

مقایسه مدول برجهندگی خاک طبیعی و اصلاح شده

با آهک به عنوان اساس و زیراساس

علمی - پژوهشی

عطا آقایی آرابی*، دانشیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
محمود قضاوی، استاد، دانشکده عمران دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
فرشاد لشنی زند، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: aghaeiaraci@bhrc.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۷ - پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۵

صفحه ۲۲-۱

چکیده

با توجه به کاهش شدید بودجه‌های عمرانی و راه‌سازی، لزوم استفاده از خاک محلی به عنوان اساس و زیراساس به عنوان راهکاری برای کاهش هزینه نهایی پروژه‌ها احساس می‌شود. لذا این تحقیق به بررسی و مشخصات خاک اساس اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده با ۳ درصد آهک شامل مقاومت‌های فشاری تک‌محوری و برزلی و مدول برجهندگی در مدت‌های عمل‌آوری مختلف و همچنین بعد از انجام آزمایش‌های سیکل‌های تر و خشک شدن و ذوب و یخبندان می‌پردازد. نمونه‌های تک‌محوری و برزلی با قطر ۱۰/۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۱ سانتی‌متر در ۳ لایه با ضخامت یکسان و دانسته خشک ۲/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب و رطوبت اولیه ۶٪ و ۸٪ ساخته شدند. نتایج نشان می‌دهد که افزودن آهک به طور قابل ملاحظه‌ای مقادیر CBR و مقاومت برشی خاک را افزایش می‌دهد. اصلاح خاک با آهک مقاومت آن در برابر چرخه‌های تر-خشک بهبود می‌بخشد، اما در برابر چرخه‌های ذوب-یخبندان مناسب نمی‌باشد. همچنین براساس آزمایش‌های تعیین مدول برجهندگی، مقایسه تعیین ارتباط مقادیر CBR خاک اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده با آهک تحت شرایط آب و هوایی گرم-خشک انجام شد. نتایج نشان داد مقادیر مدول برجهندگی خاک اصلاح‌نشده خشک و خاک اصلاح‌شده با آهک با هم برابر هستند. مقدار CBR (حداکثر مقدار براساس برای نفوذ ۲/۵ یا ۵ میلی‌متر) در خاک اصلاح‌نشده برابر مقدار نظیر برای نفوذ ۱/۲۵ میلی‌متر در خاک اصلاح‌شده با آهک است. لذا برای اهداف طراحی توصیه می‌شود برای خاک اصلاح‌شده با آهک از روابط همبستگی مدول برجهندگی و مقادیر CBR برای نفوذ ۱/۲۵ میلی‌متر استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: اساس و زیراساس اصلاح‌شده، آهک، مقاومت فشاری، مقاومت برزلی، CBR، عمل‌آوری، مدول برجهندگی، میرایی، طراحی

۱-مقدمه

استفاده از روش‌ها و مواد سستی در زمینه تثبیت و اصلاح، با پاره‌ای از مشکلات و محدودیت‌ها همراه است که با معرفی روش‌های نوین در این زمینه، سرعت و سهولت اجرایی بالا و هزینه کم اجرا را تداعی می‌نماید [هاشمی طباطبایی و همکاران ۱۳۹۷]. نتایج آزمایش‌ها در غالب تحقیقات نشان می‌دهد افزایش طول مدت عمل‌آوری و کاهش درجه اشباع نمونه باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت شده و انجام

سیکل‌های ذوب و یخبندان بر نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک تاثیر چندانی بر مقاومت ندارد [Jahandari و همکاران ۲۰۱۹]. استفاده از هر ماده تثبیت‌کننده‌ای تا درصد معلومی باعث افزایش مقاومت و بهبود دیگر مشخصات خاک‌های مشکل‌دار می‌شود و اضافه کردن بیشتر از این مقدار نتیجه عکس خواهد داد و باید این درصد بهینه برای هر ماده افزودنی با توجه به شرایط بهره‌برداری و دانه‌بندی خاک قبل از استفاده

درصدهای مختلف سیمان می‌تواند موجب بهبود رفتار برشی و فشاری خاک شود. اضافه کردن خاکستر آتشفشانی به این افزودنی می‌تواند خاک را برای ساخت مصالح بنایی مانند آجر با مقاومت کافی مناسب نماید و مقاومت آن را از حدود ۷ به ۱۸ مگاپاسکال برساند [Jitha و همکاران ۲۰۲۰، Andavan و Pagadala ۲۰۲۰]. افزایش ۴ تا ۶ درصد آهک به خاک رسی می‌تواند مقدار CBR خاک را تا ۸ برابر بیشتر کرده و حد روانی آن را کاهش دهد [Singh و Vasaikar همکاران ۲۰۱۳]. افزودن آهک علاوه بر پارامترهای استاتیکی خاک رفتار دینامیکی آن را نیز تغییر خواهد داد. Tian و همکاران (۲۰۱۹) در تحقیقی به بررسی اثر اضافه کردن درصدهای مختلف ریزدانه و آهک بر روی پارامترهای دینامیکی تنش برشی، مدول برشی و نسبت میرایی در مقابل کرنش‌های برشی پرداختند. نتایج نشان می‌داد اضافه شدن ریزدانه تا یک درصد مشخص، مدول برشی و تنش برشی دینامیکی را افزایش و نسبت میرایی را کاهش می‌دهد. تغییر پارامترهای دینامیکی از جمله مدول برجهندگی به عوامل مختلفی بستگی دارد [Lee و همکاران ۱۹۹۷]. برای یک نوع خاک رسی، افزایش رطوبت تا ۲ درصد (از ۱۹،۶۷ به ۲۱،۶۷٪) مدول برجهندگی را به حدود ۶۰٪ کاهش می‌دهد اما از طرفی افزایش فرکانس بارگذاری از ۰/۵ به ۳ هرتز و تراکم خاک از ۹۰٪ به ۹۶٪ می‌تواند مقدار آن را به ترتیب ۴۶ و ۶۶٪ افزایش دهد [Liu و همکاران ۲۰۱۹].

همچنین شکل و نوع سنگدانه، مدت اعمال تنش و تعداد سیکل بارگذاری نیز بر مقدار مدول برجهندگی موثر است [Zhalehjoو همکاران ۲۰۱۸]. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای برای تبدیل پارامترهای استاتیکی خاک به مدول برجهندگی با استفاده از روابط و ضرایب مختلفی انجام شده است [Zumrawi و Abu-Farsakh ۲۰۱۷]. در تحقیقی با انجام آزمایش سه‌محوری سیکلی روی ۵ نوع خاک با درصد‌های مختلف سیمان یک رابطه تجربی میان درصد آب به سیمان هر نمونه و مدول برجهندگی و تغییر شکل دائمی نمونه‌ها ارائه کردند. He و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی تاثیر تثبیت‌کننده های شیمیایی خاک روی مدول برجهندگی خاک‌های منبسط شونده و همچنین مقاومت تک‌محوری این خاک‌ها پرداختند. Bhuvaneshwari و همکاران (۲۰۱۹) رابطه‌ای تجربی میان مقاومت تک‌محوری

تعیین شود [James ۲۰۲۰]. تثبیت‌کننده‌های خاک با توجه به نوع و ویژگی مورد نیاز هر خاک تعیین می‌شوند [Little و Nair ۲۰۰۹]. برای مثال مصالح PVA باعث افزایش زاویه اصطکاک می‌شوند اما اثر آن‌ها روی چسبندگی و مقاومت UCS نمونه خاک مورد بررسی اندک است، در صورتیکه اختلاط خاک با درصد بهینه آهک سبب افزایش قابل توجه UCS و چسبندگی خاک می‌شود [Aghaei Araei et al. 2022]. گوگرد، کلرور سدیم یا منیزیم، سیلیکات سدیم، خاکستر ذغال سنگ و سرباره کوره‌های آهن گدازی نیز از انواع دیگر تثبیت‌کننده‌های شیمیایی هستند که به تنهایی و یا در ترکیب با آهک و سیمان برای اصلاح و بهبود مشخصات فنی خاک‌ها کاربرد دارند [He و همکاران ۲۰۱۸ و Bhuvaneshwari و همکاران ۲۰۱۹]. آهک‌هایی که معمولاً برای پایدار کردن خاک‌های ریزدانه مورد استفاده قرار می‌گیرند، عبارتند از: هیدروکسید کلسیم یا آهک شکفته $(Ca(OH)_2)$ ، آهک زودگیر (CaO) و آهک شکفته دولومیتی $(Ca(OH)_2MgO)$ است که در بین آن‌ها آهک شکفته پرکاربردترین نوع آهک برای تثبیت در اروپا است [Bell ۱۹۸۸]. همچنین استفاده از سیمان و پلیمر معدنی نیکوفلاک برای مصالح خاکی سبب کاهش انقباض (اثر مثبت) و افزایش مقاومت در زمان عمل‌آوری کوتاه می‌شود. اما، در دراز مدت با رشد میکروکریستالها باعث کاهش مقاومت و مدول برجهندگی می‌شوند [آقایی آرابی و همکاران ۱۳۹۹]. Tharani و همکاران (۲۰۲۱) در تحقیقی با بررسی خاک کتان سیاه هند که به دلیل داشتن مقادیر بالای کلسیم و منیزیم کرنات دچار نشست زیاد و ظرفیت باربری پایین است از طریق انجام آزمایش‌های فشاری و CBR، دریافتند که اضافه کردن ۴ تا ۶ درصد آهک به همراه فیبر بازالت و پلیپروپیلن، می‌تواند باعث کاهش درصد رطوبت بهینه و در نهایت بهبود مقاومت و تراکم خاک شود. لیو و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند افزودن آهک به خاک‌های شور قلیایی موجب افزایش مقاومت تک‌محوری این خاک‌ها می‌شود هر چند که ظرفیت باربری و نشانه خمیری را اندکی کاهش می‌دهد. آن‌ها همچنین با انجام آزمایش‌های ذوب- یخبندان نشان دادند تکرار چرخه‌های ذوب- یخبندان در خاک‌هایی با کمتر از ۹ درصد آهک باعث خرد شدن دانه‌ها و در نهایت سبب کاهش شدید مقاومت فشاری تک‌محوری خواهد شد. افزودن آهک به همراه

شاخص شامل دانه بندی (ASTM D6913)، هیدرومتری (ASTM D-7928)، اتربرگ و درصد رطوبت روی خاک مورد بررسی انجام شده است. متوسط حدود روانی خاک طبیعی ۲۳/۲٪ (شامل ۲/۵٪ رطوبت باقیمانده) و حد خمیری آن ۱۱٪ و شاخص خمیری خاک آن برابر ۱۲/۲ و G_s آن برابر ۲/۶۵ می‌باشد. خاک بر اساس طبقه بندی یونیفاید SM و طبق ASSHTO در طبقه A-2 است. نتایج آزمایش‌های شیمیایی انجام شده بر روی نمونه خاک مورد بررسی در جدول (۱) ارائه شده است. آزمایش XRF طبق استاندارد ASTM E1621-13 روی نمونه‌های با روش آماده سازی نمونه بدون خردایش در دمای آزمایشگاه ۲۰ درجه سانتیگراد و رطوبت ۳۶٪ انجام شده است.

برای اندازه گیری L.O.I (افت وزنی در اثر سرخ شدن) نمونه به مدت ۹۰ دقیقه در دمای ۹۵۰ درجه قرار گرفت. آزمایش XRD طبق استاندارد BS EN 13925-1:2008 بدون خردایش نمونه انجام شد. براساس نتایج آزمایش XRD نمونه خاک به ترتیب شامل Calcite ($CaCO_3$)، Quartz، (Ca) Feldspar، Dolomite ($CaMg(CO_3)_2$)، (Na) Feldspar (Minor) Clay Mineral می‌باشد.

رس تثبیت شده با آهک و مدول برجهندگی ارزیابی کردند. نتایج نشان می‌دهد بیشتر شدن مدت عمل‌آوری تاثیر چندانی بر مدول برجهندگی نمونه‌های با درصد پایین آهک ندارد اما بیشتر شدن درصد آهک تثبیت کننده تا ۴ درصد می‌تواند مدول با افزایش مدت عمل‌آوری مدول برجهندگی را تا ۵ برابر افزایش دهد. نشریه ۲۳۴ آیین‌نامه روسازی های آسفالتی ایران (۱۳۹۰) ارتباط بین مقدار CBR و مدول برجهندگی با ضرایب مختلفی را پیشنهاد داده‌اند. این روابط حاصل از انجام آزمایش سه‌محوری سیکی به صورت تابع توانی از CBR با ضرایب ثابت ارائه شده‌اند [Mohajerani و همکاران ۲۰۱۶]. اما متأسفانه هنوز تحقیق جامعی درباره ارتباط بین مقادیر CBR و مدول برجهندگی بدون در نظر گرفتن دیگر پارامترهای مقاومتی خاک انجام نشده است. این مقاله به بررسی رابطه بین مقدار CBR و مدول برجهندگی خاک‌های اصلاح شده با آهک و کفایت استفاده از پارامتر CBR به تنهایی برای تعیین مدول برجهندگی این خاک‌ها می‌پردازد.

