40891-020-0191-9.
- ASTM-D1557. 2012. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)). Available from <https://www.astm.org/Standards/D1557.htm>. [accessed 24 November 2020].
- ASTM-D1883. 2018. Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Soils. Available from <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D1883-05.htm>. [accessed 24 November 2020].
- Barros, M.M., de Oliveira, M.F.L., da Conceição Ribeiro, R.C., Bastos, D.C., and de Oliveira, M.G. 2020. Ecological bricks from dimension stone waste and polyester resin. *Construction and Building Materials*, 232: 117252. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117252.
- Bayat, M., Asgari, M.R., and Mousivand, M. 2013. Effects of cement and lime treatment on geotechnical properties of a low plasticity clay. In *International Conference on Civil Engineering Architecture & Urban Sustainable Development 27&28 November 2013, Tabriz, Iran Effects*.
- Beeghly, J.H., and Schrock, M. 2009. Dredge material stabilization using the pozzolanic or sulfo-pozzolanic reaction of lime by-products to make an engineered structural fill. *3rd World of Coal Ash, WOCA Conference - Proceedings*, 3(1).
- Boz, A., and Sezer, A. 2018. Influence of fiber type and content on freeze-thaw resistance of fiber reinforced lime stabilized clay. *Cold Regions Science and Technology*, 151: 359–366. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.coldregions.2018.03.026.
- Boz, A., Sezer, A., Özdemir, T., Hızal, G.E., and Azdeniz Dolmacı, Ö. 2018. Mechanical properties of lime-treated clay reinforced with different types of randomly distributed fibers. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(6). doi:10.1007/s12517-018-3458-x.
- Cabalar, A.F., Hassan, D.I., and Abdunafaa, M.D. 2017. Use of waste ceramic tiles for road pavement subgrade. *Road Materials and Pavement Design*, 18(4): 882–896. Taylor and Francis Ltd. doi:10.1080/14680629.2016.1194884.
- Carvalho, A., de Castro Xavier, G., Alexandre, J., Pedroti, L.G., de Azevedo, A.R.G., Vieira, C.M.F., and Monteiro, S.N. 2014. Environmental durability of soil-cement block incorporated with ornamental stone waste. *Materials Science Forum*, 798–799(June): 548–553. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.798-799.548.
- Cheng, Y., Wang, S., Li, J., Huang, X., Li, C., and Wu, J. 2018. Engineering and mineralogical properties of stabilized expansive soil compositing lime and natural pozzolans. *Construction and Building Materials*, 187: 1031–1038. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.08.061.
- Chouhan, H.S., Kalla, P., Nagar, R., Gautam, P.K., and Arora, A.N. 2020. Investigating use of dimensional

- limestone slurry waste as fine aggregate in mortar. *Environment, Development and Sustainability*, 22(3): 2223–2245. Springer. doi:10.1007/s10668-018-0286-9.
- Croft, J.B. 1967. The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization. *Geotechnique*, 17(2): 119–135. Thomas Telford Ltd . doi:10.1680/geot.1967.17.2.119.
- Ding, M., Zhang, F., Ling, X., and Lin, B. 2018. Effects of freeze-thaw cycles on mechanical properties of polypropylene Fiber and cement stabilized clay. *Cold Regions Science and Technology*, 154: 155–165. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.coldregions.2018.07.004.
- Elif Orakoglu, M., Liu, J., and Niu, F. 2017. Dynamic behavior of fiber-reinforced soil under freeze-thaw cycles. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 101(July): 269–284. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.soildyn.2017.07.022.
- Ellaby, L. 2010. The History of Soil Stabilisation. In *Ezine @rticles*.
- Fan, W., Yang, P., and Yang, Z. (Joey). 2019. Impact of freeze-thaw on the physical properties and compressibility of saturated clay. *Cold Regions Science and Technology*, 168: 102873. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.coldregions.2019.102873.
- Gavali, H.R., Bras, A., Faria, P., and Ralegaonkar, R. V. 2019. Development of sustainable alkali-activated bricks using industrial wastes. Elsevier Ltd.
- Ghadir, P., and Ranjbar, N. 2018. Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement. *Construction and Building Materials*, 188: 361–371. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.07.207.
