خصوصیات ژئوتکنیکی مارن تثبیت شده با سیمان جهت کاربرد در ساخت لایه‌های روسازی راه تحت شرایط ذوب و یخبندان

مقاله علمی – پژوهشی

محمد موسوی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
روزبه دبیری*، دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: rz.dabiri@iau.ac.ir

دریافت: ۱٤۰٤/۰۱/۲۰– پذیرش: ۱٤۰٤/۰۵/۰۱
صفحه ۵۳۲-۵۰۸

چکیده

مارن یکی از انواع خاک‌های حساس در پروژه‌های عمرانی و بویژه در هنگام احداث بدنه راه انعطاف پذیر در مناطق سردسیر هست. هنگامی که مارن در معرض شرایط آب و هوایی سرد و یخبندان قرار می‌گیرد بدلیل جذب آب و تشکیل عدسی‌های یخی دچار تورم و افزایش حجمی می‌شود. زمانیکه درجه حرارت محیط افزایش می‌یابد بدلیل آب شدن این عدسی‌ها و ایجاد حفرات در لایه‌های خاکی مارنی، انقباض و کاهش حجم و افت توانایی اتفاق می‌افتد. هدف از تحقیق حاضر، بررسی تاثیر سیمان بر مارن شهر تبریز جهت کاربرد در احداث لایه‌های روسازی بدنه راه هست. در این مطالعه، سیمان با مارن به میزان ٤، ۶ و ۱۰ درصد مخلوط شده و سپس بر روی نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز عمل آوری انجام گرفته است. جهت رسیدن به اهداف تحقیق، آزمون‌های خواص خمیری، تراکم، نسبت باربری کالیفرنیا (در دو حالت خشک و اشباع)، مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی غیر مستقیم و نفوذپذیری انجام یافته است. نتایج بدست آمده نشان داده که ترکیب بهینه مخلوط مارن و ۱۰ درصد سیمان هست. زیرا، این مخلوط میزان مقاومت فشاری تک محوری را ۲۳/٤ برابر عدد CBR را ۱۲ برابر افزایش داده و مقدار تورم را ۸۳ درصد کاسته است. همچنین، در اثر چرخه ذوب و یخبندان مقادیر افت وزنی و کاهش حجم بوقوع پیوسته برابر با ۵ درصد اتفاق افتاده که این شرایط، امکان استفاده از مخلوط بهینه را جهت ساخت لایه های روسازی راه در مناطق سردسیر فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: مارن، سیمان، تثبیت، لایه روسازی راه، شرایط ذوب و یخبندان

۱- مقدمه

مارن‌ها جزء خاک‌های مساله‌دار و حساس در پروژه‌های عمرانی بویژه روسازی راه مطرح هستند. با توجه به اینکه اکثر لایه‌های روسازی راه ساخته شده در داخل شهرها از نوع انعطاف پذیر هستند، بنابراین نوع مصالح انتخابی برای احداث آن بسیار حائز اهمیت است. خاک‌های مارنی با ترکیب ناهمگن خود، متشکل از کانی‌های رسی، کربنات کلسیم و ذرات به اندازه لای تعریف می‌شوند (Ural, 2018). وجود مواد معدنی رسی به شکل پذیری و رفتار انقباضی و تورمی آنها کمک می‌کند، در حالی که محتوای کربنات کلسیم بر استحکام و تراکم پذیری آنها تأثیر می‌گذارد. نسبت‌های خاص این اجزا به طور قابل توجهی بر خصوصیات ژئوتکنیکی کلی خاک تأثیر می‌گذارد. فعل و انفعال بین خاک رس و کربنات کلسیم باعث می‌شود خاک رس مارنی نسبت به تغییرات رطوبت حساس باشد، زیرا کسر رس با مرطوب شدن منبسط شده و پس از خشک شدن منقبض می‌شود، در حالی که کربنات کلسیم می‌تواند به سیمان شدن و همچنین حساسیت به هوازدگی کمک کند. عموماً، در مطالعات مختلف خاک مارن به عنوان یک خاک کربناته دریایی سخت تا بسیار سخت به رنگ سبز نیز تعریف شده و حتی به عنوان یک نهشته حاوی لای و رس به همراه کلسیت خاکستری یا سبز معرفی کرده اند (Fondjo et al., 2021). (Mc Carthy, 1982)

بیان نموده است که مارن یک سنگ آهک نرم و غنی از خاک رس است و (Bell, 1981) اشاره کرده است که مارن اصطلاحی با معانی مختلف است که برای سنگهایی با ۳۵ تا ٦۵ درصد کربنات به کار می‌رود. در زمین‌شناسی مهندسی و مهندسی ژئوتکنیک، از اصطلاحاتی مانند خاک‌های رنگی، خاک‌های کربناته و مارن برای مشخص کردن ترکیب خاک ریزدانه با مواد معدنی کربناته استفاده می‌شود. هدف از تحقیق حاضر، بررسی تاثیر سیمان بر مارن شهر تبریز در احداث لایه‌های روسازی بدنه راه تحت اثر شرایط آب و هوایی یخبندان هست که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. کلانشهر تبریز واقع در شمال غربی ایران، دارای خاک‌های متنوع ریزدانه چسبنده رسی، سیلتی و مارنی می‌باشد. شایان ذکر است مطالعات قابل توجهی بر روی خصوصیات خاک‌های چسبنده رسی و سیلتی شهر تبریز توسط محققان مختلف انجام گرفته است. (Hooshmand et al., 2011) بر روی خصوصیات مکانیکی و فیزیکی مارن رسی تبریز مطالعه نموده‌اند. ایشان، خصوصیات مقاومتی و تغییر شکل این خاکها و رفتار تنش-کرنش آنها با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی و صحرائی بررسی نمودند. سه نوع از این خاک‌ها در شهر تبریز به رنگ‌های زرد، سبز و خاکستری یافت می‌شوند. در جدول (۱) خلاصه خصوصیات فیزیکی و خمیری نمونه‌های مارن تبریز ارائه شده است.

همانطور که ذکر گردید، بخش قابل توجهی از خاک شهر تبریز واقع در شمال غرب کشور از نوع خاک‌های مارنی (رس کربنات‌دار) هست و رخنمون آنها در بیشتر نواحی این شهر مخصوصا شمال و شمال شرقی قابل مشاهده است. زمان تشکیل این مارن‌ها به دوران‌های زمین شناسی میوسن و پلیوسن مربوط می‌گردد. بیشتر مارن‌های تبریز متعلق به بستر باغمیشه می‌باشند. از نظر زمین شناسی، بستر باغمیشه بین بستر قرمز بالایی و سازند رسوبات ماهی دار متعلق به پلیوسن قرار می‌گیرند. در جدول (۲) ستون چینه شناسی منطقه تبریز نشان داده شده است. مارن‌های تبریز به دلیل حرکات زمین ساختی در انتهای دوران سوم زمین شناسی، دچار چین خوردگی و گسلش متعدد گردیده‌اند (Hooshmand et al., 2011). (شکل ۱)

جدول ۱. خلاصه خصوصیات فیزیکی و خمیری مارن تبریز (Hooshmand et al., 2011)

فشار تورم (Kg/cm^2)	وزن مخصوص (Kg/cm^3)	نسبت تخلخل	رطوبت (٪)	PI (%)	LL (%)	طبقه بندی خاک	نوع خاک
۱-۲	۱/۷	۰/۷۵-۰/۹۵	۲۵	۳۵-۳۰	۷۵-۵۵	CL-CH	مارن زرد
۱-۲	۱/۸	۰/٦۵-۰/۸۵	۲۰	۲۵-۲۰	٦۵-۵۰	CL-CH	مارن سبز
۰/۵-۱/۵	۱/۹	۰/۵-۰/۷	۱۵	۲۰-۱۵	٦۰-٤۰	CL-CH, MH	مارن خاکستری

جدول ۲. ستون چینه شناسی منطقه تبریز (Hooshmand et al., 2011)

ستون چینه شناسی	دوران زمین شناسی
آبرفت	کواترنری
بستر رودخانه (marl, Lapilli, Diatomite)	پلیوسن
بستر باغمیشه (Marl with shale and lignite) بسترهای بالایی قرمز (Marl, Sandstone, Siltstone)	میوسن

Plq^{c} : کنگلومرای نیمه سخت به همراه میان لایه‌هایی از ماسه سنگ، سیلت‌سنگ و رس‌سنگ

M_2^{mg} : تناوبی از مارنهای زرد، سبز و خاکستری رنگ گچ‌دار

شکل ۱. موقعیت لایه‌های مارنی موجود در شهر تبریز به همراه محدوده مورد مطالعه

(برگرفته از نقشه زمین شناسی تبریز به مقیاس: ۱/۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین شناسی کشور، ۱۳۹۵)

براساس مطالعات صورت گرفته توسط (Alizadeh and Dabiri, 2018; Alizadeh and Dabiri, 2019; Alizadeh et al., 2020; Sadrkarimi et al., 2006 and Derafshinou et al., 2024) مشاهده شده در مناطق کوی فرشته و شهرک مرزداران شهر تبریز نیز رخنمون‌هایی از خاک‌های مارنی موجود هست. در این مناطق که در شمال شرقی شهر تبریز واقع شده‌اند، لایه‌های رسی لای دار وجود دارد که در معرض مسیر زهکشی آبهای زیر سطحی ارتفاعات شمالی شهر تبریز قرار گرفته و از پتانسیل نشست تحکیمی قابل توجه برخوردار هستند. این شرایط باعث می‌شود که تعداد قابل توجهی از ساختمان‌های مسکونی اجرا شده در این منطقه در سالهای گذشته دچار آسیبهای جدی شده و لایه‌های روسازی موجود در منطقه بدلیل جذب آب و تشکیل عدسی‌های یخی دچار نشست و تغییر شکل‌های گسترده گردند. (Dadadashzadeh et al., 2023) بر روی خاک‌های مارن خاکستری شمال غرب شهر تبریز نیز مطالعاتی را انجام دادند. نتایج تحقیقات آنها نشان داده است توسعه شهر تبریز در ضلع شرقی، بخش بزرگی از شهر در مناطقی مانند شهرک ولیعصر، باغمیشه، رشدیه، مرزداران و امتداد آن تا جاده اهر در توپوگرافی ناهموار، بیشتر بر روی آن قرار گرفته است. با توجه به توسعه شهر بر روی لایه‌های مارن و تمایل به ساخت ساختمان‌های بلند و نیاز به پی‌گذاری در لایه‌های عمیق‌تر، مطالعات بیشتر در این لایه‌ها بایستی صورت بگیرد. زیرا خرابی سازه‌های سنگین در برابر زلزله های احتمالی، رانش زمین و خرابی سازه های نگهبان در گودبرداری های عمیق و خرابی راه ها از نقطه نظر فیزیکی و مکانیکی خاک ها امکان بالایی دارد. (Barzegari et al., 2024) در مورد خاک‌های مارنی بخش شرقی تبریز تحقیقاتی را در مناطق شهرک مرزداران، شهرک، باغمیشه، ولیعصر ۲ و کوی نصر در شهر تبریز مطالعاتی را انجام دادند. نتایج بدست آمده نشان داده است میزان محتوای رسی و کربناتی بر روی پارامترهای مقاومتی و تغییر شکل پذیری مارن‌های تبریز کاملا مشهود است و فراوانی کانی‌های رسی بخصوص مونتموریلونیت در مارن‌های زرد و سبز عامل مهمی در کاهش دوام و مقاوت آنها می باشد. بررسی صحرایی و آزمایشگاهی حاکی از تنوع ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی این نهشته‌ها هست. بر اساس نتایج به دست آمده، این مارن‌ها دارای دوام ضعیف تا بسیار ضعیف هستند. مقاومت آنها کمتر از یک مگاپاسکال هست و