معرفی مصالح

خاک مورد استفاده در این آزمایش‌ها حاصل از برداشت مصالح محلی در بزرگراهی در شهر تبریز می‌باشد. آزمایش‌های

جدول ۱. نتایج آزمون‌های شیمیایی به روش XRF نمونه خاک

عناصر متشکل	(درصد)
کاهش وزن بر اثر سرخ شدن	28.55
Na ₂ O	0.41
MgO	3.1
K ₂ O	0.77
Al ₂ O ₃	4.70
CaO	37.80
SiO ₂	19.10
Fe ₂ O ₃	4.70
Sro	0.17
TiO ₂	0.70

ساخت نمونه‌ها

تمام نمونه‌های خاک با و بدون تثبیت کننده‌ها برای آزمایش‌های معمول مکانیک خاک با وزن مخصوص ۲/۲ گرم بر سانتی متر مکعب رطوبت اولیه ۸٪ و ۶٪ در ۳ لایه با ضخامت یکسان کوبیده شدند. برای ساخت نمونه اصلاح شده با آهک، به مخلوط دانه‌های خاک زیر الک #۴ اضافه و پس از مخلوط کردن، دانه‌های درشت دانه ۴/۷۵ تا ۱۹ میلی‌متر اضافه

می‌شود. از هر سری از نمونه‌ها ۵ عدد ساخته شد و پس از عمل‌آوری به مدت ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز در اتاق رطوبت، مورد آزمایش قرار گرفتند. نام‌گذاری نمونه‌ها با توجه به درصد مواد تثبیت کننده به کاررفته در آنها انجام شده است. نیکوفلاک استفاده شده در نمونه‌ها به میزان ۱۰ درصد سیمان به کار رفته است.

برنامه آزمایش‌ها

انجام شده است که زمان ممکن انجام آزمایش روی این نمونه‌ها ۳۱ روز بعد از ساخت می‌باشد که می‌توان با تقریب مناسب با مقاومت نمونه‌های عمل‌آوری ۲۸ روزه معمولی مقایسه کرد. همچنین از نمودارهای تنش-کرنش حاصل شده از آزمایش‌های تک‌محوری مدول الاستیته سکانتی (E50) محاسبه شد که مقدار آن برای هر نمونه برابر با حاصل تقسیم ۵۰٪ بیشینه مقاومت فشاری بر کرنش نظیر است. خلاصه مقاومت فشاری حداکثر، کرنش نظیر مقاومت حداکثر و مدول سکانتی در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج آزمایش تک‌محوری نمونه‌های مختلف در زمان‌های مختلف عمل‌آوری در شکل (۱-الف و ب) ارائه شده‌است. به طور کلی نمونه C5L3 دارای بیشترین مقاومت فشاری است که با افزایش زمان عمل‌آوری مقاومت آن افزایش می‌یابد. نکته جالب توجه کاهش و حتی ثابت ماندن مقاومت فشار نمونه CN5L3 با افزایش زمان عمل‌آوری است. مقاومت فشاری نمونه COL3 بیشتر از دو نمونه COL2 و COL4 است. نکته جالب توجه افزایش قابل توجه مقاومت فشاری نمونه COL3 با زمان عمل‌آوری است. حداقل مقاومت فشاری محدود نشده برای خاک تثبیت شده با آهک برای روسازی‌های مختلف در جدول (۳) ارائه شده است. مقدار مقاومت نمونه COL3 در حالت ۸ روز خیس‌اندن بیش از مقدار ۳/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع برای زیراساس برای هر دو رویه صلب و انعطاف پذیر است (آقایی آرابی و همکاران ۱۴۰۰). برای نمونه اشباع یا مغروق شده مقدار مقاومت UCS a ۲۰۰ کیلوپاسکال و حالت خشک ۴۰۰ کیلوپاسکال برای ارتقاء خاک بستر، کافی می‌باشد.

آزمون‌های ارزیابی تثبیت با آهک شامل تعیین تثبیت‌کننده اولیه (ICS) (ASTM D6276)، ارزیابی کفایت مقدار تثبیت‌کننده آهک (ASTM D5102)، ارزیابی دوام خشک-تر شدن (ASTM D559)، ارزیابی یخندان-ذوب (ASTM D560)، تعیین مقاومت کششی به روش غیر مستقیم (ASTM D6931) CBR، (ASTM D1883) می‌باشد. از سایر آزمایش‌های استاتیکی انجام شده می‌توان از شامل آزمایش فشاری تک‌محوری (ASTM D1633 / D5102) و مقاومت کششی برزیلی (ASTM C496) تحت سه شرایط عمل‌آوری معمولی، ذوب-یخندان و تر-خشک، CBR (ASTM D1883)، برش مستقیم (ASTM D3080) نام برد. آزمایش‌های دینامیکی انجام شده شامل آزمایش‌های سه‌محوری تعیین مدول برشی و نسبت میرایی (ASTM D3999) و مدول برجهنگی (AASHTO T307) می‌باشد. به منظور تعیین سلامت سنگدانه‌ها در مقابل عوامل جوی آزمایش سلامت (ASTM C88/C88M-18) انجام شد. افت وزنی نمونه خاک اصلاح‌نشده، ۱۱٪ (۱ درصد برای بخش دانه درشت با اندازه ۲۵-۴/۷۵ میلی‌متر و ۱۰ درصد برای بخش دانه‌ریز با اندازه دانه ۹/۵-۰/۳ میلی‌متر) می‌باشد.

آزمایش مقاومت تک‌محوری فشاری

این آزمایش با سرعت بارگذاری ۰/۵۲۵ میلی متر بر ثانیه برای زمان‌های عمل‌آوری معمولی ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه معمولی انجام شد. همچنین در خاتمه آزمایش‌های یخندان-ذوب (FT) و تر-خشک (WD)، روی نمونه‌ها آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و کشش غیر مستقیم برزیلی

جدول ۲. نتایج مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها بر حسب (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)، کرنش نظیر و مدول سکانتی (کیلوگرم بر سانتی متر

مربع)، تحت عمل‌آوری معمولی با رطوبت ۸٪ و یخندان-ذوب (FT) و تر-خشک (WD)

Sample Name	3-Days			7-Days			28-Days			56-Days			90-Days		
	UCS	AS	E50 (kg/cm2)	UCS	AS	E50 (kg/cm2)	UCS	AS	E50 (kg/cm2)	UCS	AS	E50 (kg/cm2)	UCS	AS	E50 (kg/cm2)
C5L3	25.00	0.008	4328	35.66	0.011	4317	38.78	0.014	3776	36.39	0.016	2600	43.59	0.023	2406
C5NL3	26.56	0.010	2710	18.27	0.019	1661	33.09	0.015	2773	33.02	0.015	2757	29.16	0.016	2988
C3L0	18.33	0.020	1340	19.59	0.014	1682	24.11	0.012	2667	26.64	0.016	3111	39.90	0.013	3325
COL2	-	-	-	12.22	0.031	499	25.33	0.020	1977	17.24	0.024	1058	-	-	-
COL3	-	-	-	13.34	0.019	691	20.91	0.015	2157	30.92	0.015	3414	34.20	0.009	4479
COL3-6 (FT)	-	-	-	-	-	-	4.94	0.0110	527	-	-	-	-	-	-
COL3-8 (FT)	-	-	-	-	-	-	6.03	0.0142	594	-	-	-	-	-	-
COL3-6*(FT)	-	-	-	-	-	-	6.52	0.0151	470	-	-	-	-	-	-
COL3-8*(FT)	-	-	-	-	-	-	3.69	0.0137	337	-	-	-	-	-	-
COL3-6 (DW)	-	-	-	-	-	-	8.29	0.0091	1093	-	-	-	-	-	-
COL3-8 (DW)	-	-	-	-	-	-	25.08	0.0245	1535	-	-	-	-	-	-
COL4	-	-	-	9.05	0.020	698	16.03	0.020	1174	22.76	0.014	2225	-	-	-
COL0	2.38	0.024	128	2.96	0.023	139	3.86	0.025	138	3.00	0.018	244	3.89	0.025	142

C: سیمان، L: آهک، N: ماده پلیمری-معدنی، اعداد معرف درصد افزودنی، UCS: حداکثر مقاومت فشاری تک‌محوری، AS: کرنش محوری نظیر UCS،

*: برس نخورده

جدول ۳. حداقل مقاومت فشاری محدود نشده توصیه شده برای خاک تثبیت شده با آهک برای روسازه‌های مختلف به عنوان مصالح زیراساس و

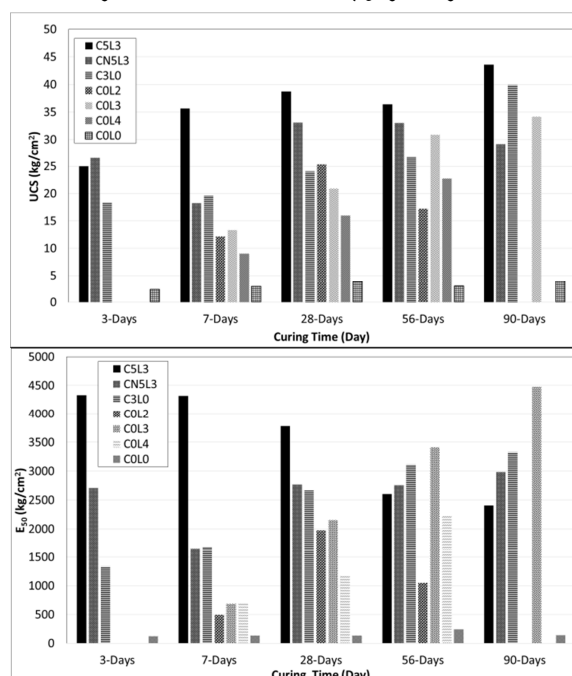
شرایط مختلف (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)

مصالح	نوع کاربرد تثبیت کننده	خیساندن به مدت		
		۸ روز	۳ سیکل	۷ سیکل
زیراساس	روسازی صلب/دال های کف/ فونداسیون	۳/۵۰	۳/۵۰	۸/۵۰
	روسازی انعطاف پذیر (بیش از ۲۵ سانتی متر)	۴/۲۵	۴/۲۵	۹/۰۰
	روسازی انعطاف پذیر (بین ۲۰ تا ۲۵ سانتی متر)	۵/۰۰	۷/۰۰	۱۰/۰۰
اساس	روسازی انعطاف پذیر (بین ۱۳ تا ۲۰ سانتی متر)	۶/۵۰	۶/۵۰	۱۱/۰۰
	روسازی انعطاف پذیر	۹/۰۰	۹/۰۰	۱۴/۰۰

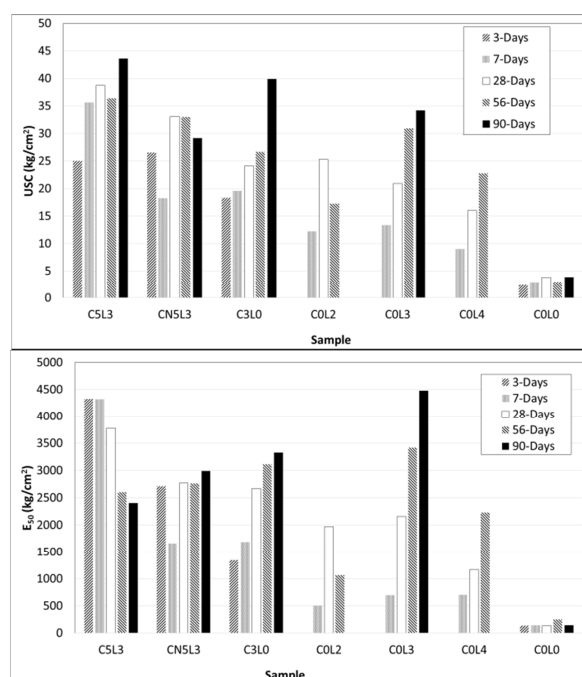
توجه: برای شرایط سیکل رطوبت دهی، نمونه ها باید طوری ساخته شود که به ۸۰٪ رطوبت حالت "خیس" و ۵۰٪ رطوبت حالت "خشک" برسند.

