

## ارزیابی دوام و خواص دینامیکی خاک ماسه سیلتی تثبیت شده به عنوان کاربری مصالح اساس راه و باند

### مقاله علمی - پژوهشی

عطا آقایی آرابی\*، دانشیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران  
فریبا آسوار، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران  
کاظم برخوردار بافقی، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، یزد، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: aghaeiarai@bhrc.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۸ - پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵

صفحه ۲۶-۱

### چکیده

در مقاله حاضر، اثر اصلاح با سیمان و پلیمر معدنی بر روی دوام و خواص دینامیکی خاک ماسه سیلتی مورد استفاده در اساس روسازی، توسط انجام برخی آزمون‌های آزمایشگاهی بررسی شده است. انتخاب نمونه بهینه برای آزمایش سه محوری براساس نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری، برزیلی، تر-خشک و یخبندان-ذوب است. نتایج نشان داد، افزودن پلیمر به همراه سیمان، سبب افزایش مقاومت فشاری در بازه زمانی کوتاه‌تر و حذف مشکلات کاهش حجم ناشی از اصلاح با سیمان می‌شود. نمونه اصلاح شده با ۶/۳ درصد سیمان و ۰/۷ درصد پلیمر به عنوان ترکیب بهینه انتخاب شده است. در آزمون دوام، نمونه‌های تثبیت شده با سیمان-پلیمر عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های تثبیت شده با سیمان نشان دادند و این روند در چرخه‌های تر-خشک محسوس‌تر از ذوب-یخ است. در مرحله آخر نیز آزمایش سه محوری سیکی بر روی ۴ نمونه اصلاح شده با درصد بهینه سیمان و سیمان-پلیمر انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش فرکانس سبب افزایش مدول برجهندگی، مدول الاستیسیته و نسبت میرایی، اما سبب کاهش کرنش محوری شده است. متوسط مقادیر مدول برجهندگی در سطح تنش‌های استاندارد AASHTO T307 برای نمونه‌های اصلاح شده با سیمان-پلیمر بیشتر از مقادیر نظیر نمونه اصلاح شده با سیمان است، ولی روند نسبت میرایی بالعکس است و نمونه‌های سیمانی عملکرد بهتری دارند. به طور کلی، از پلیمر می‌توان به یک جایگزین مناسب برای بخشی از سیمان در تثبیت لایه اساس، در سطح تنش‌های سیکی کم و متوسط (سطح تنش‌های استاندارد AASHTO T307) و شرایط تر-خشک استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: اساس تثبیت شده، سیمان، پلیمر معدنی، رفتار استاتیکی و دینامیکی، دوام

### ۱- مقدمه

شیمیایی خاک با استفاده از سیمان است. مطالعات مختلفی در زمینه تاثیر سیمان بر روی خواص ژئوتکنیکی انواع خاک‌ها بررسی شده است. اساس تثبیت شده با سیمان از سال ۱۹۱۵ به طور گسترده استفاده شده است. هر چند افزودن سیمان باعث افزایش مقاومت و مدول برجهندگی می‌شود، ولی شکل پذیری را کاهش داده و نمونه در کرنش‌های کم‌تری به مقاومت

امروزه با توجه به عدم دسترسی به مصالح خاکی مناسب برای ساخت و سازهای جدید، استفاده از مصالح در دسترس سایت، در صورت تثبیت آن مورد توجه قرار گرفته است. تثبیت خاک می‌تواند وضعیت درجا خاک را بهبود بخشد و نیاز به عملیات هزینه بر جابجایی خاک‌های مسئله دار را از بین ببرد (Nasiri et al., 2016). یکی از روش‌های کاربردی تثبیت، تثبیت

استفاده از روابط تجربی به وسیله مقادیر آزمایش CBR و حتی مقاومت فشاری تک محوری تعیین می‌شود. ولی امروزه با توجه به تجهیزات آزمایشگاهی و امکانات اندازه‌گیری میدانی آن ممکن است (Aghaei Araei et al., 2023).

در این پژوهش نیز جهت بهبود کارایی لایه اساس تثبیت شده با سیمان برای کاربری راه و باند فرودگاه از افزودنی پلیمر معدنی به سیمان استفاده شده است. گزارش‌های محدود ارائه شده در مورد پلیمر معدنی حاکی از آن است، در صورت بکارگیری افزودنی پلیمر معدنی با مصالح مختلف از جمله سنگ شکسته و مخلوط بازیافتی آسفالتی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی را افزایش می‌دهد (BHRC Report, 2020). انتظار می‌رود، استفاده از این نوع پلیمر باعث بهبود عملکرد خاک تثبیت شده با سیمان شود. در واقع هدف پژوهش این است که با تعریف برنامه آزمایشگاهی مناسب، ویژگی‌های مقاومتی هم چون مقاومت تک‌محوری، نسبت باربری کالیفرنیا، مقاومت کششی غیرمستقیم و همچنین پارامترهای دینامیکی از جمله مدول برجهندگی و نسبت میرایی مصالح مخلوط تثبیت شده و نشده تحت بارهای دینامیکی تعیین شود. علاوه براین، آزمایش‌های تعیین دوام شامل تر-خشک و یخندان-ذوب که شرایط بهره‌برداری را شبیه‌سازی می‌کند، به‌عنوان معیاری برای پذیرش مصالح افزودنی انجام شود.

## ۲- پیشنهاد تحقیق

مطالعات آزمایشگاهی مرتبط با موضوع این پژوهش شامل پارامترهای مقاومتی و دینامیکی است. مطالعات آزمایشگاهی شامل تعیین پارامترهای مقاومتی همچون مقاومت تک‌محوری، نسبت باربری کالیفرنیا، مقاومت کششی غیر مستقیم و دوام مصالح تحت شرایط تر-خشک و یخندان-ذوب مخلوط‌های حاوی سیمان تنها و یا همراه با افزودنی‌های دیگر است. در تحقیق (Biswal et al., 2020) تعیین خواص مکانیکی خاک تثبیت شده با سیمان، آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری در حالت خشک و غرقاب، مقاوت برزیلی، مدول خمشی و گسیختگی بررسی شد. هم چنین روابط بین خواص مکانیکی مختلف برای تحلیل روسازی ارائه شد. در تحقیق (Pitthaya et al., 2015) رفتار ماسه سیمانی تثبیت شده با پلیمر را بررسی کرد و نشان داد که اضافه نمودن

حداکثر خود می‌رسد. با توجه به قیمت بالا و همچنین تسریع فرایند تثبیت شیمیایی عمدتاً در ترکیب با تثبیت کننده های دیگر به کار می‌رود (Solanki et al., 2010).

روش‌های طراحی نمونه خاک-سیمان و یا خاک-سیمان-پلیمر در طول چندین دهه تکامل یافته است. استانداردهای ASTM D559 (ASTM, 2011) و ASTM D560 (ASTM, 2015) حداقل میزان سیمان را براساس دوام مصالح ارائه می‌دهند.

اما با گذشت زمان، بسیاری از کدهای ملی با استفاده از معیار مقاومت فشاری محدود نشده برای طراحی خاک-سیمان سازگار شده اند (Mansoorzadeh et al., 2023). اغلب در کدها، طراحی براساس مقاومت فشاری به جای استفاده از استفاده از ASTM D559 و ASTM D560 ترجیح می‌دهند. زیرا آزمایش‌های تر-خشک و یخندان-ذوب نیاز به زمان آزمایش طولانی‌تری دارند. بحث عملکرد و دوام در اثر تکرار بارگذاری بلند مدت و تغییر شرایط اقلیمی و محیطی یکی از مسائل مهم در خصوص لایه روسازی تثبیت شده است، که در یک طرح تثبیت باید در نظر گرفته شود (Mansoorzadeh et al., 2023). تاکنون روش‌های آزمایش متفاوتی برای اندازه‌گیری دوام استفاده شده است که در این میان، آزمایش‌های تر-خشک طبق ASTM D559 (ASTM, 2011) و یخندان-ذوب طبق ASTM D560 (ASTM, 2015) کاربرد بیشتری هستند. کنترل کفایت و دستیابی به اهداف تثبیت با انجام آزمایش‌های مختلفی از جمله مقاومت فشاری تک محوری، کششی غیرمستقیم (برزیلی) و یخندان-ذوب، تر-خشک، مدول برجهندگی و نسبت میرایی قابل اندازه‌گیری است (Jahandari et al., 2019). تا سال ۱۹۸۶ میلادی، عمدتاً از نتایج CBR جهت تعیین خصوصیات مقاومتی لایه‌های روسازی و تعیین ضخامت لایه‌های روسازی استفاده می‌شد. (AASHTO, 2017) AASHTO T307 و ولی CBR پارامتر استاتیکی بوده، و بیانگر وضعیت لایه‌های روسازی تحت بارهای تکراری نمی‌باشد (Ricardo et al., 2007). مدول برجهندگی (Mr) یک پارامتر مهم در طراحی و برآورد ظرفیت باربری روسازی‌ها می‌باشد. مدول برجهندگی لایه اساس بر عملکرد کلی روسازی تاثیر می‌گذارد. این پارامتر به صورت نسبت تنش انحرافی اعمال شده به کرنش محوری برگشت پذیر تحت بار دینامیکی تعریف می‌شود. این پارامتر با

برجهدگی بهتری نسبت به خاک تثبیت شده با سیمان تنها است و در مقابل تنش‌های کششی تکراری، شکست شکل‌پذیرتری از خود نشان می‌دهد. در تحقیق (Hata et al., 2022) پلیمر پلی وینیل در تثبیت مصالح سیمانی بررسی شد. پلیمر پلی وینیل مقاومت فشاری تک محوری را افزایش داد و در ترکیب با هیدراتاسیون سیمان یک نوع چسبندگی ایجاد کرد که سبب پرشدن منافذ خالی خاک شد، ترکیب پیشنهادی تحت سیکل‌های حرارتی نیز قرار گرفت، نتایج نشان داد که مقاومت فشاری تک محوری تحت ۳ دوره سیکل حرارتی، حدود ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. هم چنین با عمل آوری در دمای ۸۰ سانتی‌گراد، مقاومت خاک تثبیت شده با سیمان و پلیمر ۳ برابر کاهش یافته و تقریباً به مقاومت خاک تثبیت نشده رسید. در تحقیق (Soldo & Miletic, 2022) دوام بیوپلیمرها تحت سیکل‌های خشک-ترشدگی در دو نوع خاک ماسه تمیز و ماسه سیلتی بررسی شد. نتایج نشان داد، استفاده از پلیمرها باعث می‌شود حدود ۷۰ درصد جرم اصلی و ۴۵ درصد مقاومت اولیه مصالح حفظ شود. مطالعات آزمایشگاهی تعیین پارامترهای دینامیکی شامل مدول برجهدگی، نسبت میرایی در شرایط تثبیت شده است. در تحقیق (Su et al., 2021) تعداد ۲۰ آزمایش سه محوری بر روی خاک سیمانی اصلاح شده با پلیمر انجام شد. نتایج نشان داد که هرچند اضافه کردن پلیمر حداکثر مقاومت برشی خاک‌های سیمانی را کاهش می‌دهد، اما شکل‌پذیری را افزایش می‌دهد. طبق تحقیق (Su et al., 2021) با افزایش میزان رطوبت اولیه در ساخت نمونه، مقادیر مدول برجهدگی کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. همچنین طبق مطالعات (Chen et al., 2019) کاهش رطوبت نمونه نسبت به مقدار بهینه در خاک‌های دانه‌ای با مقادیر ریزدانه بالا، سبب افزایش مدول برجهدگی می‌شود و به منظور دستیابی به بالاترین مدول برجهدگی ممکن، استفاده از رطوبت بهینه برای ساخت اولیه توصیه می‌شود. مطالعات (H. Liu et al., 2022) نشان داد، چسبندگی، مقاومت برشی و مدول برجهدگی با افزایش تعداد سیکل‌های ذوب-یخبندان کاهش می‌یابد. برخی از مطالعات تجربی تأثیر عوامل مختلف را بر روی مدول برجهدگی مصالح مختلف بررسی کردند. مطالعات (X. Liu et al., 2019) نشان داد، که درصد رطوبت، درجه اشباع خاک، تراکم، مقدار تنش محدود کننده، مقدار تنش سیکلی اعمالی، تعداد

پلیمر به ماسه سیلتی، مقاومت خمشی و مد گسیختگی را تغییر می‌دهد. محققینی چون (Wu et al., 2003) گزارش کردند که افزودن پلیمر پلی‌پروپیلن در خاک ماسه تثبیت شده با سیمان به طور قابل ملاحظه‌ای مقاومت کششی، کرنش کششی و شاخص سختی را افزایش داده، ولی تأثیر چندانی بر روی مقاومت فشاری محصور نشده ندارد. اثر دو نوع پلیمر (پلی امید و آکرلیک) بر روی خاک رس تثبیت شده با سیمان بررسی شد و نتایج نشان داد که اضافه کردن حدود ۰/۳ درصد پلیمر به رس تثبیت شده با سیمان، مقاومت خمشی و مقاومت کششی به ترتیب ۵۹ و ۵۴ درصد افزایش می‌یابد (Arabani & Haghsheno, 2020). هم چنین اضافه کردن بیش از ۱۰ درصد، رفتار شکننده خاک سیمان را به رفتار شکل‌پذیر تبدیل می‌کند. محققین چون (Guan et al., 2020) اثر نوعی پلیمر با قابلیت جذب آب بالا را بر روی لایه اساس تثبیت شده با سیمان بررسی کردند. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری لایه سیمانی با این نوع پلیمر حدود ۲۷ درصد بیشتر از بدون نمونه پلیمر است و در نمونه با مقدار ۰/۳ درصد از این نوع پلیمر، حدود ۵۲/۵ درصد جمع شدگی کاهش می‌یابد.