این نهشته‌ها رفتاری بینابین (خاک سخت و سنگ بسیار نرم) از خود نشان می دهند. رفتار مهندسی آنها به مقدار خاک رس و کربنات کلسیم بستگی دارد. به منظور پیشگیری از آسیب‌های احتمالی بر راه‌ها و ابنیه‌های ژئوتکنیکی احداث شده بر روی این مارنها ضروری بر حسب مورد، مطالعات ژئوتکنیکی، تحلیل پایداری، تعیین نشست و ظرفیت باربری و تثبیت خاک بایستی انجام بگیرد. از سوی دیگر، شهر تبریز با توجه به قرار گرفتن در منطقه کوهستانی، جزء نقاط سرد سیر ایران است. دمای هوا در تابستان بین ۱۸+ تا ۳۳+ و در زمستان بین ۲۰- تا ۱۰+ در نوسان می باشد. اغلب در طول زمستان شهر دارای بارش برف بوده و مناطق اطراف شهر از برف پوشیده هست و دارای سرمای خشک است. متوسط بارش باران ۲۲۵ میلی متر در سال می باشد. میانگین ارتفاع تبریز از سطح دریای آزاد ۱۳٤۰ متر است. همچنین، به دلیل واقع شدن شهر تبریز در عرض‌های بالای جغرافیای ایران و ارتفاع زیاد، میانگین سالانه دمای آن نسبت به میانگین سالانه دمای اکثر مناطق کشور کمتر بوده و جزء مناطق سردسیر کشور محسوب می‌شود. همانطورکه ذکر گردید، اختلاف دمای حداقل و حداکثر مطلق شهر زیاد می‌باشد و هر چقدر از نواحی شرقی تبریز به سمت کوهستان‌های جنوب غربی حرکت می کنیم از میزان دمای هوا کاسته می شود (Alizadeh et al., 2020). بنابراین، شرایط آب و هوایی و یخبندان موجود در محدوده مورد مطالعه، تأثیرات قابل توجهی می‌تواند بر روی بر بدنه لایه‌های روسازی راه ساخته شده در اینن مناطق بگذارد. با کاهش دما به سمت زیر صفر، رطوبت و آب موجود در منافذ و ترک‌های لایه‌های روسازی یخ زده و منبسط می‌شود، که این امر باعث ایجاد تنش‌های داخلی و ترک‌خوردگی در بدنه روسازی می‌گردد. تکرار چرخه‌های ذوب و یخزدگی نیز به تدریج باعث کاهش مقاومت و یکپارچگی لایه‌ها شده و منجر به ایجاد خرابی‌هایی مانند چاله‌ها و ناهمواری‌های سطحی می‌شود. علاوه بر این، استفاده از مواد ضد یخ و نمک‌ها برای مقابله با یخزدگی می‌تواند باعث تسریع در فرسایش و تخریب مصالح روسازی گردد.

۲- پیشینه تحقیق

همانطور که ذکر گردید، وجود خاک‌های مارنی که اغلب در پروژه‌های عمرانی و راهسازی قابل مشاهده هست، به دلیل حساسیت آن‌ها به تغییرات حجمی تحت شرایط مختلف رطوبت و دما، چالش‌های مهمی را بوجود آورد. این خاک‌ها که با ترکیب مخلوط خاک رس و مواد آهکی مشخص می‌شوند، به‌ویژه در مناطق سردسیر که سیکل های انجماد و ذوب را تجربه می‌کنند مشکل‌ساز هستند (Rolt et al., 1987). یخبندان و ذوب آب منفذی متناوب در ماتریکس خاک باعث ایجاد تنش‌های قابل توجهی می‌شود که منجر به تغییرات حجمی و اختلال بالقوه در ساختار خاک می‌گردد. این فرآیند می‌تواند منجر به از دست دادن استحکام، افزایش تراکم پذیری و ایجاد ترک‌ها و شکاف‌ها شود(Zhang et al., 2019). انبساط و انقباض ناشی از این چرخه‌ها می‌تواند منجر به خرابی در لایه‌های روسازی راه همچون شیار، ترک خوردگی و ناپایداری کلی ساختاری گردد. شدت این اثرات به عواملی مانند رطوبت اولیه، سرعت تغییر دما و تعداد چرخه های انجماد و ذوب بستگی دارد(Xu et al., 2010). جهت تثبیت و بهسازی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های مساله‌دار روندهای مختلفی وجود دارد همانند روش مکانیکی (استفاده از تراکم با کاربرد غلتک)، روش شیمیایی (براساس واکنش شیمیایی و استفاده از مواد افزودنی همچون مواد نانو، سیمان، آهک و قیر) و امروزه از مصالح ژئوسنتتیک بمنظور بهبود ویژگی خاک های ضعیف مورد استفاده می‌نمایند. سیمان به عنوان یک عامل اتصال دهنده که استحکام و سفتی خاک را افزایش می‌دهد، می‌تواند نقش مهمی در تثبیت خاک ایفا نماید (Ashraf et al., 2018). هیدراتاسیون سیمان، ژل هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) تولید می‌کند که ذرات خاک را به هم متصل نموده و توده‌ای قوی تر و منسجم تر را تشکیل می‌دهد (Ekinci et al., 2020). افزودن سیمان همچنین باعث کاهش انعطاف پذیری و پتانسیل انقباض و متورم شدن خاک می‌شود و مقاومت آن را در برابر تغییرات حجمی بهبود می‌بخشد. مقدار سیمان مورد نیاز برای تثبیت موثر به خصوصیات خاص خاک و سطح مطلوب بهبود بستگی دارد. از سوی دیگر، بررسی تأثیر سیکل‌های ذوب و یخبندان بر رفتار مارن بهسازی شده، به‌ویژه در حضور سیمان به‌عنوان ماده تثبیت کننده، نقش مهمی در تحلیل عملکرد سازه‌های ژئوتکنیکی در مناطق سردسیر دارد. تثبیت با سیمان موجب تغییر در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مارن شده و مقاومت آن را در برابر یخزدگی افزایش می‌دهد. یافته‌های پژوهشی نشان می‌دهند که درحالی‌که چرخه‌های ذوب و یخبندان می‌توانند اثرات مخربی بر بسیاری

از مصالح داشته باشند، ویژگی‌های مهندسی خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان را می‌توان به گونه‌ای اصلاح کرد که تأثیرات منفی این فرآیند کاهش یابد. اولا، سیکل‌های ذوب و یخبندان، به دلیل تبدیل آب به عدسی‌های یخی و بازگشت آن به حالت مایع، تغییرات حجمی قابل‌توجهی ایجاد کرده و مارن تثبیت‌شده را در معرض انبساط و انقباض مداوم قرار می‌دهند (Yang et al., 2023). این فرآیند می‌تواند منجر به ایجاد ریزترک‌ها و تخریب ساختاری تدریجی مواد شود. با این‌حال، افزودن سیمان به‌عنوان عامل تثبیت‌کننده، انسجام و مقاومت فشاری مارن اصلاح‌شده را به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. یافته‌های (Ma et al., 2023) نشان می‌دهند که خاک رس سیلتی تثبیت‌شده با سیمان، در مقایسه با خاک بهسازی نشده، افت مقاومت کمتری را پس از قرارگیری در معرض سیکل‌های ذوب و یخبندان تجربه می‌کند و این فرایند نشان می‌دهد سیمان در بهبود دوام تحت سیکل های شدید دمایی موثر است. همچنین، پژوهش‌های (Lu et al., 2023) نشان می‌دهد که افزودن سیمان نه‌تنها مقاومت فشاری بلکه مدول الاستیسیته خاک‌های متورم شونده را نیز بهبود می‌بخشد، که این امر به کاهش میزان تورم و انقباض طی فرآیندهای یخ‌زدگی و ذوب کمک می‌کند.

همچنین، فرآیند تثبیت با سیمان نه‌تنها از کاهش مقاومت جلوگیری می‌کند، بلکه یکپارچگی ریزساختاری مواد را نیز بهبود می‌بخشد. (Wang et al., 2016) مشاهده کردند که خاک‌های تثبیت‌شده به‌طور مؤثر، حتی پس از تجربه سیکل های متعدد ذوب و انجماد، حداقل آسیب ظاهری را نشان می‌دهند، بطوریکه میزان سیمان مصرفی بهینه می‌تواند منجر به بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک تثبیت شده و افزایش دوام گردد. علاوه بر این، اندرکنش سیمان با مارن منجر به تغییر در ساختار منافذ می‌شود. مطالعات ایشان با یافته‌های (Shariyarkian et al., 2021) همخوانی دارد، که نشان داده‌اند استفاده از افزودنی‌ها می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های تثبیت‌شده را در مواجهه با تنش‌های حاصل از سیکل های ذوب و یخبندان بهبود دهد. تحقیقات انجام شده توسط (Kalkan, 2022) نشان داده است که ترکیب گل قرمز(پسماند حاصل از معادن استخراج آلومینیوم و بوکسیت) و سیمان با خاک‌های رسی، باعث بهبود رفتار این مواد در طول سیکل‌های ذوب و انجماد شده و به افزایش خصوصیات مکانیکی مارن تثبیت شده منجر گردیده است. همچنین، (Xu et al., 2023) مشاهده کردند ترکیب الیاف‌های بازالت و شیشه در ماتریس‌های سیمانی که در خاک مارن استفاده شده بود به‌طور قابل توجه توانایی باربری خاک تثبیت شده را در برابر سیکل های ذوب و یخبندان افزایش دادند. همچنین نتایج بدست آمده از مطالعات (Deng et al., 2024) نشان داده است که قرارگیری در معرض سیکل های ذوب و یخبندان موجب تغییرات قابل‌توجهی در ریزساختارهای داخلی می‌شود که به‌طور مستقیم بر ویژگی‌های مقاومت فشاری و نفوذپذیری خاک تثبیت شده تاثیرگذار است.

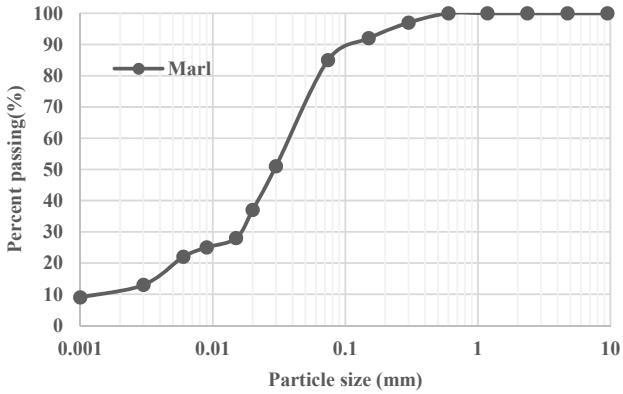
در مورد تثبیت و بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های خاکی در محدوده مورد مطالعه تحقیقات مختلفی انجام گرفته است. بطوریکه (Asadollahi and Dabiri, 2017) با کاربرد الیاف شیشه (GFRP) خاک مارن منطقه کوی فرشته تبریز را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان داده است افزودن ۰/۸ درصد الیاف شیشه به خاک رس سبب بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی و توانایی باربری خاک تثبیت شده گردیده است. (Sahebkaram and Dabiri, 2017) تاثیر الیاف پلی پروپیلن و الیاف شیشه بر روی خصوصیات ژتوتکنیکی خاک مارن منطقه مرزداران شهر تبریز را مطالعه کردند. نتایج نشان داده است الیاف پلی پروپیلن نسبت به الیاف شیشه تاثیر گذاری بهتری در افزایش توانایی باربری خاک رس نشان داده است. همچنین، (Ghaffari and Dabiri, 2021) با ترکیب نانو رس و پودر سنگ آهک خاک بهسازی خاک رس محدوده کوی نصر را مطالعه نمودند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد مخلوط ۵ ٪ نانو رس به همراه ۱۰ ٪ پودر سنگ آهک با مدت زمان عمل آوری ۷ روزه مقاومت برشی خاک تثبیت شده را ۳۳ درصد افزایش می دهد. (Farsamnia and Dabiri, 2023) تاثیر خاکستر خاک اره درخت تبریزی را بر روی بهسازی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک مارن شهرک مرزداران تبریز را مطالعه نمودند. ایشان مشاهده نمودند افزودن ۳ درصد خاکستر خاک اره به خاک رس پس از ١٤ روز عمل آوری مقاومت فشاری تک محوری را ٦٥ درصد و مقاومت برشی را ۵۳ درصد نسبت به حالت تثبیت نشده افزایش داده است. با مرور مطالعات انجام یافته مشاهده می گردد، در زمینه تثبیت خاک مارنی بویژه در محدوده مورد مطالعه کمتر از سیمان استفاده گردیده است. همچنین اثر شرایط ذوب و یخبندان نیز در نظر گرفته نشده است. این مطالعه به بررسی اثر بخشی سیمان در تثبیت خاک مارن می‌پردازد، به‌ویژه بر عملکرد آن در شرایط

ذوب-یخبندان تمرکز می‌کند تا باعث افزایش عملکرد طولانی مدت در هنگام ساخت لایه های روسازی راه‌ها در جاده‌ها گردد.

۳- مواد و مصالح

همانطورکه ذکر شده است، هدف از تحقیق حاضر بررسی امکان کاربرد خاک مارن تثبیت شده با سیمان بمنظور بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی آن در مناطق سردسیر و بویژه در شرایط ذوب و یخبندان جهت ساخت لایه‌های روساز راه هست. خاک محدوده مورد مطالعه از نوع مارن زرد است که از منطقه شهرک مرزداران در شهر تبریز تهیه شده است (شکل ۲). در این محدوده مارن زرد رخنمون داشته و در عمق بتدریج مارن سبز زیتونی و سپس در عمق‌های بیشتر مارن به رنگ خاکستری و تیره مشاهده می‌گردد. منحنی دانه‌بندی مارن مورد مطالعه براساس استانداردهای ASTM D421-85 و ASTM D422-63 تعیین گردیده و در شکل (۳) قابل مشاهده است. مطابق با سیستم طبقه بندی متحد مارن مورد مطالعه از نوع (CL-CH) بوده خصوصیات خمیری آن طبق استاندارد ASTM D4318-95a و چگالی ویژه آن با کاربرد استاندارد ASTM D854-2002 اندازه گیری گردیده که نتایج آن در جدول (۳) قابل مشاهده است. سیمان مورد استفاده از نوع سیمان پرتلند نوع ۲ هست که از کارخانه سیمیان صوفیان شهر تبریز تهیه شده و عناصر شیمیایی موجود در خاک رس مارنی و سیمان براساس آزمون XRD در جدول (٤) قابل مشاهده بوده و تصاویر مصالح مورد مطالعه در شکل(٤) ارائه شده است.

شکل ۲. محل تهیه نمونه خاک مارن مورد مطالعه در منطقه شهرک مرزداران در شهر تبریز.



شکل ۳. منحنی دانه بندی مصالح مورد مطالعه

شکل٤. تصاویر مصالح مورد مطالعه، الف- مارن، ب- سیمان پرتلند نوع ۲

جدول ۳. ویژگی‌های ژئوتکنیکی مارن مورد مطالعه.

مارن	مشخصات خاک
۲/۸۸	چگالی ویژه Gs
۹٦	درصد ذرات رس(%) C
۷٤	حد مایع(%) LL
۳٤	شاخص پلاستیسیته(%) PI

جدول ٤. درصد وزنی عناصر شیمیایی مارن و سیمان پرتلند نوع ۲ مورد مطالعه

مارن	سیمان	ماده تشکیل دهنده
٤۸/۵۵	۲۰/۱	SiO_2
۱۲/۸۵	٤/۵۰	Al_2O_3
۵/٦۷	۳/۷	Fe_2O_3
۰/۵۷	–	TiO_2
۷/۲۲	٦۰/۵۰	CaO
٤/۳٤	۳/۱۲	MgO
۰/٦۱	۰/٤۵	Na_2O
۲/۳۷	۰/۵۰	K_2O
۲/۸–	–	SO_3
۰/۰۷	-	MnO
۰/۱	-	P_2O_5
۱٤/۸۵	۷/۱۳	عناصر دیگر
–	٤۸/٦۷	C_3S
–	۲۰/۹۱	C_2S
–	۵/٦٦	C_3A
–	۱۱/۲٦	C_4AF

٤- کارهای آزمایشگاهی

طبق استاندارد ASTM C618-22 ، هنگامیکه مجموع مخلوط عناصر $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ نزدیک به ۷۰ درصد باشد رفتار پوزولانی یا سیمانی شدن مشاهده می‌شود. طبق جدول(۲) می توان دریافت خاک مارن دارای میزان نزدیک به ۷۰ درصد است که بیان کننده وجود این شرایط است. از سوی دیگر، وجود عناصر CaO ، SiO_2 و Al_2O_3 در سیمان سبب می‌شوند هنگامیکه با آب ترکیب می گردند طبق واکنش زیر

(۱)

$$CaO + H_2O \xrightarrow{280\ cal/g \longrightarrow CaO} Ca(OH)_2$$
$$Ca(OH)_2 \longrightarrow Ca^{2+} + 2(OH)^-$$
$$Ca^{2+} + 2(OH)^- + SiO_2 \longrightarrow C-S-H$$
$$Ca^{2+} + 2(OH)^- + Al_2O_3 \longrightarrow C-A-H$$

باعث تشکیل ژل های C-S-H و C-A-S-H گردند. واکنش سیمانی شدن می‌تواند نشست و تغییر شکل خاک در اثر جذب آب را کاهش دهد. همچنین، این واکنش می‌تواند، ذرات بخش ریزدانه خاک را به یکدیگر چسبانده و ذرات درشت دانه‌تر تشکیل دهد. این فرآیند، در واکنش‌های شیمیایی زیر قابل مشاهده است (Hayder et al., 2020).

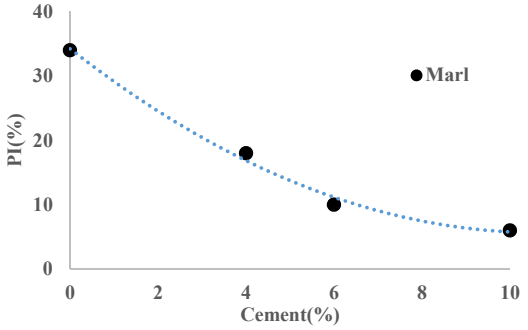
در تحقیق حاضر، با توجه به مرور مطالعات گذشته بمنظور بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک مارن، ابتدا سیمان به مقدار ٤، ٦ و ۱۰ درصد به مارن افزوده می‌شود. بمنظور آماده سازی نمونه‌های مخلوط یکنواخت و همگن جهت ارزیابی پارامترهای ژئوتکنیکی از استاندارد ASTM C305-14 استفاده گردید. در این فرآیند، ابتدا مخلوط مارن و سیمان به همراه آب (با توجه به رطوبت بهینه) در داخل میکسر(مخلوط کن) مخلوط شدند تا چسبندگی مناسب بین مصالح بوجود آید. سپس، طبق استاندارد، ۳۰ ثانیه عملیات مخلوط متوقف شده تا مصالح رطوبت را به همراه سیمان جذب نمایند. در ادامه، عملیات مخلوط کردن نمونه‌ها به مدت ۳۰ ثانیه با دور کند، ۱۵ ثانیه تمیزکاری و ٦۰ ثانیه با دور متوسط انجام گرفت. پس از اتمام عملیات اختلاط، نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در ظرف پلاستیکی سر بسته در شرایط دمای محیطی ۲۳ نگهداری کرده تا فرایند عمل آوری انجام پذیرد. برای نیل به اهداف تحقیق حاضر، بمنظور آنکه بتوان نمونه‌های یکسانی را از نظر ابعاد مورد مقایسه قرار داد، در مرحله اول نمونه‌ها در قالب آزمون نسبت باربری کالیفرنیا آماده گردیدند. سپس، آزمون تراکم آزمایشگاهی طبق استاندارد ASTM D698-2000 انجام گرفت. سپس بمنظور تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی مخلوط مورد مطالعه، آزمون مقاومت فشاری تک محوری طبق استاندارد ASTM D2166-16، آزمون مقاومت کششی غیر مستقیم طبق استاندارد ASTM C496، آزمون نفوذپذیری به صورت ارتفاع متغیر طبق استاندارد ASTM D5084 ، آزمون نسبت برابری کالیفرنیا (CBR) در دو حالت خشک و اشباع طبق استاندارد ASTM D1883 انجام گرفت. در انتها، بمنظور بررسی تاثیر شرایط ذوب و یخبندان بر روی نمونه های تثبیت شده آزمون سیکل ذوب و یخبندان طبق استاندارد ASTM D560 در ۲۸ دوره تناوب و بین دماهای ٤ به ۱۸- درجه سانتیگراد و بالا بردن آن از ۱۸- به ٤ درجه سانتیگراد می‌باشد که این امر به طور متناوب در مدت زمانی که کمتر از ۲ ساعت و بیشتر از ۵ ساعت نباشد، انجام گرفته است. برنامه آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی نمونه های مورد مطالعه طبق جدول(۵) قابل مشاهده می‌باشد. لازم به یادآوری است، تعداد ۲۵ درصد آزمایش‌ها به منظور تدقیق نتایج تکرار شده‌اند.

جدول ۵. برنامه آزمون های صورت گرفته بر روی نمونه‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر

Tests								Test Program		
Thaw and freezing	Permeability	Splitting Tensile Strength	CBR (dry and saturate)	Uniaxial strength	Compaction	PI	Cement (%)	Soil Matrix	نام نمونه	No
*	*	*	*	*	*	*	0	Marl	M-0C	1
*	*	*	*	*	*	*	4	Marl	M-4C	2
*	*	*	*	*	*	*	6	Marl	M-6C	3
*	*	*	*	*	*	*	10	Marl	M-10C	4

نتایج حاصل از آزمایش حدود آتربرگ

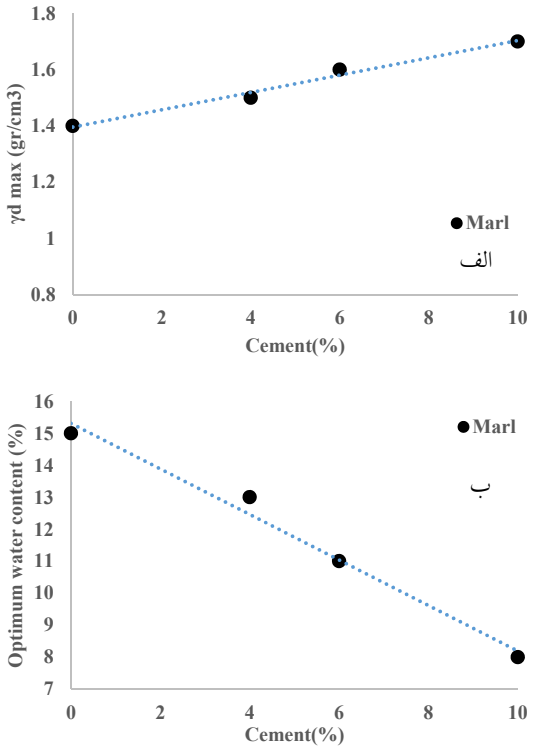
نتایج حاصل از آزمون حدود آتربرگ بر روی نمونه‌های مارن تثبیت شده با درصدهای مختلف سیمان پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در شکل (۵) ارائه شده است. بر اساس یافته‌ها، مشخص گردید با افزایش درصد سیمان، مقدار شاخص خمیری خاک مارن کاهش می‌یابد. به‌طور مشخص، زمانی که درصد سیمان به ۱۰ درصد می‌رسد، شاخص خمیری مارن تا ۱۸ درصد کاهش نشان می‌دهد. با توجه به ترکیب خاک مارن که معمولاً شامل کربنات کلسیم ($CaCO_3$) و رس است، افزودن سیمان می‌تواند منجر به واکنش‌های شیمیایی با این مواد و تشکیل ترکیبات پایدارتر شود. به‌ویژه، هیدروکسید کلسیم ناشی از سیمان می‌تواند با کربنات کلسیم موجود در خاک مارن واکنش داده و ترکیباتی نظیر سیلیکات کلسیم یا آلومینات کلسیم ایجاد کند. این واکنش‌ها نیز به کاهش خاصیت خمیری خاک کمک می‌کنند. نتایج این پژوهش با یافته‌های مطالعات انجام‌شده توسط (Wang et al., 2016) و (Lu et al., 2023) هم راستا می‌باشد. با توجه به کاهش شاخص خمیری و جذب رطوبت، می‌توان اذعان نمود از مخلوط مارن حاوی ۱۰ درصد سیمان برای احداث لایه‌های روسازی راه و همچنین تثبیت خاک زیر پی در محدوده مورد مطالعه و مناطق سردسیر استفاده نمود.



شکل ۵. تاثیر درصدهای مختلف سیمان بر روی شاخص خمیری مارن مورد مطالعه بعد از ۲۸ روز عمل آوری

نتایج حاصل از آزمایش تراکم

بر اساس نمودارهای ارائه‌شده در شکل‌های (٦-الف و ب)، می‌توان نتایج حاصل از آزمون تراکم روی نمونه‌های خاک مورد مطالعه را بررسی کرد. با توجه به شکل (٦-الف)، مشاهده می‌شود که افزایش مقدار سیمان به خاک مارن، منجر به افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر(γd_{max}) پس از ۲۸ روز عمل‌آوری شده است. به‌طوری‌که با افزایش مقدار سیمان تا ۱۰ درصد، مقدار (γd_{max}) حدود ۱/۲ برابر افزایش یافته است. این رشد را می‌توان به واکنش‌های شیمیایی اتفاق‌افتاده نسبت داد. به‌طوریکه هیدروکسید کلسیم ($Ca(OH)_2$) تولیدشده از سیمان با کربنات کلسیم موجود در خاک مارن واکنش داده و ترکیباتی مانند سیلیکات کلسیم یا آلومینات کلسیم تشکیل می‌دهد. این واکنش‌ها باعث افزایش چگالی ذرات و کاهش فضای خالی بین آن‌ها می‌شوند، که به‌تبع آن منجر به افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر می‌گردد. همچنین، شکل (٦-ب) نشان می‌دهد در خاک مارن، با افزایش مقدار سیمان تا ۱۰ درصد، رطوبت بهینه پس از ۲۸ روز عمل‌آوری به میزان ٤٦ درصد کاهش یافته است. این کاهش رطوبت بهینه نیز ناشی از واکنش‌های شیمیایی ذکرشده است که به بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک کمک می‌کنند. این بهبود ویژگی‌ها، شامل کاهش تخلخل و افزایش مقاومت خاک، می‌تواند استفاده از مصالح تثبیت‌شده را برای ساخت لایه‌های روسازی راه و بهبود عملکرد خاک زیر پی، به‌ویژه در مناطق سردسیر، تسهیل کند. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه با یافته‌های ارائه‌شده توسط محققان دیگر، همچون (Ma et al., 2023) و (Lu et al., 2023) همخوانی دارد.

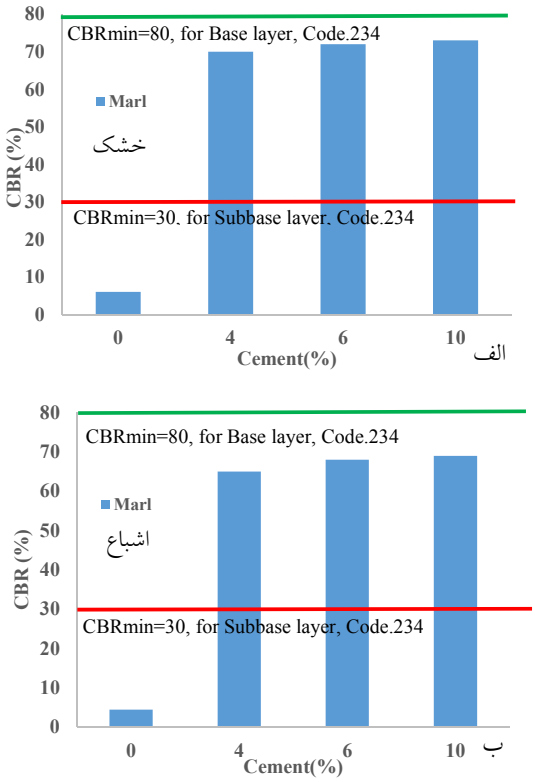


شکل ٦. تاثیر سیمان بر روی نتایج آزمون تراکم مارن مورد مطالعه بعد از ۲۸ روز عمل آوری

الف- وزن مخصوص خشک حداکثر، ب- رطوبت بهینه

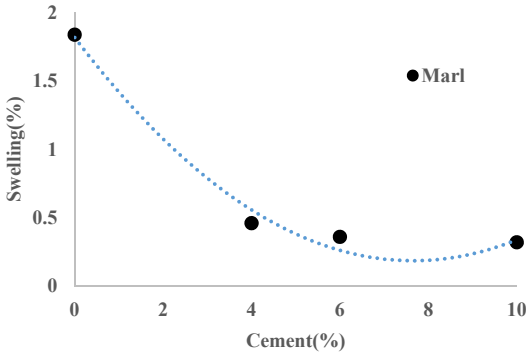
نتایج حاصل از آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)

به‌منظور بررسی تأثیر سیمان بر توانایی باربری مخلوط مارن و سیمان پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، آزمون نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) در دو حالت خشک و اشباع انجام گردید. این آزمایش با استفاده از انرژی تراکمی معادل ٥٦ ضربه برای هر لایه و به‌منظور اندازه‌گیری نفوذ پیستون به میزان ۲/٥ سانتی‌متر اجرا گردید. نتایج حاصل از این آزمایش در نمودارهای شکل‌های (۷-الف و ب) ارائه شده‌اند. در شکل (۷-الف)، نتایج آزمایش CBR در شرایط خشک نشان داده شده است. براساس این نتایج، مشاهده می‌شود که در حالتی که سیمان به مارن اضافه نشده است، طبق نشریه شماره ۲۳٤ سازمان برنامه و بودجه جمهوری اسلامی ایران(Code No.234, 2003)، مارن فاقد توانایی باربری مناسب برای استفاده در ساخت لایه‌های روسازی راه است. با افزودن سیمان به مارن و انجام عملیات عمل‌آوری به مدت ۲۸ روز، روند تغییرات توانایی باربری به‌صورت صعودی دیده می‌شود. به‌طوری‌که با افزایش مقدار سیمان تا ۱۰ درصد، ظرفیت باربری خاک مارن به میزان ۱۲ برابر نسبت به حالت تثبیت‌نشده افزایش می‌یابد. این بهبود قابل‌توجه، موجب می‌شود که مارن تثبیت‌شده برای استفاده در احداث لایه خاک بستر (طبق نشریه ۲۳٤) مناسب تشخیص داده شود. همچنین، در شکل (۷-ب)، نتایج آزمون CBR در وضعیت اشباع ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مارن خالص در این شرایط دارای توانایی باربری ناچیزی است. با افزودن سیمان به مارن و انجام عمل‌آوری به مدت ۲۸ روز، شرایط خاک بهسازی‌شده به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌یابد. به‌طوری‌که با افزودن ۱۰ درصد سیمان، ظرفیت باربری خاک مارن به میزان ۱٥/۷ برابر نسبت به حالت تثبیت‌نشده افزایش می‌یابد. این وضعیت نشان می‌دهد که طبق نشریه ۲۳٤، مارن مخلوط‌شده با سیمان در شرایط اشباع نیز برای استفاده در ساخت لایه خاک بستر آماده می‌گردد. نتایج این پژوهش با یافته‌های مطالعات انجام‌شده توسط (Wang et al., 2016) و (Lu et al., 2023) همخوانی دارد.



شکل ۷. تاثیر سیمان بر روی نتایج آزمون نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) مارن مورد مطالعه بعد از ۲۸ روز عمل آوری
الف- حالت بارگذاری خشک، ب- حالت بارگذاری اشباع

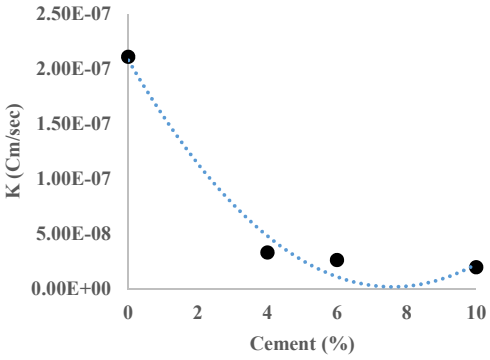
در آزمون نسبت باربری کالیفرنیا در شرایط اشباع، تأثیر سیمان بر میزان تورم خاک مارن مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این آزمایش در شکل (۸) ارائه شده‌اند. بررسی نمودار نشان می‌دهد که افزودن سیمان به مارن به‌طور قابل‌توجهی مقدار تورم را کاهش داده است. بطوریکه با افزایش میزان سیمان تا ۱۰ درصد، مقدار تورم خاک مارن به میزان ۸۳ درصد نسبت به حالت خالص کاهش می‌یابد. با توجه به یافته‌های حاصل از آزمون CBR در هر دو حالت خشک و اشباع، می‌توان بیان کرد که ترکیب مارن با ۱۰ درصد سیمان به‌طور کلی برای استفاده در احداث لایه خاک بستر روسازی در مناطق سردسیر و مناطق مستعد یخبندان مناسب است.



شکل ۸. تاثیر سیمان بر روی میزان تورم مارن مورد مطالعه بعد از ۲۸ روز عمل آوری

نتایج حاصل از آزمایش نفوذپذیری

یکی از پارامترهای کلیدی در طراحی لایه‌های روسازی راه، میزان نفوذپذیری و توانایی زهکشی مصالح مورد استفاده است. این موضوع به‌ویژه در مناطق سردسیر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا میزان نفوذپذیری خاک می‌تواند نقش مهمی در کاهش اثرات عمق یخبندان و جلوگیری از تشکیل عدسی‌های یخی در خاک‌های حساس (مانند مارن) داشته باشد. این عوامل به‌طور مستقیم بر دوام و عملکرد بدنه راه تأثیرگذار هستند. به همین منظور، آزمون نفوذپذیری با ارتفاع متغیر بر روی نمونه‌های خاک مورد مطالعه انجام شد. نتایج حاصل از این آزمایش در شکل (۹) ارائه شده‌اند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با افزودن سیمان به خاک مارن، میزان نفوذپذیری به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. این کاهش را می‌توان به دو عامل اصلی نسبت داد: ابتدا، افزودن سیمان منجر به پر شدن فضای خالی بین ذرات خاک و افزایش تراکم آن می‌شود. سپس، در طول فرآیند عمل‌آوری و هیدراتاسیون سیمان، ترکیبات جدیدی مانند هیدرات سیلیکات کلسیم تشکیل می‌شوند که با ایجاد پیوندهای قوی بین ذرات، سبب کاهش بیشتر فضای خالی و در نتیجه کاهش نفوذپذیری می‌گردند. بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده، می‌توان نتیجه گرفت که کاهش نفوذپذیری و بهبود ویژگی‌های زهکشی در خاک مارن تثبیت‌شده با سیمان، به‌ویژه با افزایش مقدار سیمان، می‌تواند به‌طور مؤثری از تشکیل عدسی‌های یخی در شرایط یخبندان جلوگیری کند. این امر موجب افزایش دوام و کارایی لایه‌های روسازی در مناطق سردسیر می‌شود. نتایج بدست آمده با مطالعات صورت گرفته توسط (Deng et al., 2024) هم خوانی دارد.



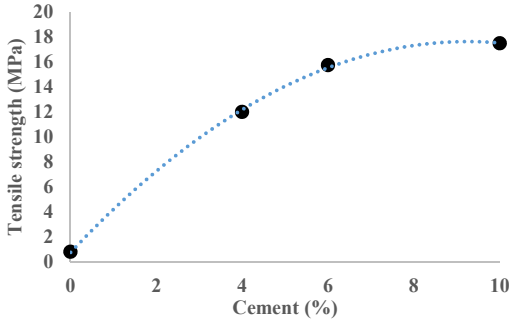
شکل ۹. تاثیر سیمان بر روی تغییرات نفوذپذیری مارن مورد مطالعه بعد از ۲۸ روز عمل آوری

نتایج حاصل از آزمایش کشش غیر مستقیم (برزیلین)

یکی از چالش‌های مهم در طراحی لایه‌های روسازی راه، مقاومت کششی پایین مصالح مورد استفاده در این لایه‌ها است که می‌تواند به وقوع نشست و تغییر شکل در بدنه راه منجر شود. به‌منظور ارزیابی تأثیر سیمان بر ظرفیت باربری کششی مارن، آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم (آزمون برزیلی) بر اساس استاندارد ASTM C496 انجام شد. این آزمایش با سرعت بارگذاری ۰/۰۵ مگاپاسکال بر ثانیه (MPa/sec) انجام گرفت. مقاومت کششی نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، بر اساس رابطه (۲) محاسبه شد. در این رابطه، σ_t مقاومت کششی، P نیروی اعمال شده، D قطر و L طول نمونه استوانه‌ای می‌باشد.

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi . L . D} \quad (۲)$$

نتایج حاصل از آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم در شکل (۱۰) ارائه شده‌اند. براساس این نتایج، مشاهده می‌شود که مقاومت کششی خاک مارن در حالت تثبیت نشده بسیار ناچیز است. در تمامی نمونه‌ها، با افزایش میزان سیمان و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، مقاومت کششی غیرمستقیم به‌صورت صعودی افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که با افزودن ۱۰ درصد سیمان، ظرفیت باربری خاک مارن در مقایسه با حالت تثبیت‌نشده به میزان ۲۲ برابر افزایش می‌یابد. علت این رفتار را می‌توان به‌صورت زیر توضیح داد، در مخلوط مارن با ۱۰ درصد سیمان، ذرات ریزتر خاک مارن و سیمان به‌طور بهینه‌تری با یکدیگر ترکیب می‌شوند. این ترکیب بهینه منجر به تشکیل پیوندهای قوی‌تر بین ذرات می‌شود که در نتیجه آن، مقاومت کششی خاک به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. بنابراین، می‌توان بیان کرد که استفاده از ترکیب بهینه مارن و سیمان نه تنها موجب افزایش مدول الاستیسیته می‌شود، بلکه منجر به کاهش میزان نشست در لایه‌های روسازی احداث‌شده نیز می‌گردد.



شکل ۱۰. تغییرات مقاومت کششی غیر مستقیم مارن مورد مطالعه بعد از ۲۸ روز عمل آوری.

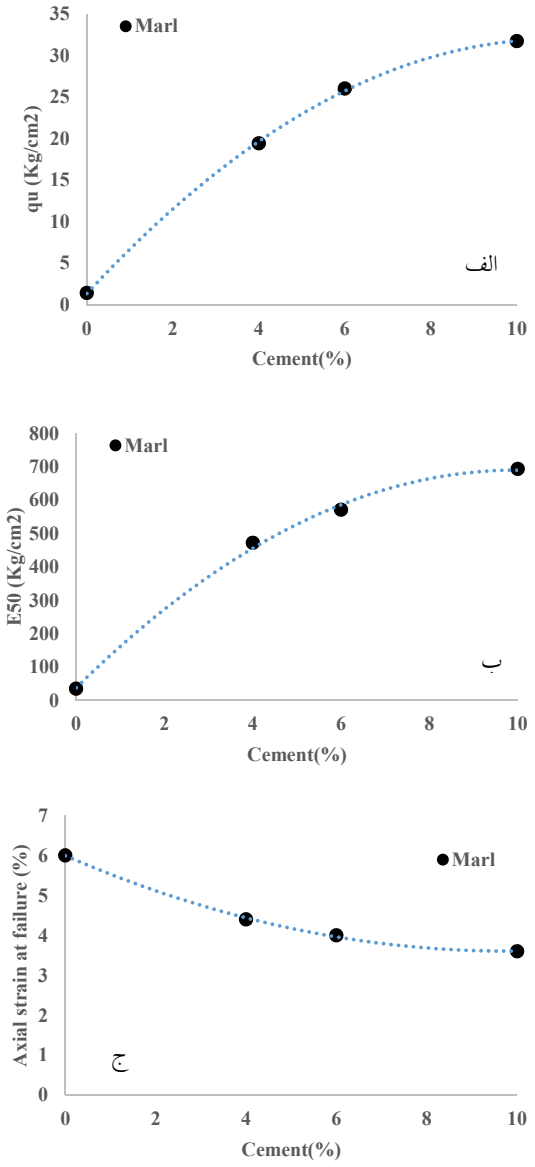
نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

همانطور که ذکر گردید، در تحقیق حاضر نمونه‌های مورد ارزیابی در اندازه قالب آزمون نسبت باربری کلیفرنیا (CBR) آماده گردید. بمنظور انجام آزمون مقاومت فشاری تک محوری طبق شکل(۱۱) دو صفحه فلزی در قسمت بالا و پایین نمونه قرار داده شد تا بتوان اثر بارگذاری بر روی آن را در یک سطح یکنواخت توزیع نمود.

شکل۱۱. نحوه انجام آزمون مقاومت فشاری تک محوری بر روی نمونه های مورد مطالعه.

نتایج حاصل از آزمایش در نمودارهای شکل‌های (۱۲-الف، ب و ج) ارائه شده‌اند. براساس شکل (۱۲-الف)، مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری تک‌محوری خاک مارن با افزایش میزان سیمان و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که با افزودن ۱۰ درصد سیمان، مقاومت فشاری تک‌محوری در لحظه گسیختگی برای مارن تثبیت‌شده به میزان ۲۳/٤ برابر نسبت به حالت تثبیت‌نشده افزایش می‌یابد. این افزایش مقاومت را می‌توان به فرآیند هیدراتاسیون سیمان و

تشکیل محصولات سیمانی نسبت داد. در طی این فرآیند، سیمان با آب واکنش داده و ترکیباتی مانند ژل C-S-H (کلسیم سیلیکات هیدراته) و هیدروکسید کلسیم ($Ca(OH)_2$) تولید می‌کند. ژل C-S-H به‌عنوان یک چسب طبیعی عمل کرده و ذرات خاک مارن و سیمان را به‌هم متصل می‌نماید، که این امر منجر به افزایش مقاومت مکانیکی مخلوط می‌شود. علاوه بر این، برخی از سیلیکات‌ها و آلومینات‌های موجود در خاک مارن با $Ca(OH)_2$ تولیدشده از سیمان واکنش پوزولانی انجام می‌دهند و ساختاری سخت و مقاوم ایجاد می‌کنند. این واکنش‌ها به افزایش استحکام خاک در طول زمان کمک می‌کنند، به‌ویژه پس از ۲۸ روز عمل‌آوری. نتایج مطاعات حاضر با تحقیقات صورت گرفته توسط (Ma et al., 2023)، (Lu et al., 2023) و (Deng et al., 2024) هم راستا می‌باشد.



شکل ۱۲. تاثیر سیمان بر روی نتایج آزمون مقاومت فشاری تک محوری مارن مورد مطالعه بعد از ۲۸ روز عمل آوری
الف- مقاومت فشاری در لحظه گسیختگی، ب- مدول سکانت (E_{50})، ج- کرنش محوری در لحظه گسیختگی

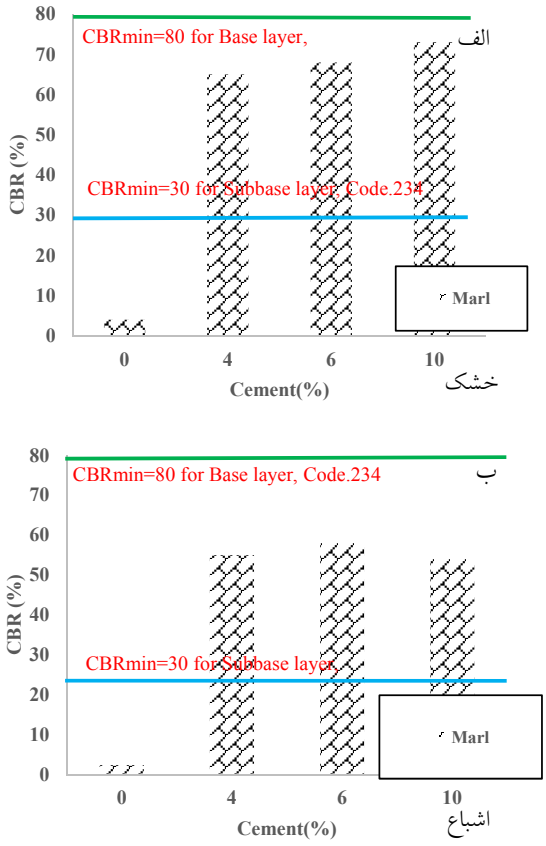
در ادامه، به‌منظور ارزیابی تأثیر سیمان بر میزان شکل‌پذیری خاک مارن، مدول تغییرشکل سکانت (E_{50}) نمونه‌ها با استفاده از منحنی تنش-کرنش حاصل از آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری تعیین شد. نتایج این محاسبات در شکل (۱۲-ب) ارائه شده‌اند. مشاهده می‌شود که مشابه روند تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری در لحظه گسیختگی، با افزایش میزان سیمان تا ۱۰ درصد در خاک مارن و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، مقدار مدول سکانت در مارن تثبیت‌شده به میزان ۱۹/۷ برابر نسبت به حالت تثبیت‌نشده افزایش می‌یابد. مدول سکانت، معیاری از سختی و سفتی ماده در برابر بارگذاری است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با فرآیند هیدراتاسیون سیمان، مخلوط سخت‌تر شده و رفتار ماده از حالت نرم و پلاستیک به حالت ترد و شکننده‌تر تغییر می‌کند. این تغییر رفتار به این معناست که در برابر یک مقدار مشخص تنش، تغییرشکل کمتری رخ می‌دهد که منجر به افزایش مدول سکانت می‌شود. در مارن بدون سیمان، بارگذاری معمولاً منجر به ایجاد تغییرشکل‌های دائمی (کرنش‌های پلاستیک) می‌شود. اما با افزودن سیمان، مخلوط رفتار الاستیک‌تری از خود نشان می‌دهد و کرنش‌های پلاستیک کاهش می‌یابند. این تغییر در رفتار مکانیکی ماده باعث افزایش شیب منحنی تنش-کرنش و در نتیجه افزایش مدول سکانت می‌شود. در شکل (۱۲-ج)، تغییرات کرنش محوری در لحظه گسیختگی نمونه های مورد مطالعه قابل مشاهده می‌باشد. با توجه نمودارها می توان دریافت با افزایش میزان سیمان تا ۱۰ درصد در تمامی نمونه‌ها کرنش محوری در لحظه گسیختگی کاهش می‌یابد. زیرا، با افزایش سیمان و هیدراسیون آن، مخلوط سفت‌تر و سخت‌تر می‌شود. این سفتی باعث می‌شود که نمونه قبل از گسیختگی، کرنش کمتری تحمل کند و در نتیجه نمونه به جای آنکه به تدریج تغییر شکل دهد و رفتار نرم و شکل پذیر نشان دهد، به‌صورت ناگهانی می‌شکند و رفتار ترد و شکننده بروز می‌نماید.

نتایج حاصل از آزمایش ذوب و یخبندان بر روی نمونه‌ها

همانطورکه در بخش های گذشته به آن اشاره گردید، یکی از موضوعات مهم در هنگام ساخت لایه‌های روسازی راه در مناطق سردسیر، استفاده از مصالح مقاوم در برابر شرایط ذوب و یخبندان می باشد. درصورت عدم وجود مصالح مناسب، هدف از بهسازی لایه‌های خاکی حساس در برابر شرایط ذوب و یخبندان، جلوگیری از ایجاد و تشکیل عدسی‌های یخی است. در این بخش، نمونه‌های مربوط به آزمایش‌های انجام یافته که در بخش‌های فوقانی به آن اشاره شده طبق استاندارد ASTM D560 در ۲۸ دوره تناوب و بین دماهای ٤ به ۱۸- درجه سانتیگراد و بالا بردن آن از ۱۸- به ٤ درجه سانتیگراد می‌باشد که این امر به طور متناوب در مدت زمانی که کمتر از ۲ ساعت و بیشتر از ۵ ساعت نباشد، تحت آزمون ذوب و یخبندان قرار گرفتند. پس از سیکل ذوب و یخبندان، نمونه‌ها بلافاصله مجدداً تحت آزمونهای نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)، مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی غیر مستقیم قرار گرفتند که نتایج بدست آمده به شرح ذیل بیان می‌گردند.

تاثیر شرایط ذوب و یخبندان بر نتایج حاصل از آزمون نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)

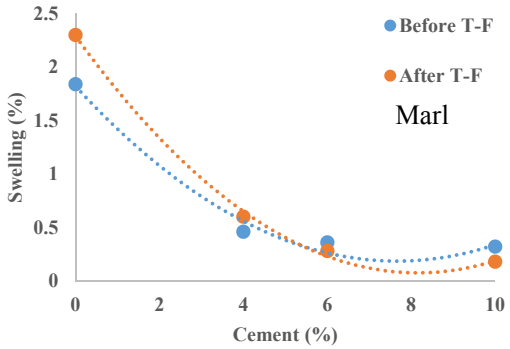
نتایج حاصل از آزمون نسبت باربری کالیفرنیا(CBR) بر روی نمونه های مورد مطالعه در دو شرایط خشک و اشباع بعد از سیکل های ذوب و یخبندان در نمودارهای شکل(۱۳-الف و ب) ارائه شده است. در شرایط بارگذرای خشک، همانطورکه در شکل(۱۳-الف) قابل مشاهده است مارن به تنهایی دارای ظرفیت باربری بسیار کمی است. از سوی دیگر، هنگامیکه سیمان به مارن اضافه می شود و ۲۸ روز عمل آوری بر روی انجام می‌گیرد و تحت آزمون سیکل ذوب و یخبندان قرار می گیرند، نتایج بدست آمده نشان می‌دهد یک روند صعودی در افزایش ظرفیت باربری اتفاق افتاده است. بطوریکه این افزایش در حضور ۱۰ درصد سیمان در نمونه‌های مارن ۱۸/۲۵ برابر است. این شرایط امکان کاربرد مخلوط‌های ذکر شده را جهت احداث لایه زیراساس طبق نشریه ۲۳٤ فراهم می‌کند. در شکل(۱۳-ب)، نتایج حاصل از آزمون (CBR) بر روی نمونه های مورد مطالعه در حالت اشباع بعد از انجام سیکل‌های ذوب و یخبندان ارائه شده است. همانطور که دیده می‌شود در حالت کلی نمونه‌های بارگذرای شده در حالت اشباع در مقایسه با شرایط بارگذاری خشک دارای ظرفیت باربری پایینی هستند. این روند در ارتباط خاصیت جذب آب توسط ذرات مارن و بالا بودن خاصیت پلاستیسیته و شکل پذیری آنها است. هنگامیکه سیمان به مارن افزوده می‌شود و ۲۸ روز عمل آوری انجام می گیرد مشاهده می‌شود با افزایش میزان حضور سیمان ظرفیت باربری خاک نیز روند صعوی طی می‌کند. میزان مقاومت در ترکیب ٦ درصد سیمان با مارن ۲٤/۲ برابر افزایش یافته است.



شکل۱۳. تاثیر شرایط ذوب و یخبندان بر روی نتایج حاصل از آزمون نسبت باربری کالیفرنیا(CBR) نمونه های مورد مطالعه بعد از ۲۸ روز عمل آوری، الف- حالت خشک، ب- حالت اشباع

تاثیر شرایط ذوب و یخبندان بر میزان تورم

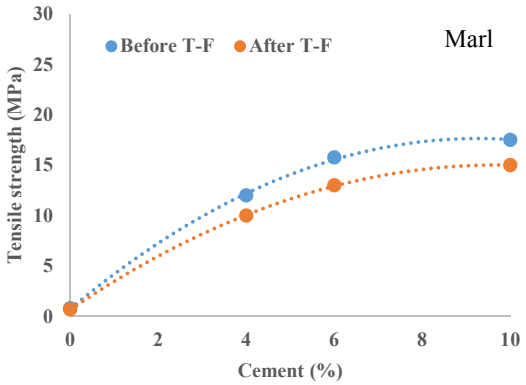
یکی از موضوعات مهم در مباحث مربوط به ساخت لایه‌های روسازی راه در مناطق سردسیر، وقوع تورم در زمان وقوع یخبندان و نشست و تغییر شکل هنگام ذوب برف‌ها در خاک‌های حساس (بویژه مارن) می‌باشد. در مطالعه حاضر، پس از آنکه نمونه‌ها تحت آزمون سیکل ذوب و یخبندان قرار گرفتند بلافاصله آزمون نسبت باربری کالیفرنیا در شرایط اشباع انجام گردید تا اثر سیمان بر روی میزان تورم مارن بعد از شرایط ذوب و یخبندان مورد بررسی قرار گیرد. در شکل (۱٤) یک نمودار مقایسه برای تغییرات میزان تورم در مارن برای شرایط قبل و بعد از ذوب و یخبندان ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود قبل از شرایط ذوب و یخبندان میزان تورم در مارن برابر با ۱/۸٤ درصد است. ولی در ادامه با افزایش حضور سیمان در مارن و عمل آوری ۲۸ روزه مقدار تورم کاسته می‌شود، بطوریکه مقدار تورم در مخلوط مارن با ۱۰ درصد سیمان برابر با ۰/۳۲ درصد است. بعد از شرایط ذوب و یخبندان، در خاک مارن خالص بدلیل تشکیل عدسی‌های یخبندان بعد از شرایط یخبندان و ذوب و نفوذ آب و رطوبت با سرعت بالا به داخل خاک بدلیل باز شدن و فاصله گرفتن ذرات از یکدیگر، تورم ۲/۳ درصد افزایش یافته است. مشابه با حالت قبل با افزودن سیمان تا ۱۰ درصد به مارن و عمل آوری ۲۸ روزه مقدار تورم به ۰/۱۸ درصد کاهش می یابد. همانطورکه در بخش‌های بالا اشاره گردید این فرآیند در اثر نفوذ آب به داخل ذرات مارن و همچنین تشکیل عدسی های یخی بوده که سبب بالا رفتن میزان تورم شده است. ولی با اضافه کردن سیمان تا ۱۰ درصد به مخلوط مارن تورم بمقدار ۹۳ درصد کاهش یافته است. به عبارتی، وجود ۱۰ درصد سیمان باعث کامل شدن واکنش سمنتاسیون ناشی از سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) و آلومینات کلسیم می‌گردد. که نتیجه آن تشکیل دانه‌های بزرگتر به همراه ساختار قوی و پایدار که مانع از جذب آب و وقوع تورم و افزایش حجم هست.



شکل۱٤. تاثیر شرایط ذوب و یخبندان بر روی میزان تورم حاصل از آزمون نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) بر روی نمونه های مورد مطالعه بعد از ۲۸ روز عمل آوری

تاثیر شرایط ذوب و یخبندان بر میزان مقاومت کششی غیر مستقیم

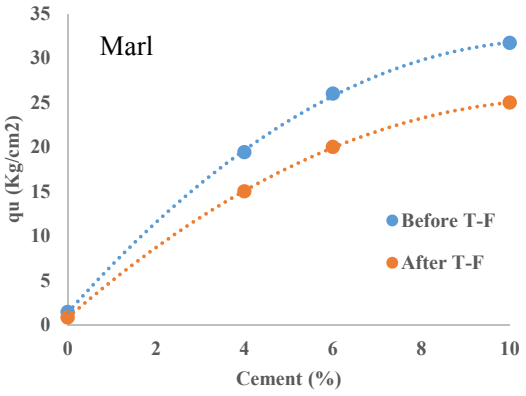
آزمون تناوب ذوب و یخبندان یکی از روش‌های مناسب برای شبیه‌سازی شرایط محیطی در ساخت لایه‌های روسازی راه در مناطق سردسیر می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. زیرا تأثیر قابل‌توجهی بر رفتار مکانیکی خاک‌های مارن می‌تواند داشته باشد. این تناوب‌ها باعث بوجود آمدن تغییرات در رطوبت و دما، سبب ایجاد تنش در درون ذرات خاک شده و ترک‌های ریز و کاهش چسبندگی بین آنها را بوجود بیاورند. بنابراین، بررسی این اثرات برای خاک‌های مارن در ساخت لایه‌های روسازی در مناطق سردسیر ضروری است، زیرا این خاک‌ها به‌طور معمول در لایه‌های زیرین راه استفاده می‌شوند. در نتیجه، درک دقیق رفتار این خاک‌ها تحت شرایط سیکل ذوب و یخبندان می‌تواند به طراحی لایه‌های راه با دوام‌تر و مقاوم‌تر کمک کند. نتایج حاصل از آزمون مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های مورد مطالعه بلافاصله بعد از آزمایش تناوب ذوب و یخبندان در شکل(۱۵) نمایش داده شده و مقایسه‌ای با نتایج حاصل از آزمایش بدون شرایط بدون ذوب و یخبندان صورت گرفته است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان دریافت مارن به تنهایی مقامت کششی ناچیزی دارد و بعد از تناوب ذوب و یخبندان نیز کاهش یافته است. در ادامه، با افزودن سیمان به مارن تا ۱۰ درصد و عمل آوری ۲۸ روزه نمونه‌ها، مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه تثبیت شده نسبت به حالت خالص بعد از تناوب ذوب و یخبندان تقریبا ۲۱ برابر شده است. ولی، در مقایسه به شرایط بارگذاری بدون تاثیرگذاری تناوب ذوب و یخبندان توانایی باربری تا حدود ۱٤ درصد کاهش یافته است. زیرا، وقتی مارن تحت تناوب ذوب و یخبندان قرار می‌گیرد، آب موجود در منافذ خاک مارن یخ می‌زند و عدسی یخی تشکیل می‌شود. افزایش حجم و انبساط ناشی از آن باعث ایجاد تنش‌های داخلی و ترک‌های ریز در ساختار مارن می گردد که نتیجه آن کاهش چسبندگی بین ذرات و افزایش نفوذ پذیری است. ولی، افزودن ۱۰ درصد سیمان به مارن و تکمیل واکنش پوزوالانی بین سیمان و ذرات مارن بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری ساختار جدیدی را به وجود می‌آورد که نه تنها باعث بالا رفتن میزان توانایی باربری می‌گردد در تناوب ذوب و یخبندان باعث نرخ پایین در کاهش ظرفیت باربری مارن تثبیت شده می‌شود.



شکل ۱۵. تاثیر شرایط ذوب و یخبندان بر روی میزان مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه های مورد مطالعه بعد از ۲۸ روز عمل آوری

تاثیر شرایط ذوب و یخبندان بر میزان مقاومت فشاری تک محوری

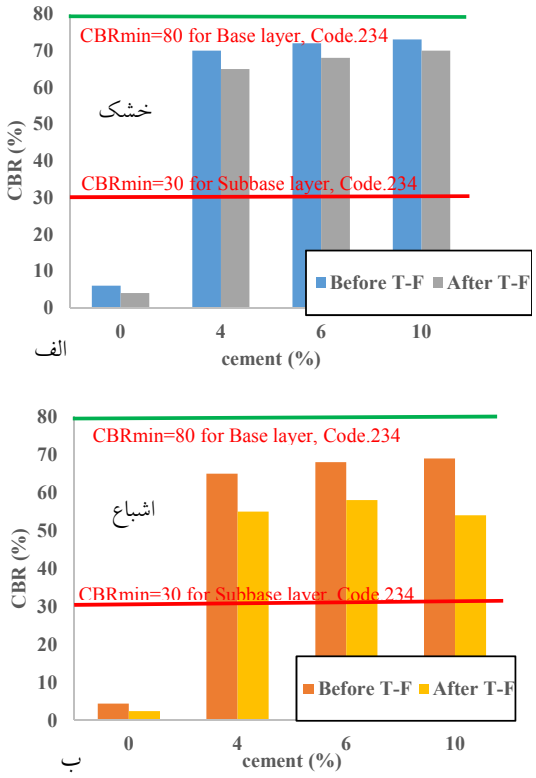
ارزیابی تأثیر شرایط ذوب و یخبندان بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک از جنبه‌های حیاتی مهندسی ژئوتکنیک و بویژه در طراحی لایه‌های روسازی راه در مناطق سردسیر محسوب می‌شود. تغییرات دمایی منجر به انجماد و ذوب مجدد آب درون خاک شده و موجب تغییر در ساختار، تخلخل و چسبندگی ذرات می‌شود. این فرآیندها می‌توانند باعث کاهش مقاومت خاک و افزایش پتانسیل ناپایداری سازه‌های مهندسی شوند. بنابراین، بررسی این اثرات برای طراحی ایمن و پایدار بدنه راه و ابنیه‌های ژئوتکنیکی خصوصاً در مناطق سردسیر، ضروری است. در تحقیق حاضر، پس از اتمام تناوب‌های ذوب و یخبندان نمونه‌های مورد مطالعه ۲۸ روزه، بلافاصله تحت آزمون مقاومت فشاری تک محوری قرار گرفتند. نتایج بدست آمده در نمودار شکل (۱٦) ارائه گردیده و با شرایط قبل از ذوب و یخبندان مقایسه شده است. بعد از اثرگذاری تناوب‌های ذوب و یخبندان همانطور که دیده می‌شود مقاومت مارن خالص، بعد از ۲۸ روز عمل آوری، با بالا رفتن میزان سیمان صعود کرده است. اگرچه توانایی باربری مارن خالص در مقایسه با شرایط قبل از ذوب و یخبندان به مقدار ٤۳ درصد کاهش یافته است. در حالت کلی این فرایند در نمونه های مخلوط مارن و سیمان نیز مشاهده شده و مقاومت فشاری روند کاهشی داشته است. بویژه، زمانیکه ۱۰ درصد سیمان با مارن مخلوط شده ظرفیت باربری ۲۱ درصد افت نموده است. اگرچه، این میزان مقاومت نسبت به مارن تثبیت نشده بهتر است.



شکل ۱٦. تاثیر شرایط ذوب و یخبندان بر روی میزان مقاومت فشاری تک محوری نمونه های مورد مطالعه بعد از ۲۸ روز عمل آوری

بحث

با توجه به نتایج بدست آمده از کل آزمایش‌ها می‌توان به این مورد اشاره کرد ترکیب مارن به همراه ۱۰ درصد سیمان رفتار مناسبی در حالت‌های قبل و بعد از تناوب های ذوب و یخبندان ارائه نموده است. برای روشن شدن این موضوع، طبق نمودار شکل(۱۷–الف و ب) مقایسه‌ای بین نتایج آزمون نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) برای ترکیب ذکر شده در هر دو حالت بارگذاری خشک و اشباع انجام گرفته است. در حالت خشک براساس نمودار شکل (۱۷–الف) مشاهده می‌شود افت باربری اتفاق افتاده بعد از شرایط ذوب و یخبندان برای نمونه‌ها بطور میانگین برابر ۱۲/٤ درصد است. بیشترین افت مربوط به مارن بدون حضور سیمان بوده که برابر با ۳۳ درصد است. در حالت اشباع طبق نمودار شکل (۱۷–ب) میزان افت ظرفیت باربری اتفاق افتاده بعداز سیکل‌های ذوب و یخبندان بطور میانگین برابر است با ۲٤ درصد است. در این شرایط هم مشابه با حالت بارگذاری خشک بیشترین کاهش در میزان توانایی باربری مربوط به مارن تثبیت نشده هست که برابر با ٤۵ درصد افت داشته است. نمایش این رفتار را می‌توان بدین صورت بیان نمود، با توجه به اینکه نمونه‌های مورد مطالعه براساس رطوبت بهینه آماده می‌شوند و در طول چرخه‌های ذوب و یخبندان، آب موجود در خلل و فرج مخلوط مارن و سیمان یخ می‌زند و باعث افزایش حجم می‌شود. با ذوب شدن یخ، فضاهای خالی بیشتری در خاک ایجاد شده و ساختار آن به‌هم می‌ریزد. این فرایند باعث کاهش تراکم و چسبندگی دانه‌های خاک می‌شود که منجر به کاهش مقاومت آن در برابر بارگذاری می‌گردد. البته، در حین انجماد، نیروهای داخلی ناشی از افزایش حجم آب ممکن است باعث ایجاد ترک‌های ریز در ساختار مارن شوند و با گذشت زمان و تکرار چرخه‌های ذوب و یخبندان، این ترک‌ها می‌توانند گسترش پیدا کرده و یکپارچگی ساختار خاک را کاهش دهند. از سوی دیگر، در طول چرخه‌های ذوب و یخبندان، آب داخل مارن می‌تواند یخ بزند و حجم آن را افزایش دهد. این انبساط می‌تواند باعث ایجاد ترک‌های ریز در ماتریس سیمانی شود و هنگام ذوب شدن، این ترک‌ها باز شده و یکپارچگی ساختار کاهش یابد، که نتیجه آن افت اندک در مقاومت است. علیرغم کاهش ظرفیت باربری اندک، حضور سیمان سبب شده تا خاک مارن تثبیت شده رفتار مناسبی ارائه نموده و امکان استفاده آن را در ساخت لایه‌های روسازی راه طبق نشریه ۲۳٤ در مناطق سردسیر آماده نماید.



شکل ۱۷. مقایسه تاثیر شرایط ذوب و یخبندان بر روی نتایج حاصل از آزمون نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) بر روی نمونه مارن و سیمان بعد از ۲۸ روز عمل آوری، الف- حالت خشک، ب- حالت اشباع

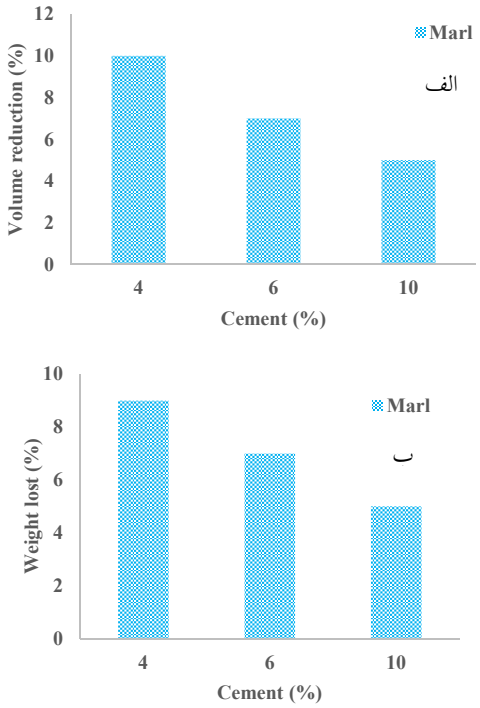
همچنین، طبق استاندارد ASTM D560، میزان کاهش حجم و افت وزن بوقوع پیوسته در نمونه‌های حاصل از آزمون نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) بعد از سیکل ذوب و یخبندان طبق روابط ذیل برآورده شده است. با توجه به اینکه در تمامی آزمایش‌های صورت گرفته نمونه‌ها به یک اندازه آماده شده اند، بنابراین نتایج بدست آمده از تغییرات افت حجم و وزن بعد از چرخه ذوب یخبندان در ارتباط با نمونه های دیگر نیز قابل تعمیم می‌باشد.

$$VR = \frac{W_{w1} - W_{w2}}{\gamma_s} \quad (۳)$$

$$WL = \frac{W_{w1} - W_{w2}}{W_{w1}} \quad (٤)$$

در رابطه فوق، VR کاهش حجم، WL افت وزن، W_{w1} میزان وزن نمونه اولیه (بر واحد گرم)، W_{w2} میزان وزن نمونه بعد از چرخه ذوب و یخبندان (بر واحد گرم) و γ_s وزن مخصوص اشباع (گرم بر سانتیمتر مکعب) نمونه مورد مطالعه می‌باشد.

نتایج بدست آمده در نمودارهای شکل (۱۸-الف و ب) قابل مشاهده است. با توجه به نمودارهای شکل (۱۸-الف) می توان دریافت افزایش مقدار سیمان در مارن باعث کاهندگی کمتر در پارامتر VR نمونه ها شده است. بطوریکه کمترین مقدار کاهش حجم مربوط به مخلوط مارن با ۱۰ درصد سیمان است که برابر ۵ درصد است. همچنین، در شکل (۱۸-ب)، تغییرات افت‌های وزنی بوقوع پیوسته در اثر چرخه ذوب و یخبندان ارائه شده است. نمودارها نشان می‌دهد مشابه با حالت قبل کمترین مقدار افت وزنی مربوط به مخلوط مارن به همراه ۱۰ درصد سیمان می‌باشد که برابر با ۵ درصد است. طبق نشریه شماره ۲٦۸ دفتر امور فنی و تدوین معیارها (Code No.268, 2003)، حداکثر درصد افت وزن مجاز برای خاکهای گروهA-5 تثبیت شده با سیمان برابر با ۱٤ ٪ است. که برای مطالعه حاضر، این میزان برابر با ۵ درصد برآورد شده که بیان کننده امکان کاربرد ترکیب حاضر در احداث لایه های روسازی راه در مناطق سرد یخبندان می‌باشد.



شکل ۱۸. تاثیر چرخه ذوب و یخبندان بر روی رفتار مخلوط مارن به همراه سیمان بعد از ۲۸ روز عمل آوری
الف- کاهش حجم، ب- افت وزنی

۵- نتیجه‌گیری

ارزیابی و بررسی تاثیر شرایط ذوب و یخبندان در طراحی لایه‌های روسازی راه بویژه در مناطق سردسیر از اهمیت بسزایی برخوردار است، زیرا این شرایط تأثیر قابل توجهی بر دوام و عملکرد بدنه راه و لایه‌های روسازی‌ها دارند. نفوذ آب به لایه‌های روسازی، به ویژه لایه‌های خاک بستر، زیراساس و اساس، در هنگام یخ زدن منبسط می‌شود و عدسی‌های یخی تشکیل می‌دهند که نتیجه آن ایجاد نیروهای مخربی است که باعث وقوع ترک خوردگی، تغییر شکل و افت توانایی باربری در لایه‌ها می‌گردد. تناوب‌های ذوب و یخبندان، به مرور زمان ساختار روسازی را تخریب کرده و عمر مفید آن را به طور چشمگیری می‌کاهند. بنابراین، در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی منطقه و اعمال تمهیدات مناسب در طراحی، از جمله انتخاب مصالح مقاوم در برابر یخ زدگی و زهکشی کارآمد، برای اطمینان از پایداری و عملکرد مطلوب روسازی در مناطق سردسیر ضروری است. هدف از تحقیق حاضر، بررسی امکان سنجی کاربرد سیمان در مخلوط مارن و سیمان جهت ساخت لایه های روسازی راه در مناطق سردسیر بود که محدوده مورد مطالعه خاک مارن منطقه مرزداران شهر تبریز انتخاب گردید. نتایج بدست آمده از مطالعه انجام یافته بیان کننده آنست که مخلوط مارن به همراه ۱۰ درصد سیمان بعد از ۲۸ روز عمل آوری رفتار بهینه‌ای را جهت ساخت لایه‌های زیراساس و اساس در مناطق سردسیر ارائه می‌نماید. زیرا، ترکیب ذکر شده سبب شده تا وزن مخصوص خشک حداکثر مارن را نسبت به حالت تثبیت نشده۱/۲ برابر افزایش داده و میزان جذب رطوبت را ٤٦ درصد بکاهد و میزان توانایی باربری براساس آزمون نسبت باربری کالیفرنیا را ۱۲ برابر افزایش داده و مقدار تورم را ۸۳ در کاهش دهد و طبق نشریه ۲۳٤ سازمان برنامه و بودجه جهت ساخت بدنه راه قابل قبول می باشد. همچنین، با توجه به آزمون نفوذپذیری مشاهده گردید ترکیب ذکر شده امکان زهکشی و نفوذ آب را کاهش داده و مانع از تشکیل عدسی‌های یخی در مناطق سردسیر می‌گردد. آزمون مقاومت فشاری تک محوری نشان داد مخلوط بهینه اثر فرآیند هیدارسیون سیمان و تشکیل مواد سمنته، سیمان با آب واکنش داده و ترکیباتی مثل ژل C-S-H (کلسیم سیلیکات هیدرات) و $Ca(OH)_2$ (هیدروکسید کلسیم) تولید می‌کند. ژل C-S-H به‌عنوان چسب طبیعی عمل کرده و ذرات مارن سیمان را به هم متصل می‌کند و همچنین، برخی از سیلیکات‌ها و آلومینات‌های موجود در مارن با هیدروکسید کلسیم $Ca(OH)_2$ تولید شده از سیمان واکنش پوزولانی می‌دهند و ساختار سخت و مقاومی بوجود آورند و توانایی باربری را ۲۳/٤ برابر افزایش دهد.

در انتها، با توجه به آزمون های چرخه ذوب و یخبندان مشاهده شد نمونه‌های تثبیت شده براساس رطوبت بهینه آماده شدند و در طول چرخه‌های ذوب و یخبندان، آب موجود در خلل و فرج مخلوط مارن و سیمان یخ می‌زند و باعث افزایش حجم می‌شود. با ذوب شدن یخ، فضاهای خالی بیشتری در خاک ایجاد شده و ساختار آن به‌هم می‌ریزد. این فرایند باعث کاهش تراکم و چسبندگی دانه‌های خاک می‌شود که منجر به کاهش مقاومت آن در برابر بارگذاری می‌گردد. البته، در حین انجماد، نیروهای داخلی ناشی از افزایش حجم آب ممکن است باعث ایجاد ترک‌های ریز در ساختار مارن شوند و با گذشت زمان و تکرار چرخه‌های ذوب و یخبندان، این ترک‌ها می‌توانند گسترش پیدا کرده و یکپارچگی ساختار خاک را کاهش دهند. از سوی دیگر، در طول چرخه‌های ذوب و یخبندان، آب داخل مارن می‌تواند یخ بزند و حجم آن را افزایش دهد. این انبساط می‌تواند باعث ایجاد ترک‌های ریز در ماتریس سیمانی شود و هنگام ذوب شدن، این ترک‌ها باز شده و یکپارچگی ساختار کاهش یابد، که نتیجه آن افت اندک در مقاومت است. علیرغم کاهش ظرفیت باربری اندک، حضور سیمان سبب شده تا خاک مارن تثبیت شده رفتار مناسبی ارائه نموده و ترکیب مذکور دچار افت وزنی و کاهش حجم به مقدار ۵ درصد می‌شود که از نظر نشریه ۲٦۸ سازمان برنامه بودجه جهت احداث و ساخت لایه‌های زیراساس و اساس بسیار مناسب است.

٦- مراجع

-Alizadeh Mjadi, A. and Dabiri, R. (2018) Geotechnical Illustration of Fereshteh Alley in Tabriz City. *Journal of New Approaches in Civil Engineering*, Vol.2, No.1, 14-32. **doi.org/10.30469/jnace.2018.66138**

-ASTM D2166/D2166M-16, (2016). Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soils. *Annual Book of ASTM Standards.*

- ASTM C496, (2006). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *Annual Book of ASTM Standards.*

-ASTM D5084-03, (2003). Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using flexible wall permeameter. *Annual Book of ASTM Standards.*

-ASTM D1883-21, (2021). Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils. *Annual Book of ASTM Standards.*

-ASTM D560-03, (2003). Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures (Withdrawn 2012). *Annual Book of ASTM Standards.*

-Barzegari, G. Dadadshzadeh, N. and Ranjbar B., R. (2024). Evaluation of physical and mechanical properties of Marls in East of Tabriz city. *1st national conference of applying new technologies in civil engineering, Islamic azad university*, Tabriz Branch, 15 and 16 May, Tabriz, Iran.

-Bell, F. G. (1981). A survey of the physical properties of some carbonate rocks. *Bulletin of the International Association Engineering Geology*, Vol. 24, 105–110.

- Code No.234, (2003). Iran Highway asphalt paving code. Ministry of roads and transportation deputy of training, research and information technology research and training center.

-Code No.268, (2003). Instruction manual for stabilization and construction of embankment, subgrade and pavement layers with stabilized mixture. Ministry of roads and transportation deputy of training, research and information technology research and training center.

-Dadadshzadeh, N. Hashemi, M. Ghazi Fard, A. and Asghari-Kalajahi, E. (2023). Physical Properties of Tabriz gray marlstone, NW of Iran. *Smart Geotechnics for Smart Societies.*
doi: 10.1201/9781003299127-115.

-Deng, H. Huang, K.; Wu, F. and Wang, Y. (2024). Performance evaluation and degradation analysis of suspended dense broken stone road foundation stabilized by cement under conditions of freezing and thawing. *Buildings,* Vol.14, No.6, 1828.
doi.org/10.3390/buildings14061828

-Alizadeh Majdi, A. and Dabiri, R. (2019) Estimation of SPT Results Using Probabilistic Method and Artificial Neural Network in clay layers (Case study: Tabriz Clayey layers). *Advanced Applied Geology,* Vol.9, No.1, 62-74.
doi.org/10.22055/aag.2019.26391.1871

-Alizadeh Majdi, A. Dabiri, R.; Ganjian, N. and Ghalanderzadeh, A. (2020). Evaluation of the Janbu Modulus Number in clayey soils with using shear wave velocity (Case study: Tabriz City). Vol.49, No. 97, 105-115.
doi.org/10.22034/ceej.2020.8442,

-Asadollahi, F. and Dabiri, R. (2017). Effects of Glass Fiber Reinforced Polymer on Geotechnical Properties of Clayey Soil. *Journal of Structural Engineering and Geotechnics,* Vol.7, No.2, 73-83.

-Ashraf, A. Rahman, S.; Faruk, O. and Bashar, A. E. (2018). Determination of Optimum Cement Content for Stabilization of Soft Soil and Durability Analysis of Soil Stabilized with Cement. *American Journal of Civil Engineering,* 6, 39.
doi.org/10.11648/j.ajce.20180601.17

-ASTM D421-85, (1985). Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants. *Annual book of ASTM standards.*

-ASTM D422-63, (1963). Standard Test Method for article-Size Analysis of Soils. *Annual book of ASTM standards.*

-ASTM D 4318-95a, (1995). Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index for soils. *Annual Book of ASTM Standards.*

-ASTM D 854-02, (2002). Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer. *Annual Book of ASTM Standards.*

-ASTM C618, (2022). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolana for Use as Mineral Admixture. *Annual Book of ASTM Standards.*

-ASTM C305, (2014). Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. *Annual Book of ASTM Standards.*

-ASTM D698-00, (2000). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3)). *Annual Book of ASTM Standards.*

-McCarthy, D. F. (1982). Essential of soil mechanics and foundations. 2ed. Reston Publishing Company. Reston, *Virginia,* 632-633.
-Rolt, J. Williams, S. Jones, C. R. and Smith, H. R. (1987). Performance of a full scale pavement design experiment in Jamaica. *Transportation Research Record.*
-Sadrkarimi, J. Zekri, A. and Majidpour, H. (2006). Geotechnical features of Tabriz Marl. IAEG2006 Paper number 335.
-Shahriar Kian, M. Kabiri, S. and Bayat, M. (2021). Utilization of zeolite to improve the behavior of cement-stabilized soil. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering,* Vol.7, No.2. **doi.org/10.1007/s40891-021-00284-9**
-Sahebkaram, A. and Dabiri, R. (2017). Effect of the Fibers type on improving the bearing capacity of clayey soils. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering,* Vol.9, No.1, 43-50.
-Ural, N. (2018). The Importance of Clay in Geotechnical Engineering. Current Topics in the Utilization of Clay in Industrial and Medical Applications. **dx.doi.org/10.5772/intechopen.75817**
-Wang, S. Liv, Q. Baaj, H. Li, X. and Yan-xu, Z. (2016). Volume change behaviour and microstructure of stabilized loess under cyclic freeze–thaw conditions. *Canadian Journal of Civil Engineering,* Vol.43, No.10, 865-874. **doi.org/10.1139/cjce-2016-0052**
-Xu, L. Ding, X. Sun, S. Gu., H. Niu, L. and Chen, Y. (2023). Experimental study on the influence of snow-melting agents on fiber-reinforced cemented soil under freezing-thawing cycles. *Advances in Materials Science and Engineering,* 1-15. **doi.org/10.1155/2023/9766539**
-Yang, M. Deng, S. and Dong, Z. (2023). Study on anchoring characteristics and freeze–thaw degradation law of the cement-based early-strength anchor in freeze–thaw regions. *Sustainability,* Vol.15