کوبیده شود. مقادیر مقاومت فشاری و مدول سکانتی نمونه با رطوبت بیش از رطوبت بهینه در شرایط تر-خشک مشابه نمونه‌های اصلاح شده عمل آوری معمولی است. برای نمونه اصلاح شده با آهک تنها نسبت مقاومت فشاری تک‌محوری عمل آوری معمولی به عمل آوری یخبندان -ذوب عددی بین ۳ تا ۵ است. این نسبت برای مقاومت کشش غیرمستقیم عددی بیش از ۶ است. لذا توصیه می‌شود با توجه به سایر شاخص‌های بررسی شده، نمونه‌های اصلاح شده با آهک تنها برای شرایط آب و هوایی تر-خشک برای تمام روسازی‌ها یا روسازی صلب برای شرایط یخبندان برای اصلاح خاک مورد مطالعه، استفاده گردد.

افزایش رطوبت نمونه برس‌خورده یخبندان-ذوب (ASTM D-560) سبب افزایش اندک مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول سکانتی می‌شود. در نمونه‌های برس‌نخورده یخبندان-ذوب افزایش رطوبت ساخت سبب کاهش مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول سکانتی می‌شود. با توجه عدم افزایش مقاومت و مشابهت با رفتار نمونه اصلاح نشده، استفاده از آهک برای اصلاح خاک مورد بررسی برای شرایط یخبندان توصیه نمی‌شود. مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های در آزمایش تر-خشک (ASTM D-559) بیشتر از مقادیر نظیر یخبندان-ذوب است و با افزایش رطوبت افزایش می‌یابد. لذا توصیه می‌شود نمونه اصلاح شده با آهک در شرایط مرطوب



شکل ۱. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های مختلف در زمان‌های مختلف عمل آوری



شکل ۲. مدول سکانتی حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های مختلف در زمان‌های مختلف عمل‌آوری

زمان عمل‌آوری خصوصاً برای نمونه اصلاح‌شده با سه درصد آهک است. شکل ۴ مدول سکانتی حاصل از آزمایش کشش غیرمستقیم نمونه‌های مختلف در زمان‌های مختلف عمل‌آوری ارائه شده است. نکته جالب بیشترین مدول سکانتی مربوط به نمونه COL3 در زمان ۲۸ روز عمل‌آوری است. مقاومت کششی نمونه ذوب- یخ بسیار کمتر از مقادیر برای شرایط تر-خشک است. برعکس تغییرات اندک مقاومت فشاری با زمان عمل‌آوری، مقاومت کششی نمونه اصلاح‌شده با ماده پلیمری معدنی افزایش می‌یابد.

مشابه اصلاح با سیمان، حداقل مقاومت کششی به روش غیرمستقیم (برزیلی) نمونه خاک زیراساس اصلاح شده با آهک حدود ۱/۴ کیلوگرم بر سانتی متر مربع پیشنهاد می‌شود (آقای آرای و همکاران ۱۴۰۰) که قابل مقایسه مقدار ۳/۶۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع و ۱/۴۳ کیلوگرم بر سانتی متر مربع خاک اصلاح شده با ۳٪ آهک به ترتیب برای شرایط عمل‌آوری معمولی و تر-خشک است.

نتایج مدول سکانتی نمونه‌های مختلف در زمان‌های مختلف عمل‌آوری در شکل (۲- الف و ب) ارائه شده است. برعکس مقاومت فشاری، مدول سکانتی نمونه C5L3 با افزایش زمان عمل‌آوری کاهش یافته و مقدار آن بعد از زمان ۹۰ روزه حدود نصف مقادیر نظیر ۳ روزه است. ثابت ماندن مدول نمونه CNSL3 هم جالب توجه است. با توجه به ملاحظات اقتصادی به نظر می‌رسد نمونه COL3 بهترین عملکرد از نظر مقاومت فشاری را داشته است.

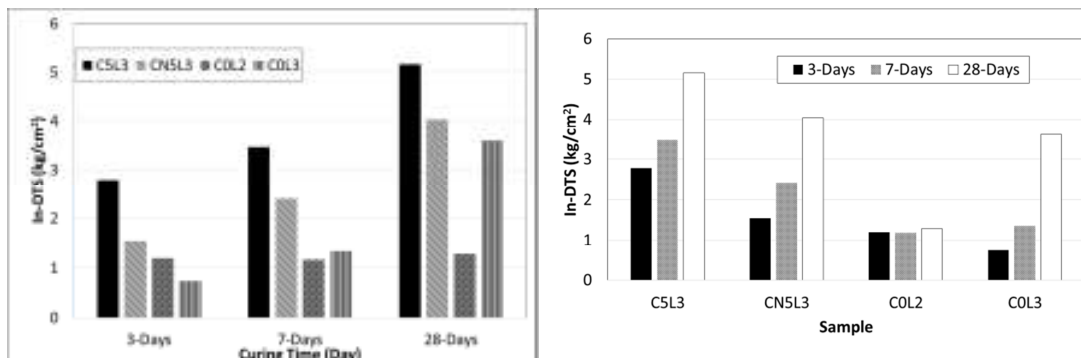
آزمایش مقاومت کششی (برزیلی)

آزمایش بر روی نمونه‌ها در زمان عمل‌آوری ۳، ۷ و ۲۸ انجام شد. برنامه آزمایش‌های کشش برزیلی نمونه‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. شکل ۳ نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم نمونه‌های مختلف در زمان‌های مختلف عمل‌آوری را نشان می‌دهد. بیشترین مقاومت کشش غیرمستقیم به ترتیب برای نمونه با C5L3، CNSL3 و COL3 است. نکته جالب توجه افزایش قابل توجه مقاومت کششی سه نمونه یاد شده با افزایش

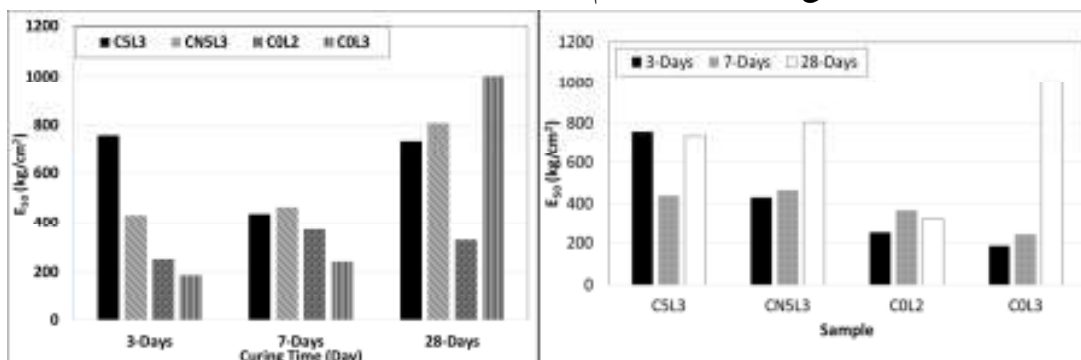
جدول ۴. نتایج مقاومت کشش غیرمستقیم (برزیلی) نمونه‌ها

Sample Name	3-Days			7-Days			28-Days		
	In-DTS (kg/cm ²)	AS	E ₅₀ (kg/cm ²)	In-DTS (kg/cm ²)	AS	E ₅₀ (kg/cm ²)	In-DTS (kg/cm ²)	AS	E ₅₀ (kg/cm ²)
CSL3	2.78	0.0059	759	3.47	0.0089	437	5.16	0.0059	736
CNSL3	1.55	0.0039	430	2.41	0.0059	463	4.04	0.0050	807
COL2	1.20	0.0055	300	1.17	0.0063	367	1.29	0.0109	325
COL3	0.74	0.0043	186	1.35	0.0059	240	3.61	0.0050	1002
COL3-6 (FT)	-	-	-	-	-	-	0.23	0.0091	47
COL3-8 (FT)	-	-	-	-	-	-	0.60	0.0091	63
COL3-6*(FT)	-	-	-	-	-	-	0.40	0.0109	42
COL3-8*(FT)	-	-	-	-	-	-	0.46	0.0100	44
COL3-6 (DW)	-	-	-	-	-	-	1.43	0.0168	98
COL3-8 (DW)	-	-	-	-	-	-	2.18	0.0168	141

*: برس نخورده



شکل ۳. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم نمونه‌های مختلف در زمان‌های مختلف عمل‌آوری



شکل ۴. مدول سکانتی حاصل از آزمایش کشش غیرمستقیم نمونه‌های مختلف در زمان‌های مختلف عمل‌آوری

شده است. نتایج نشان می‌دهد که در حالت خشک نمونه‌ها اصلاح‌نشده از CBR مناسبی برخوردار هستند، اما افزایش رطوبت سبب کاهش شدید مقادیر CBR به حدود یک‌دهم مقدار اولیه می‌شود. مقادیر CBR نمونه خشک COL3 حدود دو برابر مقادیر نظیر خشک می‌باشد اما باز هم از حداقل مقادیر مورد نیاز برای اساس و زیراساس جاده به ترتیب با مقادیر ۸۰ و ۲۵ بیشتر است. حداقل CBR (ASTM D1883) برای اساس و زیراساس باند فرودگاه (مشروط به عدم یخ زدن) برای شرایط بالا حداقل ۱۰۰ و ۳۵ است. مقایسه مقادیر CBR در نفوذهای ۱،۲۵ میلی‌متر خاک اصلاح‌شده با مقادیر نظیر در نفوذ ۵ میلی‌متر خاک اصلاح‌نشده تفاوت چندانی را نشان

جدول ۵ مقدار و نسبت مقاومت فشاری تک‌محوری حداکثر و کشش غیرمستقیم برزیلی و مدول الاستیسیته سکانتی (E₅₀) نظیر در شرایط عمل‌آوری معمولی (در دمای اتاق ۲۸ و روزه) آزمایش تر-خشک شدن و یخبندان-ذوب نمونه COL3-8 ارایه شده است. کمترین نسبت مقاومت‌ها و مدول‌های حداکثر فشاری تک‌محوری و کشش غیرمستقیم برای آزمایش یخبندان-ذوب به تر-خشک می‌باشد.

نتایج آزمایش CBR

در جدول ۶ نتایج آزمایش CBR روی نمونه‌های خاک طبیعی و COL3 برای درصدهای مختلف نفوذ (میلی‌متر) ارایه

دستگاه باید ۳ تن اکثر دستگاه‌های معمولی بیشتر باشد. لذا، لزوم استفاده از دستگاه با ظرفیت بار محوری حدود ۱۰ تن و بیشتر برای خاک‌های اصلاح شده توصیه می‌شود.

نمی‌دهند. نکته جالب کاهش ۳۰٪ مقادیر CBR نمونه خاک اصلاح شده با آهک در صورت غرقاب شدن می‌باشد. انجام اصلاحات منحنی‌های نفوذ و نیرو خصوصاً در اوایل بارگذاری طبق استاندارد CBR لازم است. ذکر این نکته ضروری است که با توجه به CBR بالا باید توان سیستم بارگذاری محوری

جدول ۵. مقدار و نسبت مقاومت فشاری تک‌محوری حداکثر و کشش غیر مستقیم برزیلی و مدول الاستیسیته سکانتی (E50) نظیر در شرایط

عمل‌آوری معمولی (در دمای اتاق ۲۸ و روزه) آزمایش تر- خشک شدن و یخبندان- ذوب نمونه COL3-8

Sample	Wetting and Drying (kg/cm ²)		Freezing and Thaw Curing (kg/cm ²)		Room Curing (kg/cm ²)		ratio		ratio		ratio	
	UCS _{w.d.}	In-DTS _{w.d.}	UCS _{F.T.}	In-DTS _{F.T.}	UCS _R	In-DTS _R	UCS (R/W.D.)	In-DTS (R/W.D.)	UCS (R/F.T.)	In-DTS (R/F.T.)	UCS (F.T./W.D.)	In-DTS (F.T./W.D.)
Strength	25.08	2.18	3.69	0.46	20.91	3.61	0.83	1.66	5.67	5.67	0.15	0.21
Modulus	1535	141	337	44	2157	1002	1.41	7.11	6.40	6.40	0.22	0.31

UCS/In-DTS: نسبت مقاومت فشاری تک‌محوری حداکثر به مقاومت کششی غیرمستقیم حداکثر

جدول ۶. خلاصه نتایج CBR

Additive	Water Content	Age(days)	State	CBR (%) in Penetration: 1.25mm	CBR (%) in Penetration: 2.5mm	CBR (%) in Penetration: 5mm
COL0	6%	1	Dry	47.15	69.30	91.64
				48.30	73.20	98.10
	8%	4	Soaked	2.65	4.03	5.88
				3.70	5.50	7.40
COL3	8%	3	Dry	141.40	214.40	287.30
			Soaked	103.90	157.50	211.00
		56	Dry	106.20	241.60	377.60
			Soaked	80.10	177.90	276.10

نتایج آزمایش برش مستقیم

این آزمایش طبق ASTM D3080 و با جعبه برش به ابعاد ۱۵×۳۰×۳۰ سانتی‌متر انجام شد. نمونه‌ها با دانسیته خشک ۲/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب و رطوبت بهینه ۸٪ و ۶٪ به ترتیب برای نمونه COL3 و COL0 ساخته و تحت سربارهای ۰/۳۴۵، ۰/۶۸۹ و ۱/۳۷۹ گرم بر سانتی‌متر مربع قرار گرفتند. نمونه با سرعت بار افقی ۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه گسیخته شدند. مقادیر زاویه اصطکاک داخلی (φ) و چسبندگی نمونه خاک طبیعی با به ترتیب ۲۱/۷ درجه و ۰/۳۹ به دست آمد. مقادیر زاویه اصطکاک داخلی (φ) و چسبندگی نمونه خاک اصلاح شده با ۳ درصد آهک ساخته شده با ۸٪ رطوبت به ترتیب ۵۲/۱۱ درجه و ۰/۱۸ سانتی‌متر مربع می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود، زاویه اصطکاک داخلی نمونه با تثبیت با ۳٪ آهک، نسبت به نمونه خاک طبیعی تقریباً ۲ برابر و چسبندگی نصف شده‌است.