- Ghorbani, A., and Hasanzadehshooili, H. 2018. Prediction of UCS and CBR of microsilica-lime stabilized sulfate silty sand using ANN and EPR models; application to the deep soil mixing. *Soils and Foundations*, 58(1): 34–49. Japanese Geotechnical Society. doi:10.1016/j.sandf.2017.11.002.
- Hamidi, A., and Hooresfand, M. 2013. Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 36: 1–9. doi:10.1016/j.geotexmem.2012.10.005.
- Harichane, K., Ghrici, M., Kenai, S., and Grine, K. 2011. Use of Natural Pozzolana and Lime for Stabilization of Cohesive Soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(5): 759–769. doi:10.1007/s10706-011-9415-z.
- Hossain, K.M.A., and Mol, L. 2011. Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes. *Construction and Building Materials*, 25(8): 3495–3501. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.03.042.
- Ignat, R., Baker, S., Holmén, M., and Larsson, S. 2019. Triaxial extension and tension tests on lime-cement-improved clay. *Soils and Foundations*, 59(5): 1399–1416. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.sandf.2019.06.004.
- Jongpradist, P., Jumlongrach, N., Youwai, S., and Chucheepsakul, S. 2010. Influence of fly ash on unconfined compressive strength of cement-admixed clay at high water content. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(1): 49–58. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2010)22:1(49).
- Kamei, T., Ahmed, A., and Ugai, K. 2013. Durability of soft clay soil stabilized with recycled Bassanite and furnace cement mixtures. *Soils and Foundations*, 53(1): 155–165. Japanese Geotechnical Society. doi:10.1016/j.sandf.2012.12.011.
- Kamon, M., Ying, C., and Katsumi, T. 1996. Effect of Acid Rain on Lime and Cement Stabilized Soils. *Soils and Foundations*, 36(4): 91–99. Elsevier BV. doi:10.3208/sandf.36.4_91.
- Kravchenko, E., Liu, J., Niu, W., and Zhang, S. 2018. Performance of clay soil reinforced with fibers subjected to freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*, 153(2017): 18–24. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.coldregions.2018.05.002.
- Kumar, S.M.P. 2011. Cementitious Compounds Formation Using Pozzolans and Their Effect on Stabilization of Soils of Varying. 8: 212–215.
- Li, A., Niu, F., Xia, C., Bao, C., and Zheng, H. 2019a. Water migration and deformation during freeze-thaw of crushed rock layer in Chinese high-speed railway subgrade: Large scale experiments. *Cold Regions Science and Technology*, 166(June): 102841. Elsevier. doi:10.1016/j.coldregions.2019.102841.
- Li, R., Zhou, Y., Li, C., Li, S., and Huang, Z. 2019b. Recycling of industrial waste iron tailings in porous bricks with low thermal conductivity. *Construction and Building Materials*, 213: 43–50. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.040.
- Liu, J., Wang, T., and Tian, Y. 2010. Experimental study of the dynamic properties of cement- and lime-modified clay soils subjected to freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*, 61(1): 29–33.

- Elsevier. doi:10.1016/j.coldregions.2010.01.002.
- Liu, Y., Chang, C.W., Namdar, A., She, Y., Lin, C.H., Yuan, X., and Yang, Q. 2019. Stabilization of expansive soil using cementing material from rice husk ash and calcium carbide residue. *Construction and Building Materials*, 221: 1–11. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.05.157.
- Lu, Y., Liu, S., Zhang, Y., Li, Z., and Xu, L. 2020. Freeze-thaw performance of a cement-treated expansive soil. *Cold Regions Science and Technology*, 170: 102926. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.coldregions.2019.102926.
- Ojuri, O.O., Adavi, A.A., and Oluwatuyi, O.E. 2017. Geotechnical and environmental evaluation of lime–cement stabilized soil–mine tailing mixtures for highway construction. *Transportation Geotechnics*, 10(April 2018): 1–12. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.trgeo.2016.10.001.
- Pandian, N.S., and Krishna, K.C. 2003. The pozzolanic effect of fly ash on the California bearing ratio behavior of black cotton soil. *Journal of Testing and Evaluation*, 31(6): 479–485. ASTM International. doi:10.1520/jte12375j.
- Panfilova, M.I., Zubrev, N.I., Efremova, S.Y., Yakhkind, M.I., and Gorbachevskii, V.P. 2020. Strengthening of water-saturated soils of the bases of underground structures with composite solutions modified by industrial waste, boehmite. *Case Studies in Construction Materials*, 12. doi:10.1016/j.cscm.2019.e00323.