همان‌گونه که در قسمت قبل بیان شد، دوام در مقابل شرایط نامطلوب محیطی از جمله تغییرات فصلی و بدنال آن چرخه‌های تر و خشک‌شدگی و یخبندان-ذوب، یکی از نگرانی‌های اصلی در زمینه تثبیت مصالح با سیمان و پلیمرها است (Soldo & Miletic, 2022). مطالعات مختلفی تأثیر سیکل‌های دوام را بر روی مصالح مختلف از جمله خاک ماسه سیلتی تثبیت شده با بیوپلیمر (Soldo & Miletic, 2022)، رس منبسط شونده تثبیت شده با پلیمر (Yazdandoust & Yasrobi, 2010)، خاک لاتریتی تثبیت شده با سیمان و خرده لاستیک (Sheikhi et al., 2021; Udomchai et al., 2021)، خاک ماسه بددانه‌بندی شده تثبیت شده با سیمان (Gowthaman et al., 2022) و رس تثبیت شده (Chittoori et al., 2018) بررسی کردند. به عنوان مثال، در مطالعه (Udomchai et al., 2021) تأثیر جایگذاری خرده لاستیک بر روی دوام مصالح روسازی تثبیت شده با سیمان و خاک لاتریتی در مقابل سیکل‌های تر-خشک، تحت بارگذاری کششی سیکلیک بررسی گردید. نتایج نشان داد، خرده لاستیک عملکرد کششی کوتاه مدت و بلندمدت را بهبود می‌بخشد. مصالح تثبیت شده با سیمان و خرده لاستیک دارای مدول

#### ۴- روش ساخت نمونه و برنامه آزمایش‌ها

آزمایش تراکم اصلاح شده مطابق با استاندارد ASTM D1557 (ASTM, 2010c) بر روی نمونه تثبیت نشده انجام شد. هدف از انجام آزمایش، تعیین درصد رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک بود، که به ترتیب حدود ۲/۲ و ۶/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب درصد بدست آمد. برای ساخت نمونه‌ها، با توجه به مقادیر وزن مخصوص خشک و درصد بهینه خاک، ابتدا سیمان با پلیمر معدنی مورد نیاز ترکیب شده، تا مخلوط یکنواختی بدست آید و سپس مخلوط حاصل به صورت خشک به خاک اضافه می‌شود. سپس آب مورد نیاز (۶ یا ۸) درصد به مخلوط خاک-سیمان و پلیمر معدنی اضافه شده و مخلوط طبق استاندارد آزمایش یادشده، متراکم می‌شود. برای بررسی رفتار استاتیکی خاک تثبیت نشده و تثبیت شده با سیمان و سیمان-پلیمر معدنی، آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری (ASTM, ASTM D1633) (ASTM, 2010b)، مقاومت کششی برزیلی (ASTM C496) (ASTM, 2017)، (ASTM, ASTM D1883 (CBR))، دوام شامل خشک و تر شدگی (ASTM D559) (ASTM, 2011) و ذوب و یخ زدگی (ASTM D560) (ASTM, 2015) و در نهایت آزمایش سه محوری بزرگ مقیاس قطر بزرگ طبق استاندارد آشتو (AASHTO T307) (AASHTO, 2017) اصلاح شده انجام گردید.

برای آزمون‌های استاتیکی حداقل دو نمونه برای هر مورد ساخته شده و میانگین نتایج آنها در بخش ۵ گزارش شده است. برای شناسایی هر نمونه یک کد با فرمت خاصی در نظر گرفته شده است. خاک تثبیت نشده با کد (C<sub>0</sub>)، خاک تثبیت شده با سیمان و سیمان-پلیمر به ترتیب با کدهای Cx و CxN که X نشان دهنده درصد وزنی سیمان و یا مجموع سیمان و پلیمر است. در ضمن N مرتبط با نام تجاری پلیمر است که میزان آن در نمونه‌ها ۱۰ درصد وزنی سیمان مصرفی می‌باشد.

#### ۵- انجام آزمایش و تفسیر نتایج

##### ۵-۱- آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس

این آزمایش تحت سربارهای قائم ۳۴/۵، ۶۷/۹ و ۱۳۷/۹ کیلو نیوتن بر متر مکعب بر روی نمونه خاک تثبیت نشده که با وزن مخصوص خشک ۲/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب و رطوبت

سیکل‌های بارگذاری، جنس تثبیت کننده و نظایر آن بر روی مدول برجهندگی تاثیر دارد. همان طور که پیش از این بیان گردید، در مطالعه حاضر، سعی شده است، مطابق با ادبیات فنی، برای یک نمونه خاک، که به صورت اصلاح نشده به عنوان اساس راه و باند مناسب نمی‌باشد، با تعریف یک برنامه جامع آزمایشگاهی، درصد بهینه‌ای از سیمان و پلیمر برای تثبیت خاک اصلاح نشده انتخاب شده و پارامترهای طراحی برای اساس راه و باند تعیین شود.

#### ۳- معرفی مصالح مصرفی

خاک مورد استفاده در این تحقیق، حاصل از برداشت مصالح محلی در بزرگراهی در شهر تبریز می‌باشد. آزمایش‌های شاخص شامل دانه‌بندی (ASTM, ASTM D6913) (ASTM, 2009)، هیدرومتری (ASTM, 2016) ASTM D7928) حدود اتربرگ (ASTM, 2018) ASTM D4318) و چگالی ویژه (ASTM, 2006) ASTM D854) روی خاک مورد بررسی، انجام شده است.

خاک براساس طبقه بندی یونیفاید SM و طبق آشتو در طبقه A2 است. حد روانی، شاخص خمیری و چگالی ویژه خاک به ترتیب ۲۳/۲ و ۱۲/۱ و ۲/۶۵ بدست آمد. استفاده از هر ماده تثبیت کننده‌ای تا درصد معلومی باعث افزایش مقاومت و دیگر مشخصات خاک‌های مسئله‌دار می‌شود و اضافه کردن بیشتر از این مقدار نتیجه عکس خواهد داد و باید برای هر نمونه خاک، مقدار ماده افزودنی با توجه به دانه‌بندی و شرایط بهره برداری قبل از استفاده تعیین شود.

خاک مورد مطالعه قابلیت استفاده در لایه اساس را نداشته و با توجه به ضعف مقاومت، نیاز به اصلاح با مواد تثبیت کننده دارد. برای تثبیت خاک مورد بررسی، از سیمان پرتلند نوع ۲ و پلیمر نوین معدنی استفاده شده است. مشخصات کامل پلیمر در گزارش (BHRC Report, 2020) ارائه شده است. به طور خلاصه، پلیمر معدنی که باید به صورت افزودنی به سیمان مورد استفاده قرار گیرد، دارای ساختار کریستالی مانند است. این پلیمر به صورت پودر جامد و به رنگ خاکستری با دانسیته (۸۰۰۰-۱۲۰۰۰) نیوتن بر متر بر مکعب، است و بسته به مقاومت مورد نیاز از ۴ تا ۱۰ درصد وزنی سیمان بکار می‌رود.

۱ و ۲ مقاومت فشاری حداکثر با مقدار سیمان و زمان عمل آوری رابطه مستقیم دارد.

بطورکلی با افزایش درصد سیمان و سیمان-پلیمر، مقدار حداکثر مقاومت فشاری با افزایش زمان آوری افزایش یافته است. البته به استثنا دو مورد، که با افزایش درصد سیمان و یا سیمان-پلیمر، حداکثر مقاومت فشاری کمی کاهش داشته است. به عنوان مثال، مقاومت فشاری نمونه C9 پس از سه روز حدود ۳۰۰ کیلوپاسکال کمتر از نمونه C7 و مقاومت فشاری نمونه C9N پس از ۹۰ روز حدود ۴۰۰ کیلوپاسکال کمتر از نمونه C7N بدست آمده است. مشابه تحقیقات (Xuan et al., 2012)، ممکن است به دلیل نوع خاک و درصد ریزدانه، همواره مقاومت فشاری با افزایش درصد افزودنی بیشتر، افزایش نیابد. نکته قابل توجه در مورد تفاوت رفتار نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و سیمان-پلیمر این است که، با افزایش زمان عمل آوری تا ۲۸ روز، نمونه‌های پلیمری مقاومت بالایی را نشان می‌دهند و تفاوت قابل توجهی بین مقاومت فشاری نمونه‌های پلیمری و سیمانی در این بازه زمانی وجود دارد. مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با سیمان-پلیمر در زمان عمل آوری ۵۶ روزه نسبت به ۲۸ روزه عمل آوری کاهش یافته و سپس مجدداً در ۹۰ روز عمل آوری افزایش می‌یابد.

پس از ۲۸ روز، اختلاف مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با سیمان تنها با نمونه تثبیت شده با سیمان-پلیمر کاهش می‌یابد، در واقع، نمونه‌های تثبیت شده با سیمان-پلیمر زودتر از نمونه‌های تثبیت شده با سیمان به حداکثر مقاومت فشاری خود می‌رسند، اما با افزایش زمان عمل آوری این اثر مثبت کاهش می‌یابد. طبق گزارش (BHRC Report, 2020) حداقل مقاومت فشاری مورد نیاز برای طراحی لایه اساس باید حدود ۴ مگاپاسکال در زمان عمل آوری ۷ روز باشد. نتایج ارائه شده در شکل ۳ نشان می‌دهد که نمونه‌های C7 و C7N به خوبی این معیار را برآورده می‌کنند. نتایج ارائه شده جدول ۱ نشان می‌دهد، که در اثر تثبیت، مدول سکانتی نمونه خاک طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

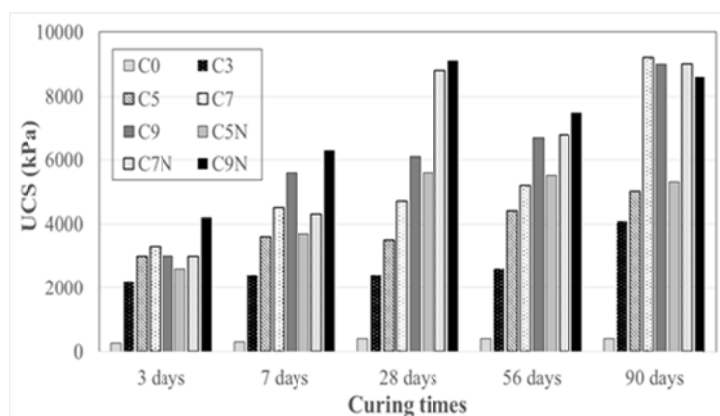
۶ درصد در جعبه برش به ابعاد  $15 \times 30 \times 30$  سانتی متر انجام شد. مقادیر زاویه اصطکاک داخلی  $\phi$  و چسبندگی نمونه خاک طبیعی با به ترتیب ۲۱/۷ درجه و ۳۹ کیلو پاسکال بدست آمد. عدم انجام آزمایش روی نمونه‌های تثبیت شده این بود که با توجه به مقاومت بالا، امکان شکست نمونه‌ها ممکن نبود.

#### ۵-۲- آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

نمونه‌های خاک تثبیت نشده و تثبیت شده با درصد‌های مختلف، مطابق با استاندارد (ASTM, ASTM D1633 (2010b) در قالب هایی با قطر ۱۰/۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۱ سانتی‌متر در ۳ لایه با ضخامت یکسان کوبیده شدند. نمونه‌ها پس از ۳، ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۰ روز عمل آوری در اتاق رطوبت، تحت آزمایش تک محوری قرار گرفتند. آزمایش به روش کنترل کرنش انجام شده است. همچنین در خاتمه آزمایش‌های یخبندان-ذوب و تر-خشک روی نمونه‌ها، آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری نیز انجام شده است که زمان ممکن انجام این دو آزمایش، ۳۱ روز بعد از ساخت نمونه‌ها می‌باشد، که می‌توان با تقریب با نمونه‌های با عمل آوری معمولی در ۲۸ روز مقایسه کرد. مقاومت فشاری حداکثر و مدول سکانتی از نمودارهای تنش-کرنش حاصل از آزمایش تک محوری محاسبه شد. مدول سکانتی برای هر نمونه از تقسیم ۵۰٪ بیشینه مقاومت فشاری بر کرنش نظیر است (جدول ۱). در شکل ۲ نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها تحت عمل آوری ۳ روزه تا ۹۰ روزه بر حسب درصد سیمان و سیمان-پلیمر در زمان در شرایط معمولی ارائه شده است. در تمام زمان‌های عمل آوری حداکثر مقاومت فشاری برای خاک طبیعی در محدوده ۳۹۰-۲۴۰ کیلوپاسکال بدست آمده که برای لایه اساس بسیار پایین است و استفاده از این نوع خاک در لایه اساس مستلزم اضافه نمودن یک تثبیت کننده مناسب مانند سیمان است. شکل ۲ نشان می‌دهد که اضافه کردن سیمان و سیمان-پلیمر معدنی به طور قابل توجهی مقاومت فشاری خاک طبیعی مورد مطالعه را افزایش می‌دهد. مطابق شکل‌های

جدول ۱. نتایج مقاومت فشاری تک محوری، مدول سکانتی نمونه‌های تثبیت شده و نشده تحت سه شرایط عمل آوری در دمای اتاق و یخ‌بندان-ذوب و تر-خشک

Specimen	3 days		7 days		28 days		56 days		90 days	
	UCS (kPa)	E <sub>50</sub> (MPa)	UCS (kPa)	E <sub>50</sub> (MPa)	UCS (kPa)	E <sub>50</sub> (MPa)	UCS (kPa)	E <sub>50</sub> (MPa)	UCS (kPa)	E <sub>50</sub> (MPa)
C0 (RC)	260	17.6	300	15.2	390	17.7	400	26.8	400	17
C3 (RC)	2200	199.1	2400	198.4	2400	171.3	2600	284.8	4100	375
C5 (RC)	3000	136.1	3600	358	3500	313.6	4400	471.1	5000	388.4
C7 (RC)	3300	412.3	4500	185.8	4700	322.7	5200	610.6	9200	513.1
C9 (RC)	3000	332.9	5600	267.6	6100	762.5	6700	319.1	9000	568.4
C5 N(RC)	2600	298.3	3700	411.1	5600	545.7	5500	455	5300	340.8
C7N (RC)	3000	195.3	4300	334	8800	830.9	6800	552.8	9000	392
C9N (RC)	4200	332.9	6300	350.1	9100	627	7500	594	8600	692.2
C7(W-D)	—	—	—	—	2900	141.8	—	—	—	—
C7N(W-D)	—	—	—	—	6300	339.9	—	—	—	—
C7(F-T)	—	—	—	—	2700	211.8	—	—	—	—
C7N(F-T)	—	—	—	—	2900	349.7	—	—	—	—

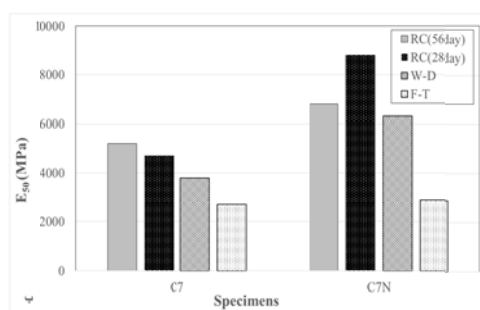
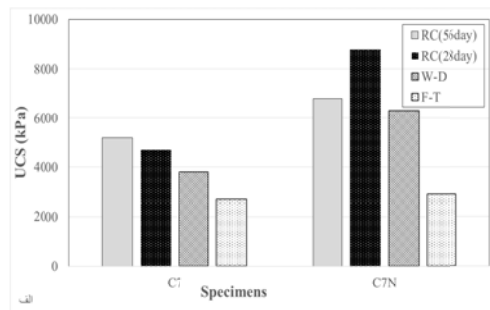


شکل ۱. مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های تثبیت نشده و تثبیت شده با درصد‌های مختلف در زمان‌های عمل آوری ۳ روزه تا ۹۰ روزه

است. به عنوان مثال، کاهش مقاومت تک محوری نمونه‌های تثبیت شده با سیمان، تحت سیکل‌های یخ‌بندان-ذوب و تر-خشک به ترتیب حدود ۴۲ و ۲۰ درصد نسبت به نمونه عمل آوری معمولی است، در حالیکه مقادیر نظیر نمونه تثبیت شده با سیمان-پلیمر به ترتیب حدود ۶۷ و ۷ درصد می‌باشد. نکته قابل توجه عملکرد بهتر نمونه‌های تثبیت شده با سیمان-پلیمر تحت سیکل‌های تر-خشک نسبت به سیکل‌های یخ‌بندان-ذوب است. این نمونه‌ها، در سیکل‌های تر شدگی که در تماس با آب قرار می‌گیرند، در نگهداشت آب بهتر عمل کرده و با ایجاد بافت نرم‌تر، از آسیب‌های ناشی از رشد میکرو کریستال‌های سوزنی شکل مقداری جلوگیری می‌کند، این عامل سبب عملکرد بهتر این نمونه‌ها نسبت به حالت یخ‌بندان-ذوب است.

هم چنین با افزایش درصد سیمان و یا سیمان-پلیمر، تقریباً مدول سکانتی افزایش یافته است، ولی با افزایش زمان عمل‌آوری، روند مشخصی مشاهده نشده است. برای اکثر نمونه‌ها، با افزایش سن تا ۲۸ روز یا ۵۶ روز، مدول سکانتی افزایش و سپس کاهش یافته است. در ۴۰ درصد موارد، نمونه‌های تثبیت شده با سیمان-پلیمر، مدول سکانتی بالاتری نسبت به نمونه‌های تثبیت شده با سیمان داشتند.

در شکل ۲ مقاومت تک محوری و مدول سکانتی برای سه حالت عمل آوری (یعنی اتاق رطوبت، یخ‌بندان-ذوب و تر-خشک) برای نمونه‌های تثبیت شده با درصد بهینه ارائه شده است. اعمال سیکل‌های یخ‌بندان-ذوب و تر-خشک سبب کاهش مقاومت تک محوری و مدول سکانتی در هر دو نمونه تثبیت‌شده سیمان و سیمان-پلیمر شده است و نمونه‌های تثبیت شده با سیمان آسیب پذیرتر از نمونه‌های تثبیت‌شده با پلیمر



شکل ۲. (الف) مقاومت فشاری تک محوری حداکثر، (ب) مدول سکانتی حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های تثبیت شده با درصد بیهنه در سه شرایط عمل آوری

### ۳-۵- آزمایش مقاومت کششی (برزیلی)

مقاومت برزیلی افزایش یافته است. در اکثر موارد حداکثر مقاومت برزیلی در نمونه‌های تثبیت شده با سیمان بیشتر از نمونه های نظیر تثبیت شده با سیمان-پلیمر است. به نظر می رسد، با افزودن پلیمر به خاک تثبیت شده با سیمان، مقاومت برزیلی تغییر چندانی نکرده است. مطابق با نتایج جدول ۲، می توان اظهار داشت که، مشابه مقاومت برزیلی، مدول سکانتی نیز با افزایش زمان عمل آوری، افزایش یافته است. ولی افزایش درصد وزنی سیمان و پلیمر همیشه افزایشی نیست. مثلاً برای ۳ روز و ۲۸ روز عمل آوری، بیشترین مدول سکانتی به ترتیب مربوط به نمونه‌های (C5,C7N) و (C9,C5N) است.

این آزمایش طبق استاندارد ASTM C496 (ASTM, 2017) بر روی نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و سیمان-پلیمر، عمل آوری شده در دمای اتاق به مدت ۳ و ۲۸ روز انجام شد. نتایج حداکثر مقاومت کششی غیرمستقیم یا مقاومت برزیلی و مدول سکانتی نظیر نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. در شکل ۳ نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه های ۳ روزه و ۲۸ روزه بر حسب درصد سیمان و سیمان-پلیمر در زمان‌های عمل آوری مختلف ارائه شده است. افزایش زمان عمل آوری سبب افزایش قابل توجه (تا دو برابر) مقاومت برزیلی نمونه‌ها می شود. همچنین در هر دو زمان عمل آوری ۳ و ۲۸ روزه، با افزایش درصد وزنی سیمان-پلیمر، مقدار

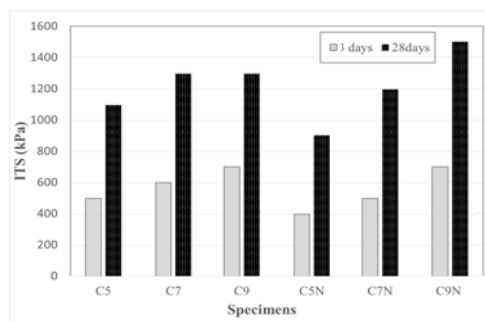
جدول ۲. نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول سکانتی نمونه های تثبیت شده تحت سه شرایط عمل آوری دمای اتاق

و یخ بندان- ذوب و تر-خشک

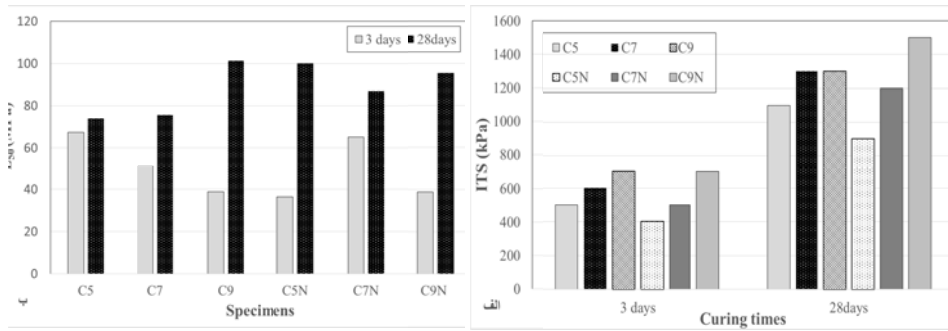
Specimen	3 days		28days	
	ITS (kPa)	E <sub>50</sub> (MPa)	ITS (kPa)	E <sub>50</sub> (MPa)
C <sub>5</sub> (RC)	500	67.3	1100	74.0
C <sub>7</sub> (RC)	600	51.2	1300	75.5
C <sub>9</sub> (RC)	700	38.9	1300	101.3
C <sub>5</sub> N(RC)	400	36.3	900	100.0
C <sub>7</sub> N(RC)	500	65.1	1200	86.9
C <sub>9</sub> N (RC)	700	38.8	1500	95.4
C <sub>7</sub> (W-D)	—	—	900	132.3
C <sub>7</sub> N (W-D)	—	—	1100	142.1
C <sub>7</sub> (F-T)	—	—	200	21.5
C <sub>7</sub> N (F-T)	—	—	400	74.5

حدود ۶۶ و ۸ درصد است. نکته قابل توجه عملکرد بهتر نمونه های تثبیت شده با سیمان-پلیمر تحت سیکل های تر - خشک نسبت به سیکل های یخ بندان - ذوب است. نسبت مقاومت فشاری تک محوری حداکثر به مقاومت کششی غیرمستقیم (مقاومت برزیلی) و مدول سکانتی نظیر در سه حالت عمل آوری (معمولی، تر-خشک و یخ بندان-ذوب) برای هر دو نمونه اصلاح شده با سیمان و سیمان-پلیمر در جدول ۳ ارائه شده است. کمترین نسبت مقاومت های فشاری به کششی برای هر دو نمونه برای حالت تر-خشک است. در حالیکه بیشترین اختلاف مربوط به نمونه سیمانی در حالت عمل آوری ذوب-یخ است. برای مدول سکانتی نظیر نیز در حالت تر-خشک، کمترین اختلاف بین حالت فشاری به کششی برای هر دو نمونه است. به شرط تامین حداقل مقاومت فشاری، هرچه نسبت مقاومت فشاری به کششی کمتر باشد، رفتار نمونه تحت بارهای سیکلی بهتر خواهد بود.

در خاتمه آزمایش های یخ بندان - ذوب و تر - خشک روی نمونه های تثبیت شده با سیمان و سیمان-پلیمر، آزمایش های مقاومت کششی غیرمستقیم نیز انجام شد که زمان ممکن انجام این دو آزمایش، ۳۱ روز بعد از ساخت نمونه ها می باشد که می توان با تقریب با نمونه های با عمل آوری معمولی ۲۸ روزه مقایسه کرد. نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم یا مقاومت برزیلی برای سه حالت عمل آوری در شکل ۴ ارائه شده است. اعمال سیکل های یخ بندان - ذوب و تر - خشک سبب کاهش مقاومت برزیلی هر دو نمونه تثبیت شده می شود و مشابه آزمون مقاومت فشاری تک محوری، نمونه های تثبیت شده با سیمان آسیب پذیرتر از نمونه های تثبیت شده با پلیمر است. کاهش مقاومت برزیلی نمونه های تثبیت شده با سیمان، تحت سیکل های یخ بندان - ذوب و تر - خشک نسبت به عمل آوری معمولی به ترتیب حدود ۸۴ و ۳۰ است، و درصد کاهش مقادیر نظیر برای نمونه تثبیت شده با سیمان-پلیمر به ترتیب



شکل ۳. نتایج آزمایش کششی غیرمستقیم نمونه های تثبیت شده مختلف در زمان های عمل آوری ۳ و ۲۸ روزه



شکل ۴. الف) مقاومت کششی غیرمستقیم حداکثر (ب) مدول سکانتی نظیر نمونه‌های تثبیت شده با درصد بهینه در سه شرایط عمل‌آوری

جدول ۳. نسبت مقاومت فشاری تک محوری حداکثر به کشش غیرمستقیم و نسبت مدول‌های سکانتی نظیر، در سه شرایط عمل‌آوری

برای دو نمونه C<sub>7</sub>N و C<sub>7</sub>

specimens	UCS/ITS			E <sub>50UCS</sub> /E <sub>50ITS</sub>		
	RC	W-D	F-T	RC	W-D	F-T
C <sub>7</sub>	3.6	3.2	13.5	4.3	1.1	9.9
C <sub>7</sub> N	7.3	5.7	7.3	7.2	2.4	4.7

#### ۵-۴- آزمایش CBR

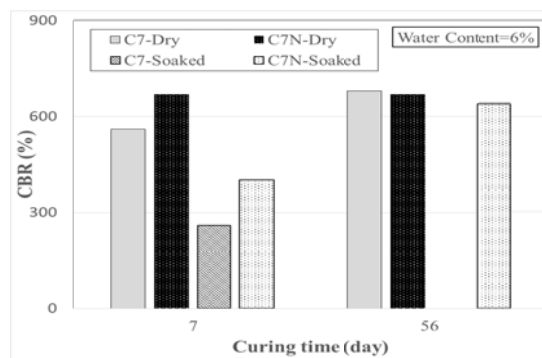
نمونه‌ها، باعث کاهش CBR در هر دو نمونه C<sub>7</sub> و C<sub>7</sub>N است. غرقاب شدن نمونه C<sub>7</sub> سبب کاهش بیشتر CBR نسبت به نمونه C<sub>7</sub>N شده است. به عنوان مثال، پس از ۷ روز عمل‌آوری، غوطه‌وری سبب کاهش CBR نمونه‌های C<sub>7</sub> و C<sub>7</sub>N به ترتیب میزان ۵۴ و ۴۱ درصد می‌شود. مطابق با شکل ۶ نمونه‌های تثبیت شده در رطوبت کمتر (یعنی ۶ درصد) بهتر عمل کردند. هم‌چنین با افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ به ۵۶ روز، CBR نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد.

یکی از چالترین نتایج آزمایش، مشکلات بسیار زیاد مرتبط بیرون آوردن نمونه‌های تثبیت شده با سیمان-پلیمر از قالب بعد از اتمام آزمایش بود. بطوریکه فقط با چکش هیلتی و تکه تکه خردن کردن نمونه، امکان خارج کردن آن ممکن بود. در حالیکه نمونه‌های تثبیت شده با سیمان به راحتی از قالب بیرون آمدند. به نظر می‌رسد، در مقایسه با نمونه‌های تثبیت شده با سیمان-پلیمر، نمونه‌های تثبیت شده با سیمان کاهش حجم داشتند، که سبب خارج شدن راحت‌تر نمونه از قالب شد. بنابراین نمونه‌های تثبیت شده با سیمان-پلیمر تا حدودی می‌توانند این ضعف سیمان را در پروژه‌های تثبیت برطرف کنند. ذکر این نکته ضروری است، با توجه به CBR بالای نمونه‌های تثبیت شده، استفاده از دستگاه با ظرفیت بار محوری حدود ۱۰ تن و بیشتر، برای این نمونه‌ها توصیه می‌شود.

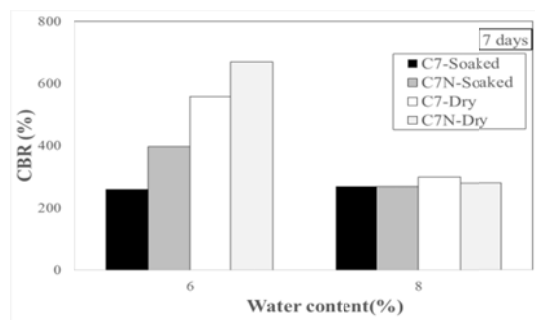
آزمایش CBR روی نمونه‌های تثبیت شده بهینه (C<sub>7</sub>N و C<sub>7</sub>) و تثبیت نشده (C<sub>0</sub>)، مطابق با استاندارد ASTM D1883 با دو رطوبت حین ساخت ۶ و ۸ درصد، در دو حالت خشک و غرقاب و در زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۵۶ روزه انجام شد که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. مقادیر CBR برای نمونه C<sub>0</sub> در شرایط خشک و غرقاب به ترتیب ۶۹ و ۴ درصد است. تثبیت خاک با سیمان و سیمان-پلیمر مقدار CBR را به طور قابل توجهی افزایش داده است، بطوریکه در تمام حالات مقدار CBR نمونه‌های C<sub>7</sub>N و C<sub>7</sub> بیش از ۲۴۶ است. حداقل CBR (ASTM D1883) برای اساس و زیراساس دانه‌ای باند فرودگاه (مشروط به عدم یخ زدن) ۱۰۰ و ۳۵ است، کلیه نمونه‌های تثبیت شده در این تحقیق این شرط را برآورده می‌کنند. بعضی از محققین برای نمونه خاک اصلاح شده با آهک که مدول برجهندگی خاک اصلاح نشده در حالت خشک تفاوتی با نداشت توصیه کردند که مقادیر CBR به جای استفاده از حداکثر مقدار اندازه‌گیری شده در نشست ۲/۵ یا ۵ میلی‌متر در نشست ۱/۲۵ میلی‌متر معیار قرار گیرد. (Aghaei Araei et al., 2023). تاثیر درصد رطوبت و غرقاب شدن بر روی CBR نمونه‌های تثبیت شده با سیمان (C<sub>7</sub>) و سیمان-پلیمر (C<sub>7</sub>N) در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد، افزایش درصد رطوبت حین ساخت و غرقاب شدن

جدول ۴. نتایج CBR نمونه‌های بهینه (C7N و C7) با رطوبت حین ساخت مختلف و تثبیت نشده (C0) در زمان‌های عمل‌آوری مختلف

specimen	Water content(%)	Age (days)	State	CBR (%)
C <sub>0</sub>	6	1	Dry	69
C <sub>0</sub>	8	4	Soaked	4
C <sub>7</sub>	6	7	Dry	565
C <sub>7</sub>	6	56	Dry	682
C <sub>7</sub>	8	7	Dry	301
C <sub>7</sub>	8	56	Dry	246
C <sub>7</sub> N	6	7	Dry	671
C <sub>7</sub> N	6	56	Dry	677
C <sub>7</sub> N	8	7	Dry	280
C <sub>7</sub> N	8	56	Dry	531
C <sub>7</sub>	6	7	Soaked	261
C <sub>7</sub>	6	56	Soaked	811
C <sub>7</sub>	8	7	Soaked	269
C <sub>7</sub>	8	56	Soaked	439
C <sub>7</sub> N	6	7	Soaked	395
C <sub>7</sub> N	6	56	Soaked	636
C <sub>7</sub> N	8	7	Soaked	278
C <sub>7</sub> N	8	56	Soaked	403



شکل ۵. CBR نمونه‌های تثبیت شده در دو حالت خشک و غرقاب با درصد رطوبت ۶٪



شکل ۶. CBR نمونه‌های تثبیت شده با درصد بهینه با رطوبت ساخت ۶٪ و ۸٪ در دو حالت خشک و غرقاب

## آزمون دوام

### آزمایش تر-خشک شدگی

قرار گرفته و سپس در دستگاه گرمخانه در دمای ۷۱ + سانتی گراد به مدت ۴۲ ساعت قرار گرفتند (چرخه خشک)، ۱۲ مرتبه چرخه "تر-خشک" تکرار شده و پس از آن افت وزنی و حجمی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است.

نمونه‌های تثبیت شده با سیمان (C7) و سیمان-پلیمر (C7N) با رطوبت ساخت ۶ و ۸ درصد مطابق با استاندارد 559 ASTM D تحت آزمایش تر-خشک شدگی قرار گرفتند. طبق استاندارد نمونه‌های تثبیت شده بعد از عمل‌آوری در دمای اتاق به مدت ۷ روز، داخل ظرف آب به مدت ۵ ساعت (چرخه تر)

با چرخه یخبندان شروع شد، بطوریکه نمونه‌ها در دمای ۲۳- سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند. سپس چرخه ذوب انجام شد و نمونه‌ها در دمای ۲۱+ سانتی‌گراد به مدت ۲۳ ساعت قرار گرفتند. و عمل چرخه یخبندان-ذوب تا ۱۲ مرتبه انجام شد. پس از هر چرخه، تغییرات وزنی و حجمی نمونه‌های تثبیت شده اندازه‌گیری شد.

تغییرات وزنی و حجمی نمونه‌های تثبیت شده پس از تمام آزمایش یخبندان-ذوب در جدول ۵ ارائه شده است. در تمام موارد، مقادیر افت وزنی کم‌تر از افت وزنی مجاز آیین نامه (۱۴ درصد) است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در تمام موارد نمونه‌های تثبیت شده با سیمان-پلیمرنسبت به نمونه‌های تثبیت شده با سیمان افت وزنی کم‌تری دارند. بیش‌ترین افت وزنی مربوط به نمونه تثبیت شده با سیمان (C7) با رطوبت ساخت ۸ درصد و کم‌ترین افت وزنی مربوط به نمونه تثبیت شده با سیمان-پلیمر (C7N) با رطوبت ساخت ۶ درصد است، که به ترتیب برابر ۷/۱۳ و ۶/۰۳ است.

در تمام موارد، مقادیر افت وزنی کم‌تر از افت وزنی مجاز آیین‌نامه (۱۴ درصد) است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بیش‌ترین افت وزنی مربوط به نمونه تثبیت شده C7 در رطوبت ساخت ۶ درصد با مقدار ۷ درصد و کم‌ترین افت وزنی مربوط به نمونه‌های تثبیت شده C7 و C7N با رطوبت ساخت ۸ درصد به ترتیب برابر ۵/۵ و ۵/۶ درصد است. بیش‌ترین تغییرحجم مربوط به نمونه تثبیت شده با C7 با رطوبت ساخت ۸ درصد است که برابر با برابر ۲/۷- درصد می‌باشد. تغییرات حجمی مجاز نمونه‌ها ۲درصد است. افزودن پلیمر به مقدار قابل توجهی از کاهش حجم ناشی از تثبیت با سیمان را برای نمونه‌های مورد بررسی می‌کاهد.

### آزمایش یخبندان-ذوب

آزمایش یخبندان-ذوب طبق استاندارد ASTM D560 بر روی نمونه‌های تثبیت شده با سیمان (C7) و سیمان-پلیمر (C7N) با دو رطوبت ساخت ۶ و ۸ درصد انجام شد. پس از ساخت طبق استاندارد مورد نظر، نمونه‌ها به مدت ۷ روز در دمای اتاق عمل‌آوری شدند. پس از آن، آزمون

جدول ۵. تغییرات وزنی و حجمی نمونه‌های تثبیت شده پس از آزمایش یخبندان-ذوب

Specimen		Water Content (%)	Weight losses (%)	Volume losses (%)
C7	ASTM D559	6	7	-1.2
	ASTM D560	6	6.6	0.69
C7N	ASTM D559	6	6.2	-0.1
	ASTM D560	6	6	1.85
C7	ASTM D559	8	5.5	-2.7
	ASTM D560	8	7.1	0.43
C7N	ASTM D559	8	5.6	-0.8
	ASTM D560	8	6.1	0.43

دارای مقاومت فشاری و کششی بیشتری در مقایسه با نمونه رطوبت ساخت ۶ درصد است. از طرفی با توجه حساسیت شدید مصالح به رطوبت ساخت بالا در شرایط عمل‌آوری معمولی و کاهش شدید مقاومت، استفاده از رطوبت ساخت ۸ درصد توصیه نمی‌شود، هرچند کاهش مقاومت فشاری و کشش غیرمستقیم نمونه‌های برس‌خورده در آزمایش یخبندان-ذوب در مقایسه با رطوبت ساخت ۶ درصد بسیار کمتر است (BHRC Report, 2020).

در مورد ارتباط درصد رطوبت ساخت نمونه‌ها با افت وزنی شان می‌توان گفت که در رطوبت ساخت ۶ درصد هم برای نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و سیمان-پلیمر افت وزنی کم‌تری نسبت به رطوبت ساخت ۸ درصد مشاهده شد. در کل تغییرات حجمی ناچیزی برای همه نمونه‌ها گزارش شده است. بیش‌ترین تغییرحجم مربوط به نمونه تثبیت شده با سیمان-پلیمر است که حدود ۱/۸۵+ درصد است. بطورکلی نمونه‌ها در آزمایش یخبندان-ذوب دچار افزایش حجم می‌شوند. نمونه با رطوبت ساخت ۸ درصد تثبیت شده با سیمان و سیمان-پلیمر افت حجمی یکسانی نشان می‌دهند که

### ۵-۶- آزمایش دینامیکی سه محوری قطر بزرگ

محوری سیکلی باید افزایش یابد. مقدار فشار چرخ‌ها به ترتیب برای طبقه بندی‌های خیلی زیاد، زیاد، متوسط و کم به ترتیب برابر ۲۴۰۰، ۱۷۵۰، ۱۲۵۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد. برای رویه آسفالتی حداکثر فشار چرخ ۱۷۵۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته می‌شود. همچنین بار ضربه‌ای مورد نظر برای طراحی آزمایش‌های دینامیکی ۲/۵ تا ۳ برابر استاتیکی نظیر برای چرخ است. حداکثر تنش دینامیکی در نظر گرفته شده در سطح روسازی حدود ۳۵۰۰ کیلوپاسکال گزارش شده است و حداکثر تنش دینامیکی در با افزایش عمق و روی لایه اساس به طور قابل ملاحظه ای کاهش می‌یابد.

برنامه آزمایش‌های تعیین مدول الاستیسیته و میرایی در جدول ۶ ارائه شده است. مطابق جدول ۶، محدوده تنش محدود کننده ( $\sigma'_3$ ) بین ۲۰/۷ تا ۱۳۷/۹ کیلوپاسکال و حداکثر تنش انحرافی استاتیکی اولیه ( $q_s$ ) تا ۲۷۵ کیلوپاسکال برای اساس جاده تا ۸۲۵ کیلوپاسکال برای اساس باند فرودگاه انتخاب شد. حداکثر مقدار تنش‌های انحرافی سیکلی اعمالی ۰/۹ تنش‌های انحرافی استاتیکی اولیه است. آزمایش تعیین مدول الاستیسیته و نسبت میرایی طبق ASTM D3999 با اعمال ۱۰۰ سیکل موج سینوسی انجام شد.

آزمایش تعیین پارامترهای مدول برجهندگی، مدول الاستیسیته، نسبت میرایی و کرنش محوری روی ۴ نمونه خاک تثبیت شده با سیمان و سیمان-پلیمر که در دو شرایط مختلف تر-خشک و یخبندان-ذوب عمل آوری شدند، با استفاده از دستگاه سه محوری قطر بزرگ بخش ژئوتکنیک و زیرساخت، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی انجام شد. نمونه‌ها در قالب‌هایی به قطر و ارتفاع به ترتیب برابر ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متر و با درصد رطوبت ساخت ۶ درصد و با دانسیته خشک حداکثر (۲/۲ گرم سانتی متر بر مکعب) ساخته شدند.

در این تحقیق فرکانس بارگذاری ۱۰ و ۵ هرتز برای اساس راه و فرکانس ۲ هرتز برای نمونه اساس باند فرودگاه انتخاب شد (Aghaei Araei et al., 2023). لازم به ذکر است بارگذاری فرکانس بارگذاری چرخ‌های بوئینگ ۷۴۷ بین ۱/۶ تا ۲ هرتز است.

مطابق با تحقیق (Hanifa et al., 2015) برای خاک لایه اساس (A-۲-۴) تثبیت شده با ۶٪ سیمان، دامنه تنش‌های بارگذاری استاتیکی اولیه و سیکلی استاندارد (AASHTO T307) باید افزایش یابد. بنابراین در این تحقیق نیز چون آزمایش بر روی خاک تثبیت شده برای استفاده به عنوان اساس راه و باند فرودگاه است، سطح تنش‌های وارد در آزمایش سه

### ۵-۶-۱- نحوه عمل آوری نمونه تثبیت شده با سیمان و سیمان-پلیمر در شرایط تر-خشک

درجه است) در گرمخانه قرار داده شد و بعد از ۲۴ ساعت قرار دادن در اتاق رطوبت، در دوازدهمین روز عمل آوری تحت آزمایش دینامیکی طبق الگوی جدول ۶ قرار گرفت.

نمونه پس از ۳ روز گیرش اولیه، به مدت ۴ روز در رطوبت ۱۰۰٪ و دمای ۲۱+ سانتی‌گراد قرار گرفت. سپس ۵ ساعت در آب با دمای محیط غرقاب شد. در ادامه به مدت ۵۶ ساعت در دمای ۲۱+ سانتی‌گراد (حداکثر دما در کویر شهداد ۷۶

### ۵-۶-۲- نحوه عمل آوری نمونه تثبیت شده سیمان و سیمان-پلیمر در شرایط یخبندان-ذوب

۲۱- سانتی‌گراد در سردکننده قرار داده شد و بعد از ۲۴ ساعت قرار دادن در اتاق رطوبت، از روز دوازدهم تا پانزدهم بعد از ساخت، تحت آزمایش دینامیکی طبق الگوی جدول ۶ قرار گرفت. همچنین آزمایش‌های سیکلی دیگری در ۱۸ روز بعد از ساخت طبق روش مذکور انجام شد.

نمونه بعد از ساخت ۳ روز برای گیرش اولیه در دمای معمولی عمل آوری شد و ۲ روز در اتاق رطوبت ۱۰۰ درصد و دمای ۲۱+ سانتی‌گراد قرار گرفت. سپس ۲۴ ساعت در آب با دمای محیط غرقاب شد و در ادامه ۲۴ ساعت در دمای ۲۳- سانتی‌گراد عمل آوری شد. سپس ۵ ساعت در آب با دمای محیط غرقاب شد. در ادامه به مدت ۵۶ ساعت در دمای

جدول ۶. برنامه آزمایش سه محوری سیکلیک قطر بزرگ جهت تعیین مدول برجهنگی AASHTO T307 اصلاح شده،

مدول یانگ و میرایی طبق ASTM D3999

$\sigma'_3$ (kPa)	تنش انحرافی استاتیکی اولیه (kPa)	فرکانس بارگذاری (Hz)
103.4	ISO	10.5.2
103.4	103.4	10.5.2
20.7	ISO	10.5.2
20.7	20.7	10.5.2
20.7	41.4	10.5.2
20.7	62.1	10.5.2
20.7	103.4	10.5.2
20.7	165.7	10.5.2
34.5	ISO	10.5.2
34.5	34.5	10.5.2
34.5	68.9	10.5.2
34.5	103.4	10.5.2
34.5	172.3	10.5.2
34.5	275	10.5.2
68.9	ISO	10.5.2
68.9	68.9	10.5.2
68.9	103.4	10.5.2
68.9	137.4	10.5.2
68.9	206.8	10.5.2
68.9	344.7	10.5.2
68.9	551.7	10.5.2
103.4	68.9	10.5.2
103.4	206.8	10.5.2
103.4	413.6	10.5.2
103.4	620	10.5.2
137.9	ISO	10.5.2
137.9	103.4	10.5.2
137.9	137.9	10.5.2
137.9	275.8	10.5.2
137.9	412.9	10.5.2
137.9	825	10.5.2

### ۵-۶-۳- مدول یانگ

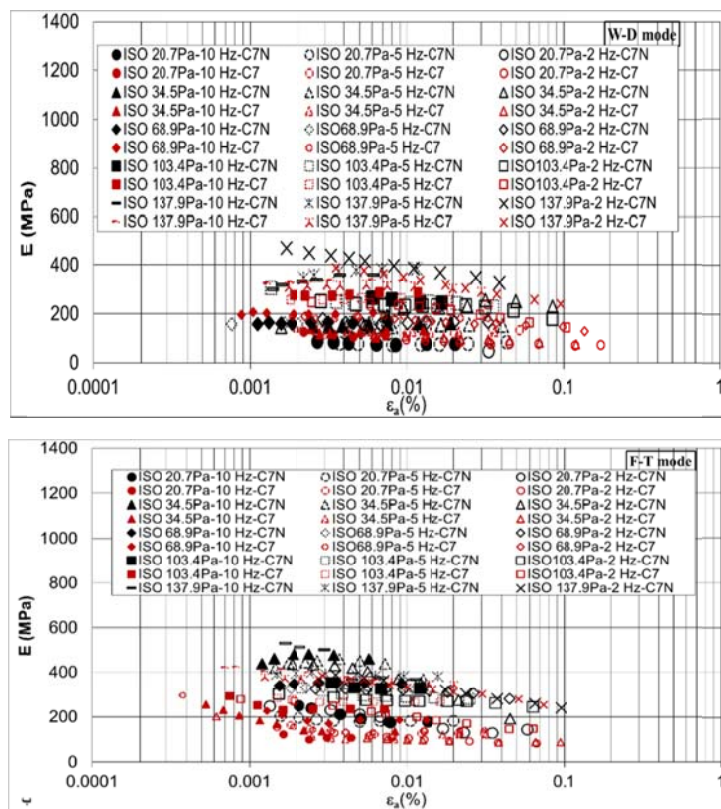
(۳۸۹-۷۰) و (۴۲۳-۸۰) مگاپاسکال و برای نمونه C7N به ترتیب دارای بازه تغییرات بین (۴۶۹-۴۶) تا (۵۲۹-۱۲۶) مگاپاسکال است. تحت شرایط همسان، مقدار مدول الاستیسیته در نمونه C7N کمی بیشتر از نمونه C7 حاصل شد. مطابق شکل ۸، در تنش محدود کننده ۲۰/۷ کیلوپاسکال با افزایش غیرهمسانی تنشی، مقدار مدول الاستیسیته در هر دو نمونه C7 و C7N تحت شرایط عمل آوری تر-خشک افزایش یافته است. مقادیر مدول الاستیسیته تحت تنش‌های محدود کننده ۲۰/۷ و ۳۴/۵ کیلوپاسکال در نمونه C7 به ترتیب دارای بازه تغییرات بین (۴۰۷-۹۵) و (۵۶۸-۱۲۴) مگاپاسکال و برای نمونه C7N به ترتیب دارای بازه تغییرات بین (۵۱۰-۹۵) تا (۷۶۵-۲۰۹) مگاپاسکال است. مقدار مدول الاستیسیته در نمونه

نتایج مدول یانگ یا الاستیسیته (E) در برابر ( $\epsilon_a$ ) در سیکل دهم) برای نمونه‌های اصلاح شده با سیمان (C7) و سیمان-پلیمر (C7N) به ترتیب برای تنش‌های محدود کننده ۲۰/۷، ۳۴/۵، ۶۸/۹، ۱۰۳/۴، ۱۳۷/۹ کیلوپاسکال در حالت‌های همسان (شکل ۷) و غیرهمسان (شکل‌های ۸ و ۹) برای شرایط عمل آوری تر-خشک و یخبندان-ذوب ارائه شده است. محدوده کرنش‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش، از ۰/۰۰۲۶ درصد تا حداکثر ۰/۱۶ درصد می‌باشد. مطابق با شکل ۷، برای هر دو نمونه با افزایش تنش همسانی، مدول الاستیسیته تقریباً روند افزایشی داشته است. مقادیر مدول الاستیسیته تحت تنش‌های همسان و در شرایط عمل آوری تر-خشک و یخبندان-ذوب در نمونه C7 به ترتیب دارای بازه تغییرات بین

کیلوپاسکال در نمونه C7 به ترتیب دارای بازه تغییرات بین (۱۰۱-۶۱۱) و (۹۳۹-۱۴۱) مگاپاسکال و برای نمونه C7N به ترتیب دارای بازه تغییرات بین (۷۰۵-۴۱) تا (۳۷۹-۹۰۰) مگاپاسکال است. در واقع تا این سطح تنش، مقادیر مدول الاستیسیته در هر دو نمونه، اختلاف جزئی است. مقادیر مدول الاستیسیته تحت تنش محدود کننده ۶۸/۹ کیلوپاسکال، در نمونه‌های C7 و C7N به ترتیب رشدی ۱/۷ و ۱/۸ برابری نشان می‌دهد. نرخ افزایش مدول الاستیسه با سطح تنش در نمونه C7 کمی بیشتر از نمونه C7N است. در نهایت در تنش محصور کننده ۱۳۷/۹ کیلوپاسکال حداکثر اختلاف مقادیر مدول نمونه C7 با C7N به ۴۰۰ مگاپاسکال رسیده است. با مقایسه شکل‌های ۷ و ۸ می‌توان اظهار کرد که تغییرات مدول الاستیسیته با کرنش محوری برای هر دو نمونه تثبیت شده تقریباً کاهش یافته است. به طور کلی، افزایش فرکانس سبب افزایش مدول الاستیسیته می‌شود. در شرایط تر-خشک مدول الاستیسیته تقریباً در نمونه C7N بیشتر از نمونه C7 است، ولی در شرایط یخبندان-ذوب تا سطح تنش محدود کننده ۶۸/۹ کیلوپاسکال، مقدار مدول الاستیسیته در نمونه C7N بیشتر از نمونه C7 بوده، ولی پس از آن روند بالعکس می‌شود.

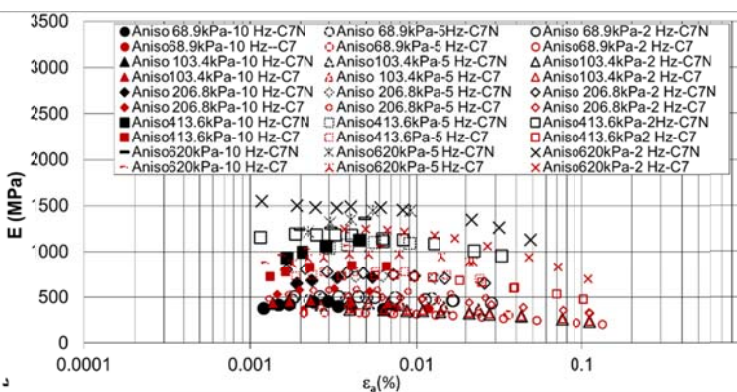
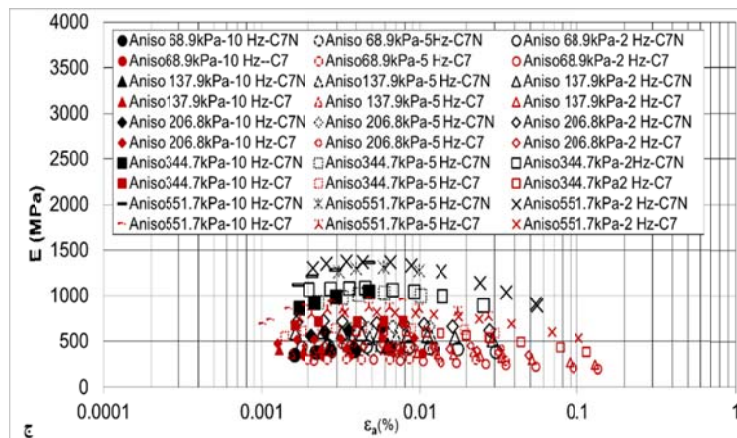
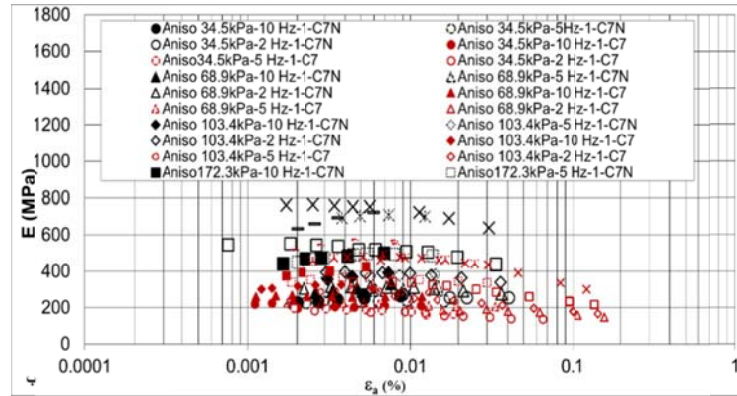
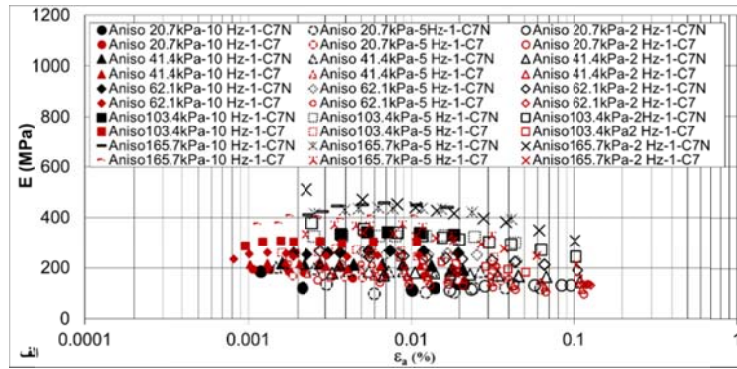
C7N کمی بیشتر از نمونه C7 حاصل شد که روند مشابهی در دیگر تنش‌های محدود کننده مشاهده شده است. بیشترین اختلاف مدول الاستیسیته در نمونه C7 و C7N در تنش محدود کننده ۶۸/۹ کیلوپاسکال با مقدار حدود ۴۰۰ مگاپاسکال است. ولی در تنش‌های محدود کننده ۱۰۳/۴ کیلوپاسکال، ۱۳۷/۹ اختلاف مدول الاستیسیته در نمونه C7 و C7N کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد، اعمال غیرهمسانی تنش‌ها بالا سبب می‌شود، ساختار میکرو کریستالی پلیمر شکسته شده و نرخ افزایش مدول الاستیسیته با افزایش غیرهمسانی تنش در نمونه C7N کاهش می‌یابد، به طوری که تقریباً در انتهای گامهای بارگذاری، اختلاف مدول الاستیسیته بین نمونه C7 و C7N به زیر ۱۰۰ مگاپاسکال رسیده است. با مقایسه نتایج ارائه شده در شکل ۷ الف- و می‌توان اظهار کرد که با افزایش فرکانس، مقدار مدول الاستیسیته افزایش یافته است.

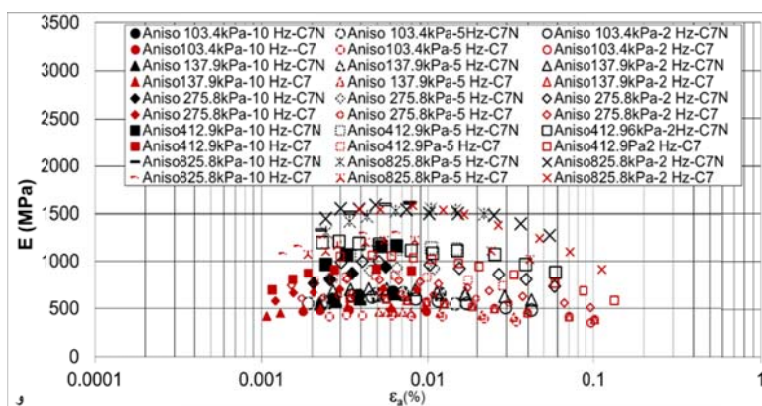
مطابق با شکل ۹، برای حالت عمل آوری تحت شرایط یخبندان-ذوب، به ازای هر تنش محدود کننده اعمالی، با افزایش غیرهمسانی تنش، مقدار مدول الاستیسیته در هر دو نمونه C7 و C7N افزایش یافته است. مقادیر مدول الاستیسیته تحت تنش‌های محدود کننده ۲۰/۷ و ۳۴/۵



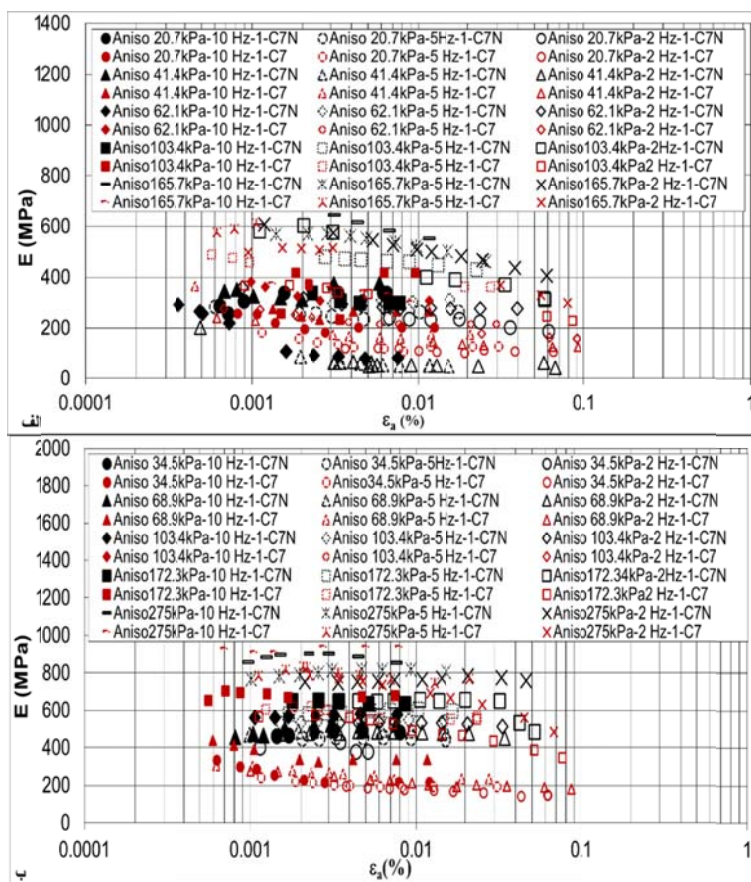
شکل ۷. مدول الاستیسیته-کرنش محوری در تنش‌های محدود کننده ۲۰/۷، ۳۴/۵، ۶۸/۹، ۱۰۳/۴ و ۱۳۷/۹ کیلوپاسکال در فرکانس‌های ۲، ۵

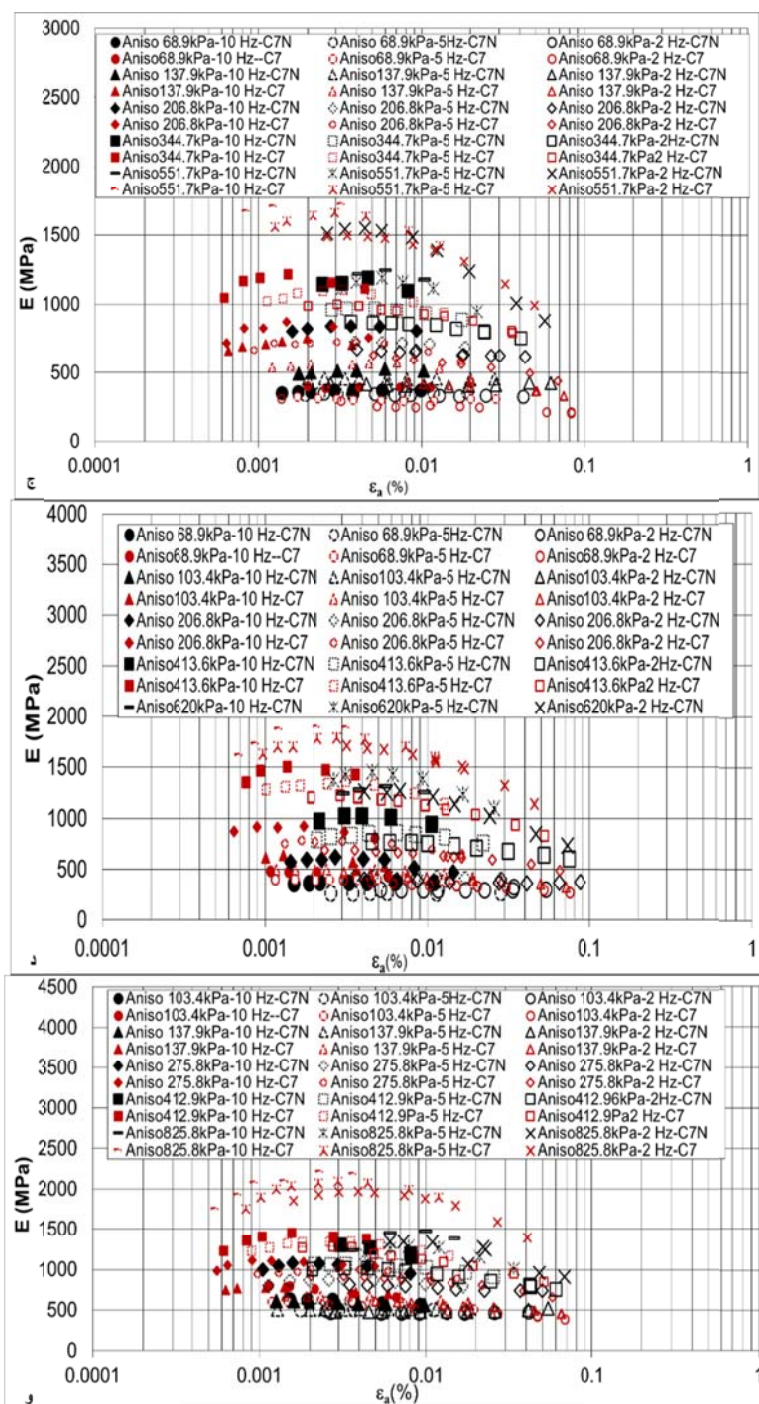
و ۱۰ هرگز تحت شرایط همسان نمونه خاک‌های C7 و C7N در شرایط عمل آوری الف) تر-خشک ب) یخبندان-ذوب





شکل ۸. نتایج مدول الاستیسیته- کرنش محوری در تنش‌های محدودکننده (الف) ۲۰/۷ (ب) ۳۴/۵ (ج) ۶۸/۹ (د) ۱۰۳/۴ (و) ۱۳۷/۹ کیلوپاسکال در فرکانس‌های ۲، ۵ و ۱۰ هرتز تحت شرایط غیرهمسان نمونه خاک‌های C7 و C7N در شرایط عمل آوری تر-خشک





شکل ۹. نتایج مدول الاستیسیته- کرنش محوری در تنش‌های محدودکننده (الف) ۲۰/۷ ب) ۳۴/۵ ج) ۶۸/۹ د) ۱۰۳/۴ و) ۱۳۷/۹ کیلوپاسکال در فرکانس‌های ۲، ۵ و ۱۰ هر تزن تحت شرایط غیرهمسان نمونه خاکهای C7 و C7N در شرایط عمل آوری یخبندان-ذوب

#### ۵-۶-۴- نتایج آزمایش مدول برجهندگی

الگوی تنش‌های استاندارد AASHTO T307 و الگوی تنش‌های بالاتر از AASHTO T307 نمونه‌های C7 و C7N در دو شرایط تر-خشک (W-D) و یخبندان-ذوب (F-T) و

در جدول ۷ برنامه و نتایج آزمایش تعیین مدول برجهندگی، نسبت میرایی و کرنش محوری تحت تنش‌های محدودکننده همسان (۲۰/۷، ۳۴/۵، ۶۸/۹، ۱۰۳/۴، ۱۳۷/۹ کیلوپاسکال)،

حدود (۰/۶-۰/۹۷) و برای نمونه‌های C7N حدود (۰/۱۵-۰/۷) است. به نظر می‌رسد، مقادیر مدول برجهندگی نمونه‌های C7 در شرایط عمل آوری یخبندان-ذوب بهتر از تر-خشک شدگی است. در حالیکه مدول برجهندگی نمونه‌های C7N در سطح تنش‌های آشتو، تقریباً در دو شرایط عمل آوری مشابه هم است، ولی در سطح تنش‌های بالا، در حالت تر-خشک بهتر از یخبندان-ذوب بهتر عمل کرده است. مطابق با شکل ۹-ب و ۹-ج، صرف نظر از نوع مصالح و شرایط عمل آوری، افزایش فرکانس سبب افزایش میرایی و کاهش کرنش محوری در تمام سطوح تنش می‌شود به طوریکه با تغییر فرکانس ۲ به ۱۰ هرتز (در شرایط نظیر به نظیر)، حدود تغییرات مقادیر نسبت میرایی و کرنش محوری نمونه‌ها به ترتیب ۷۶+ تا ۳۷+ (افزایش) درصد و ۵۰- تا ۱۲۳- (کاهش) درصد است. با مقایسه شکل‌های ۹-الف و ۹-ب نشان می‌دهد، تاثیر فرکانس بر روی میرایی بیشتر تر از مدول برجهندگی است.

نسبت مقادیر میرایی و کرنش محوری نمونه‌های C7N در شرایط تر-خشک نسبت به یخبندان-ذوب، به ترتیب حدود (۰/۶-۱/۲) و (۰/۷-۱/۲) است و مقادیر نظیر برای نمونه‌های C7 حدود (۰/۶-۱) و (۱-۱/۳) است.

به طورکلی، با تمرکز به متوسط مقادیر مدول برجهندگی و میرایی در سطح تنش‌های AASHTO T307 در فرکانس ۱۰ هرتز (توصیه شده برای بارگذاری اساس جاده) نمونه C7N مزیت نسبی نسبت به نمونه C7 دارند. در حالیکه، برای سطح تنش‌های بالاتر از AASHTO T307 و در فرکانس ۲ هرتز (توصیه شده برای بارگذاری اساس باند) نمونه C7، به ویژه در شرایط عمل آوری یخبندان-ذوب عملکردی بهتری دارند.

فرکانس‌های ۲، ۵ و ۱۰ هرتز ارائه شده است. حداکثر مقدار تنش‌های انحرافی سیکلی اعمالی ۰/۹ تنش‌های انحرافی استاتیکی اولیه است.

جدول ۸ نتایج متوسط مقادیر پارامترهای ذکر شده در سه حالت تنش محدودکننده همسان، استاندارد AASHTO T307 و سطح تنش‌های بالاتر از AASHTO T307 ارائه شده است. تعداد سیکل بارگذاری برای هر گام در حالت غیرهمسان ۵۰۰۰ سیکل است. اعمال این تعداد سیکل برای تعیین عملکرد و تغییرات احتمالی مدول برجهندگی انجام شده است.

به منظور مقایسه بهتر مقادیر متوسط پارامترهای مدول برجهندگی، نسبت میرایی و کرنش محوری در شکل ۹ الف تا ج ترسیم شده است. مطابق با شکل ۹-الف، تقریباً در اکثر موارد (۷۰٪ داده‌های تحت آزمایش)، افزایش فرکانس، سبب افزایش جزئی مقادیر متوسط مدول برجهندگی شده است و این روند در حالت غیرهمسانی تنش، به ویژه در سطح تنش‌های غیرهمسانی بالا محسوس‌تر از حالت تنش همسانی است. با تغییر فرکانس ۲ به ۱۰ هرتز (در شرایط نظیر به نظیر)، مقادیر مدول برجهندگی نمونه‌ها دارای تغییرات حدود ۸- تا ۳۸+ درصد است.

طبق نشریه ۲۳۴ (Ministry of roads and transportation, 2003) ضریب برجهندگی مورد نیاز لایه اساس روسازی جاده حدود ۱۹۶ مگاپاسکال است، که صرفنظر از تعداد سیکل بارگذاری نمونه‌های اصلاح شده با C7 و C7N، در هر دو شرایط عمل آوری از مدول برجهندگی مناسبی برخوردار هستند. نسبت مقادیر مدول برجهندگی نمونه‌های C7 در شرایط عمل آوری تر-خشک نسبت به یخبندان-ذوب،

جدول ۷. برنامه و نتایج آزمایش تعیین مدول برجهندگی، نسبت میرایی و کرنش محوری تحت تنش‌های محدودکننده همسان (ISO)، الگوی

تنشهای استاندارد AASHTO T307 و الگوی تنشهای بالاتر AASHTO T307 (H) نمونه خاکهای C7 و C7N در دو شرایط تر-خشک

(W-D) و یخبندان-ذوب (F-T) و فرکانس‌های ۲، ۵ و ۱۰ هرتز

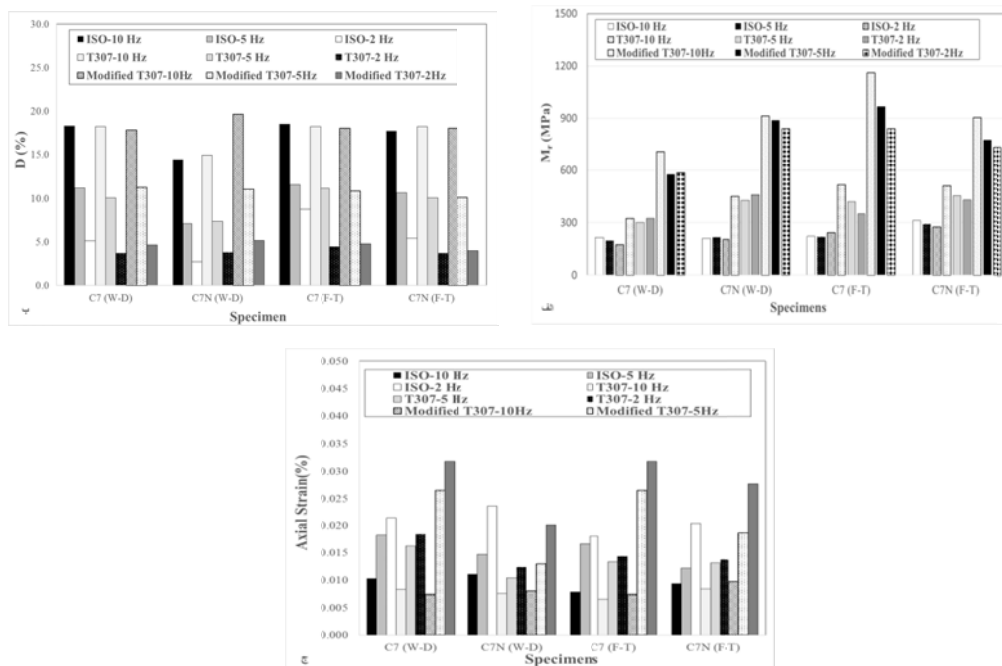
s' <sub>3</sub> (kPa)	s' <sub>1</sub> (kPa)	f (Hz)	E (MPa)				D (%)				Axial Strain (%)			
			W-D		F-T		W-D		F-T		W-D		F-T	
			C7	C7N	C7	C7N	C7	C7N	C7	C7N	C7	C7N	C7	C7N
103.4	ISO(0)	10	288.3	242.5	233.9	326	18.7	16.2	18.8	19.4	0.012	0.017	0.007	0.012
	ISO(0)	5	255	239.6	267.6	282.1	11	7.1	11.8	11	0.019	0.021	0.017	0.015
	ISO(0)	2	195.1	231.8	169.1	266.3	5.4	3	6.1	4.3	0.029	0.024	0.024	0.024
20.7	ISO(0)	10	111.3	74.7	106	171.4	17.5	16.8	17.4	18	0.007	0.013	0.004	0.008
	ISO(0)	5	119.3	71.8	118.6	179	10.3	8.3	10.4	12.9	0.010	0.012	0.008	0.007
	ISO(0)	2	95.8	46.9	104.9	149.1	4.1	2.3	4.4	10.5	0.010	0.034	0.010	0.008
	20.7	10	167.4	108.6	201.2	336	17.6	18.2	17.3	20.6	0.007	0.010	0.004	0.003

	20.7	5	156.5	101.9	106.6	231.5	9.5	9.2	10.2	9.8	0.006	0.012	0.008	0.005
	20.7	2	142.7	108.2	117.6	245.3	3.7	4.8	3.9	3.4	0.006	0.018	0.008	0.005
	41.4	10	205.7	214.2	265.4	374.6	18	17.7	18.9	22	0.007	0.009	0.007	0.006
	41.4	5	181.8	186	172.7	47.6	10.6	9.5	10.7	18	0.012	0.013	0.012	0.024
	41.4	2	163.5	181.6	145.7	41.8	4.4	4.1	4.5	5.25	0.013	0.011	0.012	0.067
	62.1	10	249.4	265.1	307.2	80.8	18.7	19.2	18.8	21.4	0.011	0.012	0.008	0.008
	62.1	5	195.7	251.3	214.4	302.2	11	9.7	10.6	14	0.019	0.013	0.008	0.009
	62.1	2	182.9	242.1	185	278.1	5	3.2	4.7	6.2	0.020	0.012	0.018	0.012
	103.4	10	303	328.9	417.1	295.9	18.9	20.5	18.8	24	0.011	0.019	0.006	0.008
	103.4	5	246	325.6	361.6	444.7	11	10	11.3	12.5	0.018	0.016	0.019	0.013
	103.4	2	204.7	317.9	283.2	387.3	4.9	4.1	4.7	6	0.029	0.016	0.017	0.017
	165.7	10	406.2	438.9	573.3	551.4	18.4	21.1	18.6	23.8	0.010	0.017	0.010	0.012
	165.7	5	327.4	433.7	499.1	501.5	11.5	10.1	10.8	12.7	0.032	0.016	0.017	0.015
	165.7	2	292.3	415.9	405.8	482.2	4.6	4.4	4.4	5.9	0.027	0.019	0.015	0.018
34.5	ISO(0)	10	132	161.5	135.6	477.4	18.7	17.2	19	15.7	0.013	0.012	0.008	0.003
	ISO(0)	5	124.2	152.2	119.7	451.4	10.9	8.3	11.6	7.9	0.014	0.012	0.017	0.005
	ISO(0)	2	95.6	145.7	90.6	419.4	4.6	2.6	5.1	2.7	0.022	0.005	0.019	0.000
	34.5	10	210.9	261	215.2	485.8	18	16.1	18.8	15.2	0.007	0.009	0.008	0.005
	34.5	5	177.5	238.2	193.6	451.4	10.2	7.3	11.2	7.5	0.010	0.010	0.013	0.005
	34.5	2	177.8	268.9	172.4	427.3	4.3	4.2	3.3	2.4	0.009	0.009	0.013	0.004
	68.9	10	260.6	330	336	523.7	18.5	16	18.8	16.4	0.012	0.008	0.008	0.008
	68.9	5	204.8	298.8	234.3	491.7	11.2	7.3	11.5	8.6	0.019	0.009	0.019	0.009
	68.9	2	181.7	312.4	193.1	483.3	4.9	3.8	5.1	2.5	0.021	0.010	0.018	0.007
	103.4	10	306.2	392.2	426.6	618.7	17.4	15.9	18.9	15.7	0.006	0.007	0.010	0.009
	103.4	5	275	383.2	311.1	524.2	11.2	8.9	11.3	7.7	0.023	0.014	0.017	0.005
	103.4	2	223.6	377.8	259.5	494.9	4.9	4.2	5.1	2.4	0.028	0.013	0.022	0.012
	172.3	10	423.6	497	680.2	632.4	17.3	16.3	18.6	16.3	0.005	0.007	0.007	0.009
	172.3	5	336.3	481.6	549.9	594	11.3	9	11	9	0.030	0.014	0.016	0.017
	172.3	2	285.5	474.8	464.4	648.7	4.8	4.4	4.7	2.5	0.034	0.020	0.019	0.014
	275	10	563.7	721	939.1	853.5	18	18.5	18.6	17.4	0.008	0.006	0.008	0.008
	275	5	440.6	700.3	745.5	804.9	10.8	10.3	10.4	9.1	0.025	0.012	0.013	0.015
275	2	434.4	691.4	631.9	784.7	4.2	4.5	4.5	2.7	0.030	0.017	0.025	0.021	
68.9	ISO(0)	10	204.4	171.7	185	346.7	17.9	13	19.6	16.7	0.006	0.008	0.013	0.009
	ISO(0)	5	182.5	167.3	138.3	324.8	11.7	6.5	12.1	9.1	0.022	0.014	0.022	0.011
	ISO(0)	2	158.3	166.9	391.3	316.6	5.1	2.8	18.8	3.1	0.027	0.020	0.007	0.014
	68.9	10	366.7	403.6	290.9	366.3	18.7	11.8	11.1	17.2	0.010	0.007	0.012	0.010
	68.9	5	298.3	410.5	259.7	346.9	11.1	4.1	4.9	9.5	0.013	0.007	0.011	0.012
	68.9	2	268.5	430.2	436	325.9	4.6	3.1	18.5	3.4	0.014	0.009	0.007	0.013
	137.4	10	406.5	463.8	642.6	439.6	18.1	13	18.2	17.7	0.008	0.006	0.006	0.010
	137.4	5	380.3	539.9	530.9	449.9	11.4	7.4	10.9	10	0.022	0.012	0.013	0.020
	137.4	2	336	557.7	398.7	404.4	4.8	3.3	4.9	3.7	0.024	0.011	0.020	0.020
	206.8	10	532.5	656.7	757.6	806.3	18.5	14.3	18.1	18.1	0.009	0.006	0.005	0.009
	206.8	5	447.1	659.1	587.7	687.8	11.1	7.9	11.3	10.3	0.021	0.011	0.018	0.019
	206.8	2	373.7	660.1	561.1	633.2	4.8	3.7	4.7	3.9	0.032	0.016	0.018	0.018
	344.7	10	719.3	1035	1112	1092.6	18.1	16.9	17.7	18	0.008	0.005	0.005	0.008

	344.7	5	585.7	995.7	937.8	930.8	11.3	9.5	10.7	10.2	0.030	0.010	0.014	0.011
	344.7	2	534.2	989.6	880.4	799.4	4.2	5	4.5	4	0.028	0.014	0.021	0.024
	551.7	10	949.5	1356	1724	1174	18	20.6	17.1	16.9	0.008	0.005	0.003	0.010
	551.7	5	777.2	1276	1421	948	11	12.1	10.4	10.3	0.027	0.010	0.013	0.022
	551.7	2	689.2	1139	1306	1237.1	4.5	6.1	4.2	4.3	0.038	0.024	0.018	0.020
103.4	103.4	10	433.3	444.3	628.8	718.8	18.4	14.9	17.7	22.3	0.010	0.011	0.007	0.004
	103.4	5	360	445.3	518.4	643.3	10.7	7.4	10.5	13.2	0.016	0.013	0.011	0.012
	103.4	2	326.4	429.6	441.3	580.2	4.5	2.5	4.1	5.9	0.017	0.011	0.010	0.013
	68.9	10	380.1	360.7	431.1	359.9	19.1	12.5	18.6	17.2	0.012	0.006	0.006	0.011
	68.9	5	318.6	489.8	374.3	253.6	11	5.8	11.3	9.6	0.014	0.007	0.013	0.011
	68.9	2	313.1	492.9	336.9	283.2	4.3	2.7	5.1	3.5	0.010	0.006	0.015	0.012
	103.4	10	431.4	0	533.3	0	18.2	0	18.6	0	0.007	0.000	0.005	0.000
	103.4	5	389.2	0	456.1	0	11.4	0	11.5	0	0.015	0.000	0.013	0.000
	103.4	2	325.3	0	407.7	0	5.2	0	4.9	0	0.021	0.000	0.014	0.000
	206.8	10	565.9	715.4	816.4	471.9	17.6	14.8	17.6	17.6	0.005	0.005	0.005	0.015
	206.8	5	496.9	713.5	641.8	393.8	11.9	8.8	11.3	10.2	0.026	0.013	0.016	0.029
	206.8	2	422.3	705.1	616.9	367.9	5.1	4.3	4.6	3.8	0.028	0.015	0.016	0.028
	413.6	10	839.4	1119	1429	938.3	17.8	18.2	17.5	17.7	0.007	0.005	0.004	0.011
	413.6	5	699.9	1090	1143	752.3	11.1	10.3	10.7	10.4	0.024	0.009	0.013	0.022
	413.6	2	608	1005	1039	671.4	4.9	5.7	4.6	4.1	0.039	0.023	0.020	0.032
	620	10	1058	1359	1886	1248	17.4	21.5	17.4	16.8	0.006	0.005	0.003	0.010
	620	5	889.8	1448	1599	1102.7	11	13.3	10.6	10	0.022	0.009	0.011	0.026
620	2	1061	1349	1316	733.1	4.4	5.7	4.9	3.8	0.027	0.022	0.030	0.073	
137.9	ISO(0)	10	330.9	356.4	363.5	396.7	18.6	12	18.6	17.1	0.009	0.006	0.006	0.008
	ISO(0)	5	290.4	384.8	343.5	380.9	12.4	6.2	11.7	9.4	0.030	0.012	0.020	0.016
	ISO(0)	2	305	368.2	301.6	363.9	6	2.7	5.5	3.4	0.024	0.017	0.030	0.036
	103.4	10	464.9	663.8	658.2	538.5	18.8	13.3	18.3	17.6	0.008	0.005	0.007	0.009
	103.4	5	390.4	543.6	541.7	489.9	11.8	7.3	11.4	9.9	0.019	0.013	0.013	0.018
	103.4	2	522.1	544.8	485.1	457.3	5.2	3.6	4.9	3.6	0.016	0.015	0.013	0.013
	137.9	10	507.2	653.9	696.3	557.9	18.8	13.3	18.3	17.9	0.008	0.005	0.006	0.010
	137.9	5	430.2	646.8	619.2	519.6	11.7	7.3	11.3	10.2	0.019	0.010	0.012	0.019
	137.9	2	522.1	654.3	567.6	482.2	5.2	4.1	4.6	3.7	0.016	0.015	0.013	0.018
	275.8	10	693.4	938.8	1036	948.7	18.6	15.2	17.7	18.3	0.007	0.005	0.005	0.008
	275.8	5	558	925.5	887.4	790.8	12.2	8.6	11.2	10.4	0.027	0.009	0.016	0.017
	275.8	2	687.1	925.1	806.7	741.5	4.9	4.9	4.8	4	0.021	0.014	0.022	0.023
	412.9	10	899.3	1160	1376	1148.3	17.9	19.5	18	18	0.007	0.006	0.004	0.008
	412.9	5	735.7	1129	1167	900.9	11.7	11.4	11.1	10.2	0.025	0.013	0.014	0.026
	412.9	2	856.1	1070	1048	846.5	5	5.4	4.8	4.2	0.029	0.022	0.019	0.025
	825.8	10	1303	1612	2188	1379.1	17.3	27.3	17.5	14.4	0.006	0.007	0.004	0.015
	825.8	5	1017	1495	1894	1007.9	11	15.7	10.4	9.3	0.036	0.019	0.012	0.034
825.8	2	1243	1398	1592	958.4	4.3	7.1	4.9	4.6	0.041	0.032	0.027	0.048	

جدول ۸ خلاصه نتایج مدول برجهندگی، نسبت میرایی و کرنش محوری نمونه خاک‌های اصلاح‌شده C7 و C7N در دو حالت عمل‌آوری تر-خشک و یخبندان-ذوب

Stress State	f (Hz)	M <sub>r</sub> (MPa)				D (%)				Axial Strain (%)			
		W-D		F-T		W-D		F-T		W-D		F-T	
		C7	C7N	C7	C7N	C7	C7N	C7	C7N	C7	C7N	C7	C7N
Isotropic Confining Pressure (A)	2	173	203	242	274	5.0	2.7	8.7	5.3	0.021	0.024	0.018	0.020
	5	197	216	217	292	11.2	7.0	11.5	10.6	0.018	0.015	0.017	0.012
	10	216	211	222	310	18.4	14.5	18.6	17.8	0.010	0.011	0.008	0.009
AASHTO T307 (B)	2	323	459	350	429	3.7	3.8	4.4	3.7	0.018	0.012	0.014	0.014
	5	301	427	418	453	10.0	7.3	11.1	10.0	0.016	0.010	0.013	0.013
	10	323	450	516	509	18.3	15.0	18.3	18.3	0.008	0.007	0.007	0.008
Modified AASHTO T307 (C)	2	585	839	839	731	4.6	5.1	4.7	4.0	0.032	0.020	0.032	0.028
	5	576	887	966	774	11.2	11.0	10.8	10.1	0.027	0.013	0.027	0.019
	10	706	911	1159	903	17.9	19.7	18.1	18.1	0.007	0.008	0.007	0.010



شکل ۹. مقادیر متوسط پارامترهای الف) مدول برجهندگی، ب) نسبت میرایی، ج) کرنش محوری نمونه‌های C7 و C7N در شرایط عمل‌آوری مختلف

## ۶- نتیجه‌گیری

برزیلی و یخبندان-ذوب و تر-خشک با دانسیته ۲/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب و رطوبت‌های ۶ و ۸ درصد ساخته شدند و در نهایت نمونه خاک اصلاح‌شده با ۷ درصد سیمان (C7) و ۶/۳ درصد سیمان و ۰/۷ درصد پلیمر (C7N) به عنوان نمونه مناسب مورد بررسی در آزمایش‌های دینامیکی برای تعیین مدول برجهندگی و میرایی انتخاب شد. اندازه‌گیری مدول

در این تحقیق، یک نمونه خاک با درصد ریزدانه ۲۳ درصد و PI بیش از ۱۲ درصد که به صورت اصلاح نشده به عنوان اساس راه و باند مناسب نمی‌باشد، تحت آزمایش‌های مختلف قرار گرفت. ابتدا نمونه‌هایی با ترکیب‌های مختلفی از سیمان و افزودنی پلیمر معدنی با مدت‌های مختلف عمل‌آوری برای انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری و کشش

بالعکس است. ولی برای شرایط عمل‌آوری تر-خشک تقریباً در کل سطح تنش‌های مورد بررسی، داده‌های نمونه C7N بالای داده‌های مربوط به نمونه C7 است.

بطورکلی با افزایش فرکانس، متوسط مقادیر مدول برجهندگی و نسبت میرایی افزایش ولی کرنش محوری نمونه‌ها کاهش یافته است. تاثیر فرکانس بر روی نسبت میرایی و کرنش محوری محسوس‌تر از مدول برجهندگی است.

در هر دو شرایط عمل‌آوری و در سطح تنش‌های معمول AASHTOT307، مدول برجهندگی برای نمونه‌های C7N بیشتر از C7 است. ولی روند برای میرایی بالعکس است و تقریباً نمونه‌های C7 عملکرد بهتری دارند.

در هر ۳ فرکانس بارگذاری، پارامترهای برجهندگی مدول، نمونه C7، در حالت یخبندان-ذوب بهتر از حالت تر-خشک عمل کرده است و در فرکانس ۱۰ هرتز، اختلاف مشهودتر می‌شود.

توصیه می‌شود نمونه C7N در سطح تنش‌های استاندارد AASHTOT307 (اساس جاده) یعنی تا تنش سیکی ۲۷۵ کیلوپاسکال و در شرایط آب و هوایی تر-خشک استفاده گردند و برای سطح تنش‌های بالا (اساس باند فرودگاه) ترجیحاً فقط از C7 استفاده گردد. به نظر می‌رسد، پس از اعمال سطح تنش سیکی بیش از ۲۷۵ کیلوپاسکال، نرخ افزایش نسبت میرایی برای نمونه پلیمری افزایش یافته است، به گونه‌ای که اختلاف پارامترهای ذکر شده برای نمونه C7N نسبت به نمونه C7 رو به کاهش است. این تغییرات می‌تواند به ساختار ذاتی پلیمر مرتبط باشد که اعمال بارهای سیکی بالا منجر به شکست میکروکریستال‌های سوزنی شکل می‌شود.

## ۷- سپاسگزاری

داده‌های این مقاله از پروژه تحقیقاتی تحت عنوان "بررسی تاثیر ماده افزودنی پلیمری-معدنی نیکوفلاک بر روی خاک اصلاح شده با سیمان به عنوان مصالح راه و باند فرودگاه" با شماره (۹۶-۳۹-۲۲۱۷۲) توسط مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی استخراج شده است.

الاستیسیته و نسبت میرایی طبق استاندارد ASTM D3999 انجام شد و برای تعیین مدول برجهندگی اساس راه از استاندارد AASHTOT307 استفاده شد. همچنین انتخاب تنش‌های محدود کننده و تنش‌های سیکی برای بارگذاری اساس باند فرودگاه مطابق با شرایط واقعی و ادبیات فنی الگویی پیشنهاد شد. خلاصه نتایج آزمایش‌های استاتیکی و دینامیکی به شرح ادامه می‌باشد.

در مقایسه با رفتار نمونه خاک C7، استفاده از ترکیب بهینه سیمان و پلیمر معدنی (C7N) موجب دسترسی به مقاومت تک محوری و دوام بالاتر خاک اصلاح شده در زمان عمل‌آوری کوتاه‌تر می‌شود.

CBR خاک اصلاح نشده در حالت غرقاب ۵/۷ درصد حاصل شد که به تنهایی برای استفاده در لایه اساس مناسب نمی‌باشد. اصلاح خاک با سیمان و پلیمر معدنی به طور چشمگیری مقدار CBR را افزایش داده است. در تمام نمونه‌های اصلاح شده، مقدار CBR بالای ۱۰۰٪ بدست آمد. افزایش رطوبت سبب کاهش CBR نمونه‌های C7N در اثر غرقاب شدن، افت مقاومت کمتری نسبت به نمونه‌های C7 تجربه کردند. در آزمایش تر-خشک، میزان افت وزنی و افت مقاومت نمونه‌های C7N نسبت به نمونه‌های C7 کمتر است. میزان افت وزنی کل نمونه‌ها در محدوده ۵/۵-۷ درصد و کاهش مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها به ترتیب در محدوده ۲۸-۳۸ درصد و ۳۰-۵ درصد است.

در آزمایش یخبندان-ذوب، مشابه تر-خشک میزان افت وزنی و افت مقاومت نمونه‌های C7N نسبت به نمونه‌های C7 کمتر است و میزان افت وزنی کل نمونه‌ها در محدوده ۶-۷/۱۳ درصد و کاهش مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها به ترتیب در محدوده (۶۰-۴۰) و (۸۵-۶۶) درصد است. افزودن پلیمر معدنی مقاومت نمونه‌ها C7N در مقایسه C7 را در برابر چرخه‌های دوام افزایش داده است.

نقطه داده‌های نسبت مدول الاستیسیته-کرنش محوری در شرایط عمل‌آوری یخبندان-ذوب، طبق AASHTOT307 (مناسب اساس جاده) برای نمونه C7N بالای از مقادیر نظیر نمونه C7 است، در حالیکه برای سطح تنش‌های بالاتر روند

## ۸- مراجع

- منصورزاده، سید محمد محبوبی اردکانی و آقایی آرای، عطا (۱۴۰۱). ارزیابی مقاومت فشاری و رفتار تنش-کرنش لایه اساس حاوی تراشه آسفالت. نشریه پژوهشنامه حمل و نقل، دوره ۲۰، شماره ۲، ۱۴۶-۱۲۹.
- for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis. *Int West Conshohocken*, Pa.
- ASTM D496. (2017). Standard specification for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. *Int West Conshohocken*, Pa.
- ASTM D4318. (2018). Standards, for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils This c of soils. *Int West Conshohocken*, Pa.
- BHRC Report. (2020). Assessment Effect of Polymer-Mineral Nicoflok Additive on Soil Stabilized by Cement as a Material in Roads and Airport Runways Application (persion). *In Road, Housing and Urban Development Research Center*.
- Biswal, D. R., Sahoo, U. C., & Dash, S. R. (2020). Mechanical characteristics of cement stabilised granular lateritic soils for use as structural layer of pavement. *Road Materials and Pavement Design*, 21(5), 1201-1223.
- doi.org/10.1080/14680629.2018.1545687**
- Chen, W. B., Weiqiang, F., & Yin, J. H. (2019). Effects of water content on resilient modulus of a granular material with high fines content. *Construction and Building Materials*, 236, 117542.
- doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117542**
- Chittoori, B. C. S., Puppala, A. J., & Pedarla, A. (2018). Addressing Clay Mineralogy Effects on Performance of Chemically Stabilized Expansive Soils Subjected to Seasonal Wetting and Drying. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(1), 1-12.
- doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001796**
- Gowthaman, S., Nakashima, K., & Kawasaki, -آقایی آرای، عطا، قضاوی، محمود. لشنی زند، فرشاد. رحمانی، ایرج (۱۴۰۲). مدول برجهندگی تحت تنش‌های راه و باند برای خاک اساس اصلاح شده با سیمان و آهک. نشریه /امیرکبیر، دوره ۵۵، شماره ۱۰، ۸-۷.
- AASHTO T307. (2017). Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials. *American Association of state Highway and Transportaton Officials*, Washington , DC.
- Arabani, M., & Haghsheno, H. (2020). The Effect of Polymeric Fibers on the Mechanical Properties of Cement-Stabilized Clay Soils in Northern Iran. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 14(5), 557-568.
- doi.org/10.1080/19386362.2019.1658057**
- ASTM D854. (2006). Standard Test Methods for of Soil Specific Gravity Solids by Water Pycnometer. *Int West Conshohocken*, Pa.
- ASTM D6913. (2009). Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis. *Int West Conshohocken*, Pa.
- ASTM D1883. (2010). Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils. *Int West Conshohocken*, Pa.
- ASTM D1633. (2010). Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders. *Int West Conshohocken*, Pa.
- ASTM D1557. (2010). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>)). *Int West Conshohocken*, Pa .
- ASTM D559. (2011). Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures. *Int West Conshohocken*, Pa.
- ASTM D560. (2015). Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures. *Int West Conshohocken* ,Pa.
- ASTM D7928. (2016). Standard Test Method

husk ash for stabilization of sub-base materials in construction and repair projects of forest roads. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 37(2), 333–343.

-Pitthaya, J., Panich, V., & Suksun, H. (2015). Flexural Strength Characteristics of Compacted Cement-Polypropylene Fiber Sand. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(9).

**doi.org/10.1061/(ASCE)MT.19435533.0001205**

-Ricardo, A. A., S., O. P., & G., S. K. (2007). Estimation of a Resilient Modulus Model for Cohesive Soils Using Joint Estimation and Mixed Effects. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(8), 984–994.

**doi.org/10.1061/(ASCE)10900241(2007)133:8(984)**

-Sheikhi, S., Zare, P., Abbaspour, M., Fahimifar, A., & Siddiqua, S. (2021). Evaluation of fiber-reinforced and cement-stabilized rammed-earth composite under cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 296, 123746.

-Solanki, P., Zaman, M. M., & Dean, J. (2010). Resilient Modulus of Clay Subgrades Stabilized with Lime, Class C Fly Ash, and Cement Kiln Dust for Pavement Design. *Transportation Research Record*, 2186(1), 101–110.

**doi.org/10.3141/2186-11**

-Soldo, A., & Miletic, M. (2022). Durability against Wetting-Drying Cycles of Sustainable Biopolymer-Treated Soil. *Polymers*, 14 (19).  
**doi.org/10.3390/polym14194247**

-Su, Y., Cui, Y.-J., Dupla, J.-C., & Canou, J. (2021). Effect of water content on resilient modulus and damping ratio of fine/coarse soil mixtures with varying coarse grain contents. *Transportation Geotechnics*, 26, 100452.  
**doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100452**

-Udomchai, A., Buritatum, A., Suddepong, A., Hoy, M., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., & Horpibulsuk, J. (2021). Evaluation of durability against wetting and drying cycles of cement-natural rubber latex stabilised unpaved road under cyclic tensile loading. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(12), 4442-4453.

S. (2022). Effect of wetting and drying cycles on the durability of bio-cemented soil of expressway slope. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(4), 2309–2322.

**doi.org/10.1007/s13762-021-03306-1**

-Guan, Y., Zhang, Z., Zhang, X., & J Zhu. (2020). Effect of superabsorbent polymer on mechanical properties of cement stabilized base and its mechanism. *Transportation Safety and Environment*, 2(1), 58-68.

-Hanifa, K., Abu-farsakh, M. Y., & Gautreau, G. P. (2015). Design Values of Resilient Modulus for Stabilized and Non-Stabilized Base. *Report No. FHWA/LA.14/521*.

-Hata, T., Clarà Saracho, A., GuhaRay, A., & Haigh, S. K. (2022). Strength Characterization of Cohesionless Soil treated with Cement and Polyvinyl Alcohol. *Soils and Foundations*, 62:101238.

**doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101238**

-Jahandari, S., Saberian, M., Tao, Z., Mojtahedi, S. F., Li, J., Ghasemi, M., Rezvani, S. S., & Li, W. (2019). Effects of saturation degrees, freezing-thawing, and curing on geotechnical properties of lime and lime-cement concretes. *Cold Regions Science and Technology*, 160, 242–251.

**doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.02.011**

-Liu, H., Sun, S., Wei, H., & Li, W. (2022). Effect of freeze-thaw cycles on static properties of cement stabilised subgrade silty soil. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(11), 3770–3782.

**doi.org/10.1080/10298436.2021.1919306**

-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, 178–186.

**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.061**

-Ministry of roads and transportation. (2003). Iran Highway Asphalt Paving code No.234. (*Persian*).

-Nasiri, M., Lotfalian, M., Modarres, A., & Wu, W. (2016). Optimum utilization of rice

properties of cement-treated aggregate material - A review. *Materials and Design*, 33(1), 496–502. [doi.org/10.1016/j.matdes.2011.04.055](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.04.055)

-Yazdandoust, F., & Yasrobi, S. S. (2010). Effect of cyclic wetting and drying on swelling behavior of polymer-stabilized expansive clays. *Applied Clay Science*, 50(4), 461–468.

[doi.org/10.1016/j.clay.2010.09.006](https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.09.006)

[doi.org/10.1080/10298436.2021.1950719](https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1950719)

-Wu, M., Gaspard, K., Louay, P., Mohammad, N., Author, C., & Wu, Z. (2003). *Laboratory Mechanistic Evaluation of Soil Cement Mixtures with Fibrillated-polypropylene-fibers*.

-Xuan, D. X., Houben, L. J. M., Molenaar, A. A. A., & Shui, Z. H. (2012). Mechanical