آزمایش یخبندان- ذوب

آزمایش مقاومت یخبندان و ذوب (ASTM D560) روش B (مصلح زیر الک ۱۹ میلی‌متر) با هدف تعیین رطوبت بعد از پایان سیکل‌های یخبندان-ذوب، افت وزنی نمونه‌ها، تغییر حجم (تورم یا انقباض) و اندازه‌گیری مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها، بعد از ۷ روز عمل‌آوری اولیه و پس از ۱۲ سیکل ذوب و یخبندان (۴۸ ساعت یک سیکل) می‌باشد. نمونه اصلاح شده با ۳٪ آهک با رطوبت ساخت ۶ و ۸ درصد برس خورده و نخورده (در کل ۴ نمونه) تحت آزمایش یخبندان-ذوب قرار گرفتند. در نام‌گذاری نمونه‌ها، نمونه‌هایی که * دارند، برس نخورده‌اند. حداکثر افت وزنی مجاز آیین‌نامه برای خاک A-2-4 (AASHTO M145) ۱۴ درصد است. جدول ۷ متوسط افت وزنی نمونه‌های یخبندان-ذوب به ترتیب برای شرایط برس نخورده و برس خورده برای دو نمونه UCS و In-DTS ارائه شده است. که در محدوده مجاز برای و زیر اساس راه و بانده قرار دارد. درصد رطوبت در نمونه‌های

اصلاح شده با آهک با رطوبت ساخت ۶٪ و ۸٪ به ترتیب بیش از ۸۵٪ و ۷۵٪ بیشتر از درصد رطوبت ساخت اولیه است. بیشترین متوسط افت وزنی در نمونه COL3 برس خورده با رطوبت ساخت ۸٪ مشاهده شد. بیشترین درصد تغییر حجم برای نمونه COL3 با رطوبت ساخت ۶٪ برس خورده می‌باشد.

جدول ۷. نتایج آزمایش نمونه‌های یخبندان- ذوب نمونه‌های برس خورده و نخورده(*)

Sample	COL3*	COL3	COL3*	COL3
Moisture of Tamping (%)	6	6	8	8
Moisture percentage after freezing and thaw cycles	11.1	11.1	14.0	14.0
Weight loses (%)	7.30	8.20	7.70	8.95
Volume changes (%)	-0.90	-4.93	-3.73	-1.59

آزمایش تر- خشک (جذب آب)

جذب آب نمونه‌های با رطوبت ساخت کمتر، بیشتر از نمونه‌های با رطوبت ساخت بیشتر در آزمایش تر و خشک شدن می‌باشد. افزایش سیکل‌تر- خشک شدن سبب کاهش درصد جذب آب می‌شود. حداقل درصد کاهش وزن مربوط به نمونه COL3-8 می‌باشد و کاهش وزن آن در محدود مجاز آیین‌نامه با مقدار حدود ۱۴٪ می‌شود. درصد تغییر حجم نمونه با رطوبت ساخته ۸ و ۶٪ به ترتیب برابر ۲۷٪ و ۲۱٪ می‌باشد. لذا اصلاح خاک با آهک، برعکس اصلاح با سیمان، سبب افزایش حجم نمونه می‌شود.

این آزمایش هدف تعیین درصد جذب آب، کاهش وزن و تغییر حجم نمونه‌ها با رطوبت‌های ساخت ۶ و ۸ درصد طبق روش B استاندارد ASTM D-559 برای ۱۲ سیکل (هر سیکل ۴۸ ساعت) انجام می‌شود. در پایان انجام ۱۲ سیکل، بر روی نمونه‌ها آزمایش تک‌محوری فشاری و کششی غیرمستقیم بر طبق استانداردهای ذکر شده انجام می‌شود. جدول ۸ نتایج اندازه‌گیری جذب آب، تغییر دانسیته و تغییر حجم در آزمایش تر و خشک شدن نمونه COL3 را نشان می‌دهد. کمترین درصد جذب آب در سیکل اول، حداقل و حداکثر برای نمونه COL3-8 می‌باشد. به طور کلی درصد

جدول ۸ نتایج اندازه‌گیری جذب آب، تغییر دانسیته و تغییر حجم در آزمایش تر- خشک شدن نمونه COL3

Moisture of Tamping (%)		6	8
Moisture absorption percentage after wetting and drying cycles	Average	61.59	13.45
	Max Cycle 1	96.51	36.99
	Min Cycle 12	47.59	2.13
Weight loses (%)		-16.05	-14.19
Volume changes (%)		2.15	2.74

آزمایش‌های دینامیکی سه‌محوری قطر بزرگ

است. مقدار ضریب پواسون نمونه برای نمونه اصلاح شده با ۳٪ آهک و اصلاح نشده حدود ۰/۱۸۷ و ۰/۳۶۸ به دست آمد. اندازه‌گیری نشست تجمعی نمونه‌ها در پایان آزمایش سیکلی ارزیابی شده است. فرکانس بارگذاری ۱۰، ۵ و ۲ هرتز بر نمونه‌های اعمال شد.

آزمایش تعیین مدول و نسبت میرایی و مدول برجهنگی روی دو نمونه خاک اصلاح نشده و اصلاح شده با ۳٪ آهک با دانسیته خشک ۲/۲ گرم بر سانتی متر مکعب و عمل‌آوری خشک انجام شد. قطر و ارتفاع نمونه به ترتیب ۲۰ و ۴۰ سانتی متر است و آزمایش با دستگاه سه‌محوری قطر بزرگ مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی انجام شد. برنامه آزمایش‌های تعیین مدول برشی و میرایی در جدول ۹ ارائه شده

ساخت و عمل آوری نمونه اصلاح شده با ۳٪ آهک

این نمونه اصلاح شده از مخلوط خاک با ۳٪ آهک و رطوبت ۸٪ ساخته شد. نمونه بعد از ساخت ۴ روز در دمای معمولی عمل آوری شد و ۳ روز در اتاق رطوبت قرار گرفت و ۳ روز در گرمخانه در دمای ۷۱ درجه قرار گرفت و ۱۲ روز دیگر در اتاق رطوبت قرار گرفت و سپس بعد از قرار گرفتن دمای معمولی به صورت خشک تحت آزمایش قرار گرفت.

ساخت و عمل آوری نمونه خاک اصلاح نشده

این نمونه بدون افزودن هر گونه ماده اصلاح کننده با قطر ۲۰ و ارتفاع ۴۰ سانتی متر ساخته شد. برای این نمونه شرایط عمل آوری خشک (ساخته شده با رطوبت ۶٪) در نظر گرفته شد. به طوری که بعد از ۳ روز گیرش اولیه، نمونه به مدت ۴ روز در رطوبت ۱۰۰٪ و دمای ۲۱ درجه قرار گرفت. در ادامه به مدت ۶۱ ساعت در دمای ۷۱+ درجه (حداکثر دما در کویر شهداد ۷۶ درجه) در گرمخانه قرار داده شد و بعد از ۲۴ ساعت قرار دادن در اتاق رطوبت، در دوازدهمین روز عمل آوری تحت آزمایش دینامیکی قرار گرفت.

جدول ۹. برنامه آزمایش های تعیین مدول برشی و میرایی

No. of Sequence	Effective Confining Pressure (kg/cm ²)	Initial Axial Stress (kg/cm ²)	Frequency (Hz)	γ'_m (kg/cm ²)
0	103.4	ISO(0)	10,5,2	1.034
		103.4	10,5,2	1.379
1	20.7	ISO(0)	10,5,2	0.207
		20.7	10,5,2	0.276
		41.4	10,5,2	0.345
		62.1	10,5,2	0.414
2	34.5	ISO(0)	10,5,2	0.345
		34.5	10,5,2	0.460
		68.9	10,5,2	0.575
		103.4	10,5,2	0.690
3	68.9	ISO(0)	10,5,2	0.689
		68.9	10,5,2	0.919
		103.4	10	1.034
		137.4	10,5,2	1.147
4	103.4	206.8	10,5,2	1.378
		ISO(0)	10,5,2	1.034
		68.9	10,5,2	1.264
5	137.9	206.8	10,5,2	1.723
		ISO(0)	10,5,2	1.379
		103.4	10,5,2	1.724
		137.9	10,5,2	1.839
		275.8	10,5,2	2.298

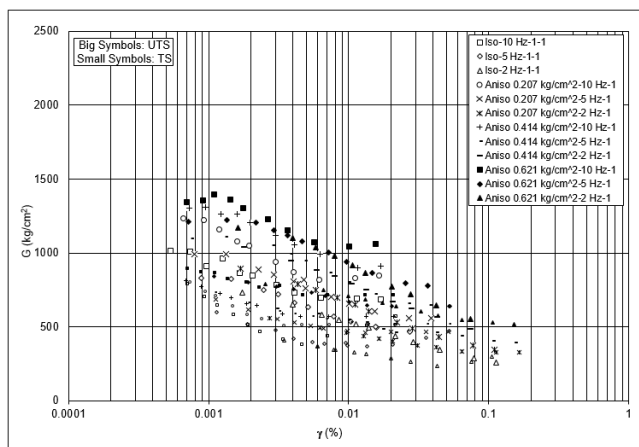
مدول برشی

٪ تا حداکثر ۱۵٪ می باشد. همانطوریکه انتظار می رفت با افزایش تنش محدودکننده و غیرهمسانی تنش در سطح کرنش های یکسان مقادیر G به صورت جزئی افزایش می یابد. در اکثر موارد در تنش های محدودکننده یکسان و فرکانس ثابت با افزایش کرنش (γ) مقادیر G کاهش می یابد. همچنین افزایش فرکانس باعث افزایش مدول برشی می شود. حداکثر مدول

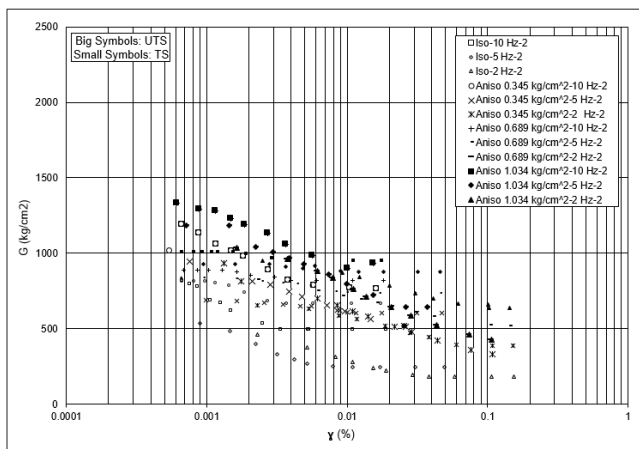
نتایج G در برابر γ (به صورت مقدار سیکل ۱۰ در کرنش های کوچک) برای مصالح در تنش های محدود کننده همسان ۰/۲۰۷، ۰/۳۴۵، ۰/۶۸۹، ۱/۰۳۴، ۱/۳۷۹ کیلوگرم بر مترمربع و غیرهمسانی مختلف و فرکانس بارگذاری ۲، ۵ و ۱۰ هرتز و شکل موج سینوسی به ترتیب در شکل های ۵ تا ۱۰ ارائه شده است. محدوده کرنش های اندازه گیری شده از ۰/۰۰۰۴

برشی برای نمونه اصلاح شده با ۳٪ آهک حدود ۲۵۰۰ کیلوگرم بر متر مربع و برای نمونه اصلاح نشده حدود ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مربع است. برعکس روندهای مشاهده شده برای خاک اصلاح شده با آهک، روند تغییرات مدول برشی با افزایش کرنش برای خاک اصلاح نشده همواره کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۸ کمتر شدن مقادیر مدول برشی-کرنش برشی نمونه

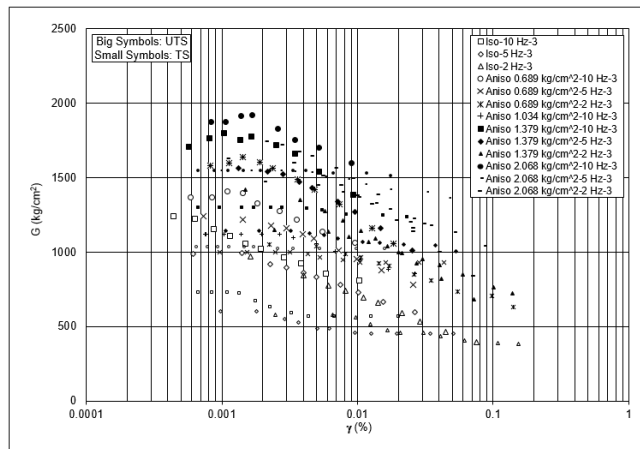
خاک اصلاح شده با ۳٪ آهک نسبت به خاک اصلاح نشده در مرحله ۴ بارگذاری در تنش‌های محدودکننده ۱/۰۳۴ نسبت به ابتدای بارگذاری (مراحل ۰-۳) تحت فرکانس‌های ۲، ۵ و ۱۰ هرتز و غیرهمسانی مختلف (همسان و غیرهمسان) شاید به علت ایجاد ترک در اثر سابقه بارگذاری در نمونه اصلاح شده است.



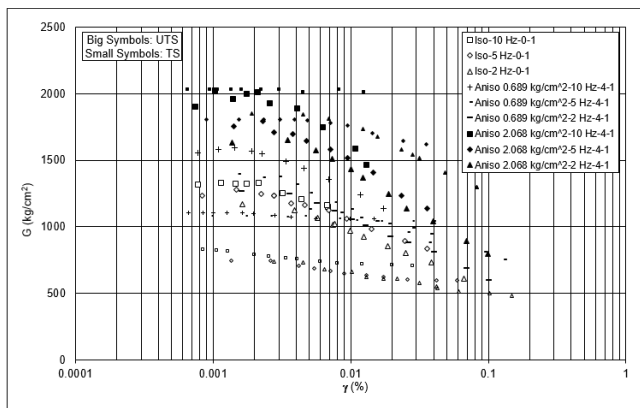
شکل ۵. نتایج مدول برشی-کرنش برشی در تنش‌های محدودکننده ۰/۲۰۷ کیلوگرم بر سانتی متر تحت فرکانس‌های ۲، ۵ و ۱۰ هرتز تحت غیرهمسانی مختلف (همسان و غیرهمسان) - خاک اصلاح نشده (UTS)، خاک اصلاح شده (TS)



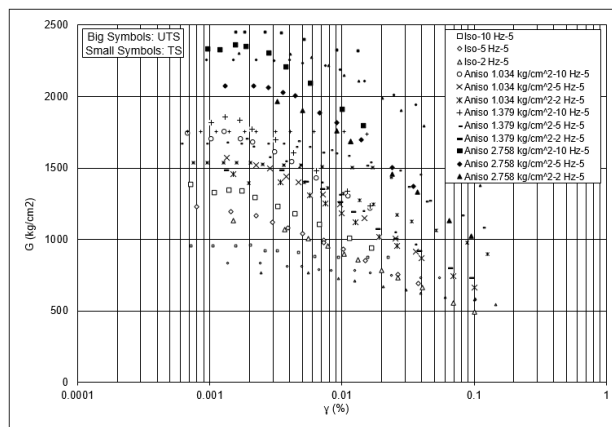
شکل ۶. نتایج مدول برشی-کرنش برشی در تنش‌های محدودکننده ۰/۳۴۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع تحت فرکانس‌های ۲، ۵ و ۱۰ هرتز تحت شرایط غیرهمسانی مختلف (همسان و غیرهمسان) - خاک اصلاح نشده (UTS)، خاک اصلاح شده (TS)



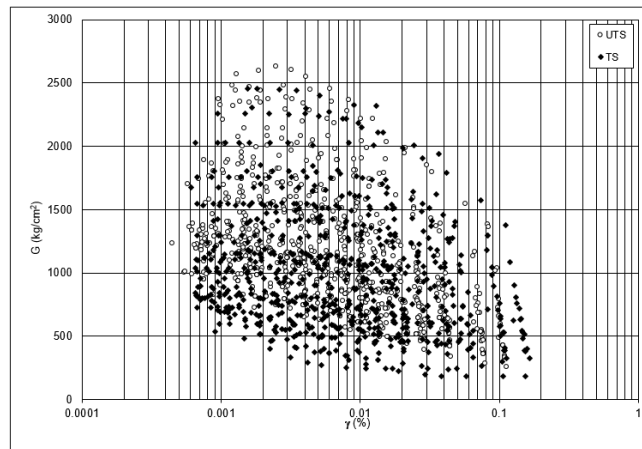
شکل ۷. نتایج مدول برشی- کرنش برشی در تنش‌های محدودکننده ۰/۶۸۹ کیلوگرم بر سانتی مترمربع تحت فرکانس‌های ۲، ۵ و ۱۰ هرتز تحت غیرهمسانی مختلف (همسان و غیرهمسان) - خاک اصلاح‌نشده (UTS)، خاک اصلاح‌شده (TS)



شکل ۸. نتایج مدول برشی- کرنش برشی در تنش‌های محدودکننده ۱/۰۳۴ کیلوگرم بر سانتی متر مربع تحت فرکانس‌های ۲، ۵ و ۱۰ هرتز تحت غیرهمسانی مختلف (همسان و غیرهمسان) - خاک اصلاح‌نشده (UTS)، خاک اصلاح‌شده (TS)



شکل ۹. نتایج مدول برشی- کرنش برشی در تنش‌های محدودکننده ۱/۳۷۹ کیلوگرم بر سانتی متر مربع تحت فرکانس‌های ۲، ۵ و ۱۰ هرتز تحت غیرهمسانی مختلف (همسان و غیرهمسان) - خاک اصلاح‌نشده (UTS)، خاک اصلاح‌شده (TS)

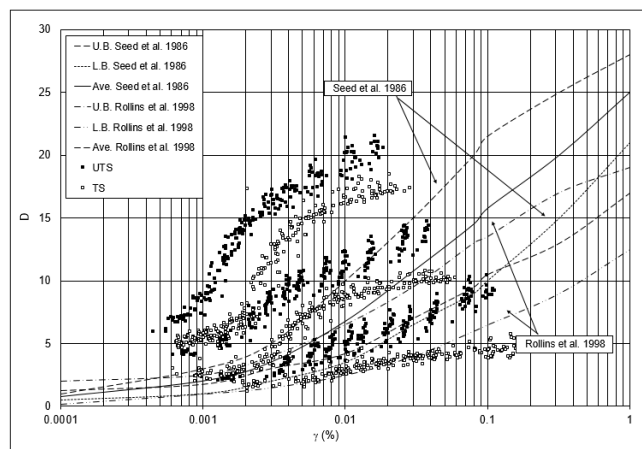


شکل ۱۰. نتایج مدول برشی- کرنش برشی در تنش‌های محدودکننده مختلف تحت فرکانس‌های ۲، ۵ و ۱۰ هرتز تحت غیرهمسانی مختلف (همسان و غیرهمسان) - خاک اصلاح‌نشده (UTS)، خاک اصلاح‌شده (TS)

نسبت میرایی

اصلاح‌شده اثر عوامل دیگر روی نسبت میرایی در مقایسه با فرکانس اندک است در حالی که برای نمونه اصلاح‌نشده اثر عوامل دیگر روی نسبت میرایی در مقایسه با فرکانس اندکی بیشتر از دیگر نمونه‌های اصلاح‌شده (ترک نخورده) است. به طوری که نسبت میرایی نمونه خاک طبیعی خشک در فرکانس‌های ۱۰، ۵ و ۲ هرتز به طور متوسط حداقل ۱۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ از مقادیر نظیر نمونه خاک اصلاح‌شده با آهک بیشتر است.

در شکل ۱۱ نتایج $D-\gamma$ در تنش‌های محدودکننده همسان و غیرهمسانی‌های متفاوت و فرکانس‌های مختلف تحت موج سینوسی ارائه شده‌است. منحنی Seed و همکاران (۱۹۸۶) و Rollins و همکاران (۱۹۹۸) برای اهداف مقایسه‌ای ارائه شده است. افزایش فرکانس سبب افزایش نسبت میرایی می‌شود. حداکثر نسبت میرایی برای فرکانس ۲، ۵ و ۱۰ هرتز برای نمونه اصلاح‌شده به ترتیب ۵٪، ۱۰٪ و ۱۸٪ و برای نمونه اصلاح‌نشده به ترتیب ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۲٪ می‌باشد. برای نمونه



شکل ۱۱. نتایج $D-\gamma$ در تنش‌های محدودکننده همسان و غیرهمسانی‌های متفاوت و فرکانس‌های مختلف تحت موج سینوسی خاک اصلاح‌نشده (UTS)، خاک اصلاح‌شده (TS)

آزمایش تعیین مدول برجهندگی

تنش همه جانبه و محوری صفر شده نمونه از دستگاه خارج می‌شود و درصد رطوبت نمونه اندازه‌گیری می‌شود. در جدول ۱۰ برنامه و نتایج آزمایش تعیین مدول برجهندگی، مدول برشی، نسبت میرایی، کرنش برشی تحت تنش‌های متوسط مختلف (AASHTO T307) ارائه شده است.

در جدول ۱۱ متوسط مقادیر پارامترهای مختلف در حالت تنش محدود کننده همسان (ASTM D399) و طبق AASHTO T307 شامل نتایج مدول برجهندگی و مدول برشی، نسبت میرایی و کرنش برشی برای دو نمونه اصلاح نشده و اصلاح شده ارائه شده است. با افزایش تنش متوسط مقادیر مدول برجهندگی به صورت خطی افزایش می‌یابد. افزایش فرکانس بارگذاری سبب افزایش مدول‌های برجهندگی، مدول برشی و نسبت میرایی می‌شود، اما افزایش فرکانس سبب کاهش کرنش برشی اعمالی بر نمونه می‌شود. مقادیر متوسط مدول برجهندگی طبق AASHTO T307 برای فرکانس‌های ۱، ۵ و ۲ هرتز برای نمونه اصلاح نشده به ترتیب ۳۰۱۳، ۲۳۹۲ و ۲۱۶۷ و برای نمونه اصلاح شده به ترتیب ۳۰۲۷، ۲۵۳۰ و ۲۲۷۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر می‌باشد. مقادیر دامنه کرنش برشی اعمالی نظیر برای فرکانس‌های ۱، ۵ و ۲ هرتز برای نمونه اصلاح نشده به ترتیب ۰/۰۲۳۸٪ و ۰/۰۳۰۵٪ و نسبت میرایی نمونه اصلاح نشده به ترتیب حدود ۱۹/۷٪، ۱۲/۹٪ و ۶/۷٪ می‌باشد. متوسط مقادیر دامنه کرنش برشی اعمالی نظیر برای فرکانس‌های ۱، ۵ و ۲ هرتز برای نمونه اصلاح شده به ترتیب ۰/۰۱۶۲٪، ۰/۰۲۶۷٪ و ۰/۰۲۸۶٪ و نسبت میرایی نمونه اصلاح نشده به ترتیب حدود ۱۷/۲٪، ۹/۹٪ و ۳/۸٪ می‌باشد. مطابق جدول ۱۱ نسبت مقادیر پارامترهای مختلف در حالت تنش محدود کننده همسان به غیرهمسان (AASHTO T307) به ترتیب برای مدول برجهندگی، مدول برشی، نسبت میرایی و کرنش برشی برای خاک اصلاح نشده به ترتیب ۰/۶۹، ۰/۷، ۱/۰۲، ۰/۹۶ و برای خاک اصلاح شده به ترتیب ۰/۵۶، ۰/۵۶، ۱/۳۲، ۰/۳۲ است. مقادیر پارامترهای نمونه اصلاح نشده به اصلاح شده شامل مدول برجهندگی، مدول برشی، نسبت میرایی و کرنش برشی به ترتیب ۱/۱۹، ۱/۱۴، ۱/۴۴، ۰/۶۶ برای شرایط همسان و ۰/۹۱، ۱/۴ و ۰/۹ برای شرایط غیر همسان است.

مدول برجهندگی بیان‌کننده رابطه تنش- تغییر شکل لایه‌های روسازی است. نتایج حاصل از این آزمایش در طراحی لایه‌های روسازی کاربرد دارد و به نحوی برای پاسخ لایه‌های روسازی (اساس و زیراساس) و بستر در اثر بارگذاری ناشی از عبور و مرور وسایل نقلیه را شبیه‌سازی می‌کند. در اثر اعمال σ_{cyclic} (تنش سیکلی) در ۵ چرخه آخر از هر مرحله بارگذاری، متوسط تغییر شکل قابل برگشت هر دو GS (ϵ_r) اندازه‌گیری شده و کرنش برجهندگی (ϵ_r) از تقسیم ϵ_r بر طول اولیه نمونه (L) به دست آمده و سپس مدول برجهندگی (M_r) از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_r}{L} \quad M_r = \frac{\sigma_{cyclic}}{\epsilon_r} \quad (1)$$

در آزمایش‌های اخیر بارهای سیکلی به صورت سینوسی اعمال می‌شود. در این تحقیق برای بارگذاری اساس فرودگاه، فرکانس ۲ Hz و برای وسایل نقلیه جاده‌ای فرکانس ۵ Hz و ۱۰ Hz انتخاب شده است. به منظور آماده سازی نمونه حداقل ۵۰۰ چرخه بارگذاری مرحله صفر انجام می‌شود اما اگر تغییر شکل قائم نمونه ثابت نشود باید تا ۱۰۰۰ چرخه بارگذاری ادامه یابد. در این مرحله باید تغییر شکل قائم توسط LVDT و حسگرهای غیرتماسی (GS) قرائت شود و نسبت تغییر شکل قائم از رابطه (۲) محاسبه شود. در صورتی که این نسبت از ۱/۳ بیشتر شود نمونه به درستی قرار نگرفته است و باید آزمایش متوقف شود. اگر به هر دلیلی کرنش برگشت‌ناپذیر بیشتر از ۵٪ شود باید آزمون متوقف شود و پس از بررسی شرایط تراکم و مصالح نمونه دوباره بازسازی شود.

(۲)

$$\frac{Y_{max}}{Y_{min}}$$

در رابطه (۲)، Y_{min} و Y_{max} به ترتیب تغییر شکل قائم بزرگ‌تر و کوچک‌تر قرائت شده از دو LVDT یا GS است.

پس از آن به همین ترتیب تا اتمام مرحله سطح تنش‌ها بالا برده شده و مدول برجهندگی محاسبه می‌شود. اگر پس از اتمام مراحل، کرنش ماندگار کمتر از ۵٪ بود فشار محفظه‌ای به ۰/۳۴۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع تغییر داده می‌شود و بارگذاری برشی سریع به صورت کرنش ثابت با نرخ ۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه تا رسیدن به یکی از سه حالت زیر ادامه داده می‌شود: کاهش مقاومت با افزایش کرنش، رسیدن به کرنش ۵٪ و رسیدن به حداکثر توان اسمی دستگاه. پس از اتمام آزمایش

جدول ۱۰. برنامه و نتایج آزمایش تعیین مدول برجهندگی، مدول برشی، نسبت میرایی، کرنش برشی تحت تنشهای متوسط مختلف (AASHTO)

(T307) خاک اصلاح شده با ۳٪ آهک و خاک اصلاح نشده و عمل آوری خشک - خاک اصلاح نشده (UTS)، خاک اصلاح شده (TS)

σ_3 (kg/cm ²)	Initial Axial Stress (kg/cm ²)	Frequency (Hz)	M_r (kg/cm ²)		G (kg/cm ²)		D (%)		Shear Strain (%)		σ'_m (kg/cm ²)
			UTS	TS	UTS	TS	UTS	TS	UTS	TS	
103.4	ISO(0)	10	2922	2647	1159	1115	17.6	18.4	0.0069	0.0205	1.034
	ISO(0)	5	1925	2576	837	1085	13.5	9.7	0.0359	0.0263	1.034
	ISO(0)	2	1689	2218	734	934	6.9	3.6	0.0384	0.0257	1.034
	103.4	10	3574	3866	1554	1629	18.3	16.6	0.0095	0.0155	1.379
	103.4	5	2726	3215	1082	1354	12.3	9.0	0.0253	0.0160	1.379
	103.4	2	2568	2844	1019	1198	5.6	3.0	0.0260	0.0173	1.379
20.7	ISO(0)	10	1745	1204	693	507	18.5	16.2	0.0064	0.0136	0.207
	ISO(0)	5	1355	878	538	370	11.9	8.6	0.0104	0.0136	0.207
	ISO(0)	2	1385	675	550	284	5.3	2.9	0.0086	0.0202	0.207
	20.7	10	2050	1294	814	545	19.6	15.4	0.0062	0.0073	0.276
	20.7	5	1767	1098	701	463	11.6	8.9	0.0075	0.0131	0.276
	20.7	2	1749	1044	694	440	5.7	3.0	0.0083	0.0127	0.276
	41.4	10	2269	1644	900	692	20.3	17.1	0.0116	0.0133	0.345
	41.4	5	1819	1246	722	525	12.9	9.9	0.0156	0.0214	0.345
	41.4	2	1889	1100	749	463	6.3	3.7	0.0135	0.0221	0.345
	62.1	10	2657	2221	1054	936	20.3	17.1	0.0158	0.0209	0.414
	62.1	5	2000	1519	794	640	13.1	9.5	0.0257	0.0204	0.414
	62.1	2	1939	1518	769	640	6.4	3.6	0.0204	0.0220	0.414
34.5	ISO(0)	10	1918	1472	761	620	21.6	17.0	0.0161	0.0189	0.345
	ISO(0)	5	1428	983	567	414	13.2	10.1	0.0147	0.0304	0.345
	ISO(0)	2	1299	439	516	185	7.3	4.8	0.0218	0.0582	0.345
	34.5	10	2272	1981	901	835	21.4	16.4	0.0101	0.0108	0.460
	34.5	5	1818	1468	722	618	13.5	9.8	0.0153	0.0178	0.460
	34.5	2	1797	1228	713	517	6.9	3.8	0.0137	0.0188	0.460
	68.9	10	2323	2508	922	1057	19.8	16.9	0.0118	0.0182	0.575
	68.9	5	1867	1803	741	759	13.6	9.9	0.0276	0.0307	0.575
	68.9	2	1591	1455	631	613	7.0	3.9	0.0292	0.0314	0.575
	103.4	10	2752	2844	1092	1198	20.2	17.0	0.0099	0.0177	0.690
	103.4	5	1927	2149	765	905	13.7	9.9	0.0264	0.0318	0.690
	103.4	2	1567	1663	622	700	7.7	3.8	0.0442	0.0410	0.690
68.9	ISO(0)	10	2025	1685	804	710	20.2	17.1	0.0104	0.0202	0.689
	ISO(0)	5	1505	1189	597	501	13.8	10.0	0.0265	0.0507	0.689
	ISO(0)	2	1343	967	533	407	7.7	3.8	0.0288	0.0618	0.689
	68.9	10	2669	3023	1059	1273	19.5	17.1	0.0098	0.0159	0.919
	68.9	5	2210	2221	877	935	12.4	9.3	0.0150	0.0161	0.919
	68.9	2	1975	2152	784	907	6.4	3.3	0.0208	0.0170	0.919
	103.4	10	2923	2029	1160	855	19.6	17.1	0.0128	0.0264	1.034
	137.4	10	3476	2938	1379	1237	18.8	17.3	0.0094	0.0232	1.147
	137.4	5	2552	2477	1013	1043	13.1	9.9	0.0254	0.0376	1.147
	137.4	2	2067	2163	820	911	7.5	3.9	0.0418	0.0404	1.147
	206.8	10	4010	3594	1591	1514	18.4	17.6	0.0092	0.0175	1.378
	206.8	5	3496	3253	1387	1370	11.1	10.6	0.0139	0.0477	1.378
206.8	2	3333	2702	1323	1138	4.6	4.2	0.0130	0.0535	1.378	
103.4	68.9	10	2862	2513	1136	1059	19.8	17.4	0.0174	0.0148	1.264
	68.9	5	2413	2494	958	1051	12.5	10.0	0.0263	0.0169	1.264
	68.9	2	2213	2445	878	1030	6.0	4.6	0.0267	0.0131	1.264
	206.8	10	3682	4770	1461	2009	19.2	17.7	0.0132	0.0124	1.723
	206.8	5	2869	3850	1138	1622	13.5	10.5	0.0361	0.0354	1.723
	206.8	2	2248	3341	892	1407	8.3	4.1	0.0693	0.0484	1.723
137.9	ISO(0)	10	2346	2070	931	872	20.6	17.5	0.0170	0.0224	1.379
	ISO(0)	5	1748	1742	694	734	14.2	9.8	0.0376	0.0392	1.379
	ISO(0)	2	1672	1406	664	592	7.6	4.2	0.0405	0.0597	1.379
	103.4	10	3061	3569	1215	1504	20.1	17.8	0.0165	0.0171	1.724
	103.4	5	2542	3026	1009	1275	12.9	9.9	0.0255	0.0312	1.724
	103.4	2	2399	2777	952	1170	6.4	4.0	0.0259	0.0260	1.724
	137.9	10	3124	4129	1240	1739	21.1	18.0	0.0162	0.0153	1.839
	137.9	5	2430	3526	964	1485	14.0	10.4	0.0363	0.0278	1.839
	137.9	2	2301	3398	913	1431	7.3	4.1	0.0395	0.0236	1.839
	275.8	10	4507	5501	1788	2317	19.3	18.1	0.0149	0.0131	2.298
	275.8	5	3451	4604	1370	1939	13.1	10.8	0.0350	0.0366	2.298
	275.8	2	2862	4258	1136	1794	8.0	4.4	0.0649	0.0416	2.298

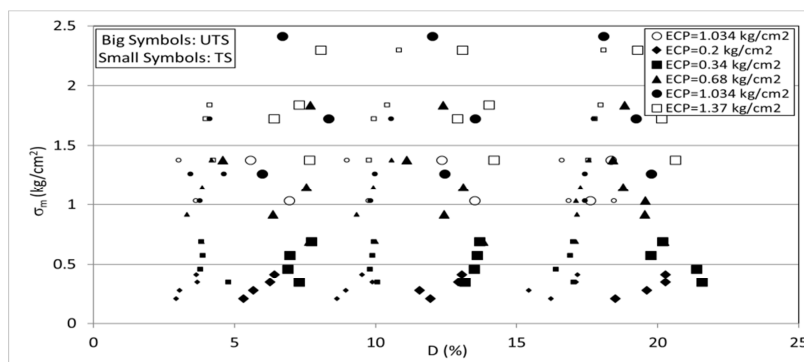
جدول ۱۱. خلاصه نتایج مدول برجهندگی و مقادیر نظیر مدول برشی، نسبت میرایی و کرنش برشی طبق **AASHTO T307** و حالت تنش همسان - خاک اصلاح نشده (UTS)، خاک اصلاح شده (TS)

	Frequency (Hz)	M_r (kg/cm ²)		G (kg/cm ²)		D (%)		Shear Strain (%)	
		UTS	TS	UTS	TS	UTS	TS	UTS	TS
Isotropic Confining Pressure(A)	10	2191	1816	870	765	19.7	17.2	0.0114	0.0191
	5	1592	1474	647	621	13.3	9.6	0.0250	0.0320
	2	1478	1141	599	480	7.0	3.9	0.0276	0.0451
AASHTO T307 (B)	10	3013	3027	1204	1275	19.7	17.2	0.0121	0.0162
	5	2392	2530	950	1066	12.9	9.9	0.0238	0.0267
	2	2167	2273	860	957	6.7	3.8	0.0305	0.0286
A/B		0.69	0.56	0.70	0.56	1.02	1.00	0.96	1.32

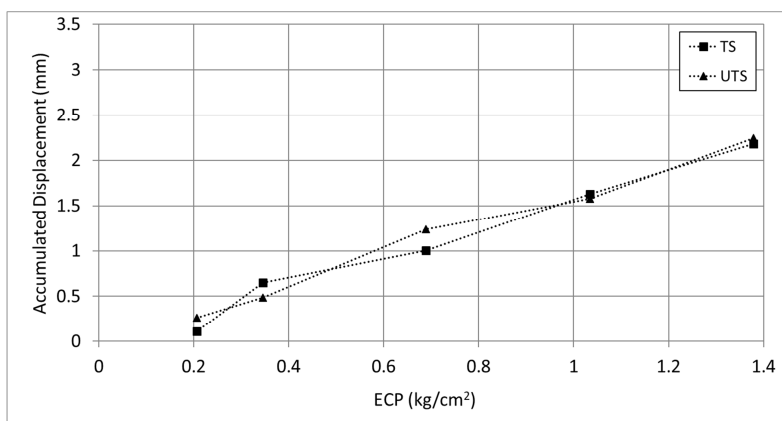
تغییر شکل قائم محوری و تجمعی

در شکل ۱۲ تغییرات تغییر شکل تجمعی محوری ناشی از بار سیکلی در تنش‌های محدود کننده مختلف طبق الگوی بارگذاری **AASHTO T307** برای هر نمونه ارایه شده است. شکل ۱۳ روند تغییر شکل تجمعی محوری در برابر تعداد سیکل بارگذاری تحت فرکانس‌های مختلف طبق **AASHTO T307** برای خاک اصلاح نشده (UTS)، خاک اصلاح شده (TS) را نشان می‌دهد. میزان تغییر شکل تجمعی با افزایش تنش‌های محدود کننده برای خاک طبیعی اصلاح نشده خشک به صورت جزئی بیشتر از خاک اصلاح شده با آهک است.

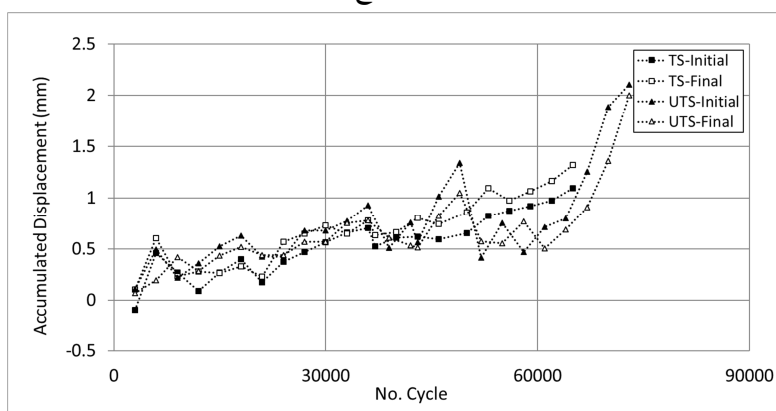
در شکل ۱۱ تغییرات نسبت میرایی در برابر متوسط تنش برای تنش‌های محدود کننده مختلف و فرکانس‌های ۲، ۵ و ۱۰ هرتز نمونه اصلاح نشده و اصلاح شده با ۳٪ آهک ارایه شده است. برای نمونه‌های اصلاح نشده تا تنش متوسط ۰/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر با افزایش تنش متوسط افزایش می‌یابد، ولی برای تنش متوسط بیشتر ۰/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، تغییرات نسبت میرایی ناچیز است. مقادیر نظیر برای نمونه اصلاح شده با آهک حدود ۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. افزایش تنش محدود کننده به طور جزئی سبب کاهش نسبت میرایی می‌شود. ضمناً افزایش فرکانس هم سبب افزایش میرایی می‌شود.



شکل ۱۱. تغییرات نسبت میرایی در برابر تنش متوسط تحت تنش‌های محدود کننده مختلف و فرکانس‌های ۲، ۵ و ۱۰ هرتز خاک اصلاح نشده (UTS)، خاک اصلاح شده (TS)



شکل ۱۲. تغییرات تغییرشکل تجمعی در تنش‌های محدود کننده مختلف طبق الگوی بارگذاری **AASHTO T307** برای نمونه خاک اصلاح نشده (UTS)، خاک اصلاح شده (TS)



شکل ۱۳. روند تغییرشکل تجمعی محوری در برابر تعداد سیکل بارگذاری تحت فرکانس‌های مختلف طبق **AASHTO T307** برای خاک اصلاح نشده (UTS)، خاک اصلاح شده (TS)

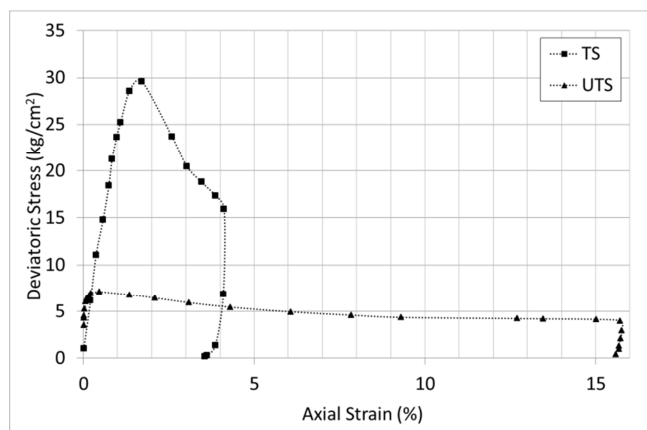
نتایج آزمایش مونوتونیک پساسیکلی

است. محاسبات برای این بخش از کرنش انجام شده است که قدری با رفتار خاکهای دانه ای مجزا و چسبیده ریزدانه متفاوت است. رفتار در این بخش شبیه نمونه خاک‌های سیمانته قوی و سنگ‌ها می‌باشد (آقایی و همکاران ۲۰۲۱). بعد از رسیدن به مقاومت حداکثری در حدود ۳۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر نمونه رفتار نرم شوندگی از خود نشان می‌دهد. مقدار این مقدار قابل مقایسه با مقادیر آزمایش تک‌محوری برای نمونه‌های اصلاح شده شده با ۳٪ آهک بعد آزمایش‌های تر-خشک شدن، یخبندان-ذوب، نمونه تحت عمل‌آوری معمولی، و خاک طبیعی (بدون مواد تثبیت‌کننده) به ترتیب با مقادیر ۲۵، ۳/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر، ۲۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر و (۳/۹-۲/۴) کیلوگرم بر سانتی‌متر) برای زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه می‌باشد. لازم به ذکر است که براساس نتایج بررسی عمل‌آوری یخبندان و ذوب و

پس از آزمایش تعیین مدول برجهندگی، مدول برشی و نسبت میرایی، آزمایش پساسیکلی روی نمونه‌ها انجام شد. با این آزمایش حدودی از مقاومت فشاری تک‌محوری و منحنی تنش-کرنش بدست می‌آید. آزمایش تحت تنش محدود کننده ۰/۳۴۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر با اعمال مکش و با سرعت بارگذاری ۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه انجام می‌شود. به توجه به در دسترس بودن محیط پیرامونی نمونه اندازه‌گیری تغییر قطر نمونه در چند تراز مختلف فراهم است. در شکل ۱۴ الف و ب نمودار تنش تفاضلی-کرنش محوری پساسیکلی برای نمونه اصلاح شده با ۳٪ آهک و نمونه اصلاح نشده ارائه شده است. رفتار سخت شوندگی نمونه اصلاح شده بعد از کرنش ۰/۰۱٪ (در مقیاس لگاریتمی) و قبل مقاومت حداکثر و رفتار نرم‌شوندگی نمونه اصلاح نشده بعد از کرنش ۰/۰۵٪ جالب توجه

پایین (تا قبل از کرنش ۰/۵٪) رفتار هر دو نمونه اصلاح شده و اصلاح نشده با هم مشابه است.

ترخشک، نمونه خاک اصلاح شده با ۳٪ آهک به عنوان اساس برای شرایط خشک مناسب و زیراساس برای شرایط روسازی صلب مناسب است. نتایج نشان می‌دهد در کرنش‌های



شکل ۱۴. نمودار تنش تفاضلی-کرنش محوری آزمایش مونوتونیک پسا سیکلی خاک اصلاح نشده (UTS)، خاک اصلاح شده (TS)

برای نمونه اصلاح نشده بیش از ۵۰ میلی‌متر (تغییر شکل تجمعی ۱/۲۵ میلی‌متر بارهای سیکلی) می‌باشد. مقدار ضریب پواسون نمونه برای نمونه اصلاح شده و اصلاح نشده حدود ۰/۱۸۷ و ۰/۲۶ به دست آمد. بیشتر ترک‌های طولی در بخش بالایی نمونه اصلاح شده (۲۰ بالای نمونه سانتی‌متر) تمرکز است. در صورتیکه نمونه اصلاح نشده به صورت تقریباً خمیره‌ای تغییر شکل داد (شکل ۱۵). مقاومت پسماند نمونه اصلاح نشده و اصلاح شده با آهک به ترتیب در کرنش حدود ۰/۱۵ و ۰/۴ به نصف مقاومت حداکثر تقلیل می‌یابد.

تغییرات قطر نمونه به ترتیب با فواصل در ارتفاع ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۵ سانتیمتر از بالای نمونه برای نمونه اصلاح شده حدود ۶۵/۱، ۶۷/۷، ۶۸، ۶۳/۲، ۶۳، ۶۳ و برای نمونه اصلاح نشده حدود ۰، ۷۶، ۸۴، ۷۰، ۶۴/۵، ۰ میلی‌متر می‌باشد. متوسط ارتفاع نمونه بعد آزمایش با اندازه‌گیری در ۸ نقطه برای نمونه اصلاح شده و اصلاح نشده به ترتیب حدود ۴۰/۵ سانتی‌متر و حدود ۳۵ سانتی‌متر به دست آمد. تغییر شکل ماندگار بعد از آزمایش مونوتونیک پسا سیکلی نمونه اصلاح شده ۱۵/۹ میلی‌متر (تغییر شکل تجمعی ۱/۲۵ میلی‌متر بارهای سیکلی) و

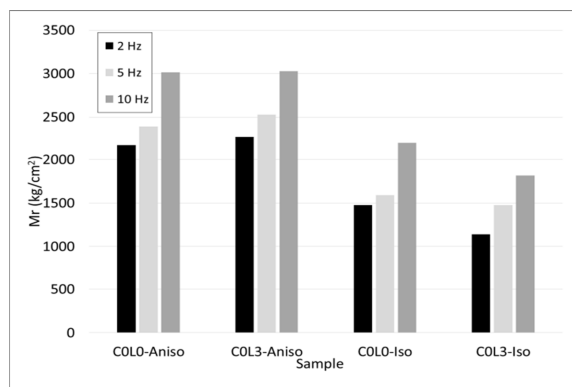


شکل ۱۵. ترک‌ها و تغییر شکل مشاهده شده در نمونه‌ها در آزمایش مونوتونیک پسا سیکلی ۱. نمونه اصلاح شده با ۳٪ آهک
۲. نمونه اصلاح نشده

بررسی کفایت روشی اصلاحی برای کاربری به عنوان زیراساس راه و ارتباط بین CBR و مدول برجهندگی

(Aniso) ارایه شده است. ملاحظه می‌شود که تفاوت چندانی بین مقادیر مدول برجهندگی نمونه‌های اصلاح نشده و اصلاح شده وجود ندارد. مقایسه مدول سکانتی حاصل از آزمایش‌های استاتیکی با سه محوری نتایج مشاهده می‌شود مدول سکانتی به دست‌آمده از آزمایش تک‌محوری برای نمونه اصلاح‌شده با ۳ درصد آهک تقریباً تطابق خوبی با نتایج آزمایش سه‌محوری سیکلی دارد. محدوده ضرایب برجهندگی نمونه اصلاح‌شده با ۳٪ آهک، تحت شرایط خشک- تر در دامنه مجاز روسازی آسفالتی بر اساس نشریه ۲۳۴ قرار دارد. با توجه به مدول برجهندگی به دست‌آمده برای خاک اصلاح‌شده می‌توان ادعا کرد مقادیر CBR بالا لزوماً به مقادیر بالای مدول برجهندگی منجر نخواهد شد. لذا برای خاکهای اصلاح شده (مثلاً با آهک) با توجه به محدودیت بارگذاری اکثر دستگاه‌های معمول آزمایش CBR با ظرفیت زیر ۳ تن می‌توان از مقادیر CBR با نفوذ ۱,۲۵ میلی‌متر به جای نفوذ ۵ میلی‌متر در نمودارهای محاسبه مدول برجهندگی نشریه ۲۳۴ آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران بهره گرفت.

حداقل ضرایب برجهندگی لایه‌های گوناگون روسازی آسفالتی بر اساس نشریه ۲۳۴ برای خاک بستر (برای شرایط یخچندان)، زیراساس و اساس به ترتیب ۱۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر تا ۳۵۰۰، ۱۰۵۰ و ۱۹۶۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر می‌باشد. مقادیر مدول سکانتی تحت آزمایش تک‌محوری نمونه COL3 برای عمل‌آوری معمولی و تر-خشک با رطوبت ساخت ۸٪ به ترتیب برابر ۲۱۵۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر و ۱۵۳۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر است. در آزمایش مونوتونیک پسا سیکلی سه محوری تحت محدود کننده ۰/۳۴۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مدول سکانتی بارگذاری اولیه برای خاک اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده به ترتیب ۲۵۵۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر و ۲۳۳۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر و مدول بارداری آنها به ترتیب حدود ۲۷۹۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر و ۲۵۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر می‌باشد. در شکل ۱۶ تغییرات مدول برجهندگی در فرکانس‌های مختلف برای دو نمونه اصلاح‌نشده و نمونه اصلاح‌شده با ۳ درصد آهک تحت شرایط تنش محدودکننده همسان (ISO) و غیرهمسان تحت AASHTO T 307



شکل ۱۶. تغییرات مدول برجهندگی در فرکانس‌های مختلف در آزمایش‌های سه محوری

۵- نتیجه‌گیری

دینامیکی برای تعیین مدول برجهندگی، مدول برشی و میرایی در نظر گرفته شد. در نهایت ارتباط بین مدول برجهندگی و مقادیر CBR برای اهداف طراحی ارایه شد. با بررسی مقادیر به دست‌آمده در آزمایش‌های استاتیکی و دینامیکی نتایج زیر به دست آمد:

-افزودن آهک سبب بهبود مقاومت فشاری و برزیلی خاک در خاک خشک می‌شود.

-نتایج نشان داد در تمام نمونه‌ها با افزایش مدت عمل‌آوری مقاومت کششی و فشاری محدود نشده افزایش می‌یابد.

در این تحقیق به بررسی مشخصات خاک طبیعی و اصلاح‌شده با ۳ درصد آهک و کفایت آن برای استفاده به عنوان زیراساس برای روسازی صلب برای تمام شرایط آب و هوایی و اساس برای روسازی انعطالف‌پذیر در شرایط خشک پرداخته شد. ابتدا نمونه‌هایی با ترکیب‌های مختلفی از سیمان، آهک و ماده پلیمری معدنی نیکوفلاک با مدت‌های مختلف عمل‌آوری برای انجام انواع آزمایش‌های استاتیکی مورد نیاز ساخته شدند و در نهایت نمونه خاک خشک و اصلاح‌شده با ۳ درصد آهک به عنوان نمونه مورد بررسی در آزمایش‌های

خاک مورد مطالعه به عنوان اساس، و یا زیراساس با روسازی صلب برای تمام شرایط آب و هوایی استفاده گردد. با توجه به مقادیر به دست آمده از آزمایش CBR و حداقل CBR لازم برای اساس بر اساس آیین‌نامه‌ها توصیه می‌شود مقادیر CBR خاک مورد مطالعه قبل از بررسی کفایت استفاده به عنوان اساس و زیراساس، در ضریب بین ۰٫۴۳ تا ۰٫۲۳ تا متوسطی حدود ۰٫۳۳ ضرب شوند. افزودن آهک به عنوان ماده تثبیت‌کننده هرچند زاویه اصطکاک داخلی خاک را افزایش می‌دهد اما باعث کاهش چسبندگی بین دانه‌ها می‌شود و عملاً اتکای به نتایج آزمایش برش مستقیم در رابطه با خاک‌های اصلاح‌شده با آهک صحیح نیست. نتایج آزمایش سه‌محوری دینامیکی نشان می‌دهد با افزایش تنش محدودکننده و فرکانس مقادیر مدول برشی مدول برجهندگی افزایش می‌یابد. با بیشتر شدن فرکانس بارگذاری میرایی افزایش خواهد یافت. اما اثر عوامل دیگر روی نسبت میرایی در مقایسه با فرکانس اندک است. با بررسی مقادیر مدول برجهندگی به دست آمده می‌توان گفت هرچند ممکن است مقادیر CBR مقداری بیشتر از مقدار لازم توصیه آیین‌نامه‌ها به دست دهد اما این بیشتر بودن لزوماً نشان‌دهنده مقدار بالای مدول برجهندگی نیست.

-استفاده از ترکیب بهینه‌ای از سیمان و آهک و ماده پلیمری نیکوفلاک موجب دسترسی به مقاومت و دوام بالاتر خاک اصلاح‌شده در زمان عمل‌آوری کوتاه می‌شود اما در دراز مدت کاهش شدیدی در مقاومتها و مدول مشاهده می‌شود. افزایش رطوبت نمونه برس‌خورده یخبندان سبب افزایش اندک مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول سکانتی می‌شود اما در نمونه‌های برس‌نخورده یخبندان-ذوب افزایش رطوبت ساخت سبب کاهش مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول سکانتی می‌شود. لذا، استفاده از اصلاح خاک مورد بررسی با آهک برای شرایط یخبندان توصیه نمی‌شود. مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های در آزمایش تر-خشک بیشتر از مقادیر نظیر یخبندان-ذوب است و با افزایش رطوبت افزایش می‌یابد. لذا، توصیه می‌شود نمونه اصلاح‌شده با آهک در شرایط مرطوب کوبیده شود. برای نمونه اصلاح‌شده با آهک نسبت مقاومت فشاری تک‌محوری عمل‌آوری معمولی به عمل‌آوری یخبندان و ذوب عددی بین ۳ تا ۵ است. این نسبت برای مقاومت کشش غیرمستقیم عددی بیش از ۶ است. لذا توصیه می‌شود با توجه به سایر شاخص‌های بررسی شده، نمونه‌های اصلاح‌شده با آهک تنها برای شرایط آب و هوایی تر-خشک برای اصلاح

۶- سپاسگزاری

داده‌های این مقاله از پروژه تحقیقاتی با عنوان "بررسی و ارزیابی مشخصات فنی خاک اساس اصلاح‌شده با آهک و

۷- مراجع

سیمان" با شماره ۱۲۸۹۳-۷-۹۷ مورخ ۱۳۹۷/۶/۱۹ توسط مرکز تحقیقات، راه، مسکن و شهرسازی استخراج شده است.

-آقایی آرابی و همکاران ع.، (۱۳۹۹)، "بررسی تاثیر ماده افزودنی پلیمری-معدنی نیکوفلاک بر روی خاک اصلاح شده با سیمان به عنوان مصالح راه و باند فرودگاه"، کارفرما، پامکو.

I., (2021), "Guideline for test and analysis of static, dynamic and cyclic strength triaxial tests (overview of archived experiments from 300 tests conducted at BHRC)", Research report, BHRC Publication No. 918.

-Andavan, S. and V.K. Pagadala, (2020), "A study on soil stabilization by addition of fly ash and lime", Materials Today: Proceedings, 22, pp. 1125-1129.

-Aghaei Araei, A. Salamat, A.S., Hashemi Tabatabaei, S., Hasni, H., (2022), "Comparison of clayey soil characteristics treated with lime

-آقایی آرابی، ع.، همکاران، (۱۴۰۰)، "ارایه مشخصات فنی خاک اساس اصلاح‌شده با آهک و سیمان، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، شماره نشر: گ-۹۶۴، چاپ اول.

-هاشمی طباطبایی، س.، سلامت، اس.، آقایی آرابی، ع.، (۱۳۹۷)، "مقایسه ویژگی‌های رفتاری خاک‌رسی عمل‌آوری شده با آهک و نانو پلیمر"، مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی.

-معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور، (۱۳۹۰)، نشریه ۲۳۴، "آیین‌نامه طراحی روسازی‌های آسفالتی ایران"، تجدید نظر اول.

-Aghaei Araei, A., Kalantari, F., Ghalandarzadeh, A., Shahnazari, H., Attarchian, N., Rahmani,

- cycling", *Cold Regions Science and Technology*, 161, pp. 32-42.
- Lee, W., Bohra, N. C., Altschaeffl, A. G., & White, T. D., (1997), "Resilient modulus of cohesive soils", 123(2), pp. 131-136.
- Liu, X., Zhang, X., Wang, H., & Jiang, B., (2019), "Laboratory testing and analysis of dynamic and static resilient modulus of subgrade soil under various influencing factors", *Construction and Building Materials*, 195, pp. 178-186.
- Little, N.D. and Nair, S., (2009), "Recommended practice for stabilization of subgrade soils and base materials, The National Academies Press, NCHRP Web-Only Document 144, Texas Transportation Institute, August.
- Mohajerani, A., B.T. Nguyen, and L.J.T.G. Glavacevic, (2016), "Estimation of resilient modulus of unbound granular materials using Clegg impact value and field stress levels", 7, pp. 115-129.
- Singh, S. and H. B. Vasaikar, (2013), "Stabilization of black cotton soil using lime", *Int. J. Sci. Res.*, 4(4), pp. 2090-2094.
- Tian, S., Tang, L., Ling, X., Li, S., Kong, X., & Zhou, G., (2019), "Experimental and analytical investigation of the dynamic behavior of granular base course materials used for China's high-speed railways subjected to freeze-thaw cycles", *Cold Regions Science and Technology*, 157, pp.139-148.
- Tharani, K., Selvan, G. P., Senbagam, T., & Karunakaran, G., (2021), "An experimental investigation of soil stabilization using hybrid fibre and lime", *Materials Today: Proceedings*.
- Zhalehjo, N., Tolooiyan, A., Mackay, R., & Bodin, D., (2018), "The effect of instrumentation on the determination of the resilient modulus of unbound granular materials using advanced repeated load triaxial testing", 14, pp. 190-201.
- Zumrawi, M. M., & Awad, M., (2017), "Estimation of subgrade resilient modulus from soil index properties", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 11(9), pp.816-822.
- and water base nano-polymer", *International journal of mining and Geo-Engineering*, IJMGE-202002-594842, Accepted paper.
- Abu-Farsakh, M., Dhakal, S., & Chen, Q., (2015), "Laboratory characterization of cementitiously treated/stabilized very weak subgrade soil under cyclic loading", 55(3), pp. 504-516.
- Bhuvaneshwari, S., Robinson, R. G., & Gandhi, S. R., (2019), "Resilient Modulus of - Lime Treated Expansive Soil", 37(1), pp. 305-315.
- Bhuvaneshwari, S., Robinson, R. G., & Gandhi, S. R., (2019), "Resilient modulus of lime treated expansive soil", *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(1), pp.305-315.
- Bell, F., (1988), "Stabilisation and treatment of clay soils with lime", Part 1-basic principles. *Ground engineering*, 21(1).
- He, S., Yu, X., Gautam, S., Puppala, A. J., & Patil, U. D., (2018), "Resilient modulus of liquid chemical-treated expansive soils", In *GeoShanghai International Conference*, pp. 114-120, Springer, Singapore.
- He, S., Yu, X., Gautam, S., Puppala, A. J., & Patil, U. D., (2018), "Resilient Modulus of Liquid Chemical-Treated Expansive Soils", in *GeoShanghai International Conference*. Springer.
- Jahandari, S., et al., (2019), "Effects of saturation degrees, freezing-thawing", and curing on geotechnical properties of lime and lime-cement concretes, *Cold Regions Science and Technology*, 160, pp. 242-251.
- James, J., (2020), "Sugarcane press mud modification of expansive soil stabilized at optimum lime content: Strength, mineralogy and microstructural investigation", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Jitha, P., B.S. Kumar, and S. Raghunath, (2020), "Strength development and masonry properties of geopolymer stabilised soil-LPC (lime-pozzolana cement) mixes", *Construction and Building Materials* 250, pp. 118877.
- Liu, Y., Wang, Q., Liu, S., ShangGuan, Y., Fu, H., Ma, B., Yuan, X., (2019a), "Experimental investigation of the geotechnical properties and microstructure of lime-stabilized saline soils under freeze-thaw

Comparison the Resilient Modulus Behavior of Untreated and Treated Soil by Lime as Base and Subbase

Ata Aghaei Araei, Associate Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

Mahmod Ghazavi, Professor, Department of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

Farshad Lashani Zand, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

E-mail: aghaeiarai@bhrc.ac.ir

Received: September 2022- Accepted: February 2023

ABSTRACT

Due to the sharp reduction in budget of civil projects and road construction, the need to use local soil as the base is felt as a way to reduce the final cost of projects. Therefore, this research examines the characteristics of untreated and treated base soil with 3% lime, including uniaxial compressive strengths and indirect tension (Brazilian) test and resilient modulus with different curing times, as well as after performing tests of wet -dry cycles and freezing- thawing. Uniaxial and Brazilian samples with a diameter of 10.1 cm and a height of 11 cm were made in 3 layers with the same thickness and dry density of 2.2 g/cm³ and initial moisture of 6% and 8%. The results show that the addition of lime significantly increases the CBR values and shear strength of the soil. Soil treatment with lime improves its resistance against wetting-drying cycles, but it is not suitable against freezing- thawing cycles. Also, based on the tests to determine the resilience modulus, a comparison was made to determine the relationship between CBR values of untreated and treated soil with lime under hot-dry weather conditions. The results showed that the modulus values of dry untreated soil and lime treated soil are equal. The CBR value (maximum value based on penetration of 2.5 mm or 5 mm) in untreated soil is equal to the same value for penetration of 1.25 mm in lime treated soil. Therefore, for design purposes, it is recommended to use correlation relations of resilience modulus and CBR values for penetration of 1.25 mm for soil treated by lime.

Keywords: Treated Base, Lime, Resilience Modulus, Curing