- Pongsivasathit, S., Horpibulsuk, S., and Piyaphipat, S. 2019. Assessment of mechanical properties of cement stabilized soils. *Case Studies in Construction Materials*, 11: e00301. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.cscm.2019.e00301.
- Rajput, S.P.S. 2018. An Experimental study on crushed stone dust as fine aggregate in cement concrete. *Materials Today: Proceedings*, 5(9): 17540–17547. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.matpr.2018.06.070.
- Rana, A., Kalla, P., and Csetenyi, L.J. 2017. Recycling of dimension limestone industry waste in concrete. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 31(4): 231–250. doi:10.1080/17480930.2016.1138571.
- Saadat, M., and Bayat, M. 2019. Prediction of the unconfined compressive strength of stabilised soil by Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) and Non-Linear Regression (NLR). *Geomechanics and Geoengineering*. Taylor and Francis Ltd. doi:10.1080/17486025.2019.1699668.
- Saygili, A., and Dayan, M. 2019. Freeze-thaw behavior of lime stabilized clay reinforced with silica fume and synthetic fibers. *Cold Regions Science and Technology*, 161: 107–114. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.coldregions.2019.03.010.
- Sharma, R. 2018. Laboratory study on sustainable use of cement–fly ash–polypropylene fiber-stabilized dredged material. *Environment, Development and Sustainability*, 20(5): 2139–2159. Springer Netherlands. doi:10.1007/s10668-017-9982-0.
- Shihata, S.A., and Baghdadi, Z.A. 2001. Simplified method to assess freeze-thaw durability of soil cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 13(4): 243–247. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:4(243).
- Singh Chouhan, H., Kalla, P., Nagar, R., and Kumar Gautam, P. 2019. Influence of dimensional stone waste on mechanical and durability properties of mortar: A review. *Construction and Building Materials*, 227: 116662. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.08.043.
- Sivrikaya, O., Kiyildi, K.R., and Karaca, Z. 2014. Recycling waste from natural stone processing plants to stabilise clayey soil. *Environmental Earth Sciences*, 71(10): 4397–4407. Springer Verlag. doi:10.1007/s12665-013-2833-x.
- Stefanidou, M., Tsardaka, E.C., and Pavlidou, E. 2017. Influence of nano-silica and nano-alumina in lime-pozzolan and lime-metakaolin binders. *Materials Today: Proceedings*, 4(7): 6908–6922. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.matpr.2017.07.020.
- Sukmak, P., Kunchariyakun, K., Sukmak, G., Horpibulsuk, S., Kassawat, S., and Arulrajah, A. 2019. Strength and Microstructure of Palm Oil Fuel Ash-Fly Ash-Soft Soil Geopolymer Masonry Units. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(8). American Society of Civil Engineers (ASCE). doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002809.
- Tabatabaei, J., and Mohammadi, F. 2013. Environmental Effects of Mining Industries in Meymeh Region, North West of Isfahan. *APCBEE Procedia*, 5: 388–393. Elsevier BV. doi:10.1016/j.apcbee.2013.05.067.
- Tonet, K.G., and Gorninski, J.P. 2013. Polymer concrete with recycled PET: The influence of the addition of industrial waste on flammability. *Construction and Building Materials*, 40: 378–389. Elsevier.

doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.09.049.

- Vakili, A.H., Selamat, M.R., Moayedi, H., and Amani, H. 2013. Stabilization of dispersive soils by pozzolan. *Forensic Engineering 2012: Gateway to a Better Tomorrow - Proceedings of the 6th Congress on Forensic Engineering*,: 726–735. doi:10.1061/9780784412640.077.
- Yilmaz, F., Kamilolu, H.A., and Şadoğlu, E. 2015. Soil stabilization with using waste materials against freezing thawing effect. *Acta Physica Polonica A*, 128(2): 392–394. doi:10.12693/APhysPolA.128.B-392.
- Zhang, Y., Johnson, A.E., and White, D.J. 2016. Laboratory freeze-thaw assessment of cement, fly ash, and fiber stabilized pavement foundation materials. *Cold Regions Science and Technology*, 122: 50–57. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.coldregions.2015.11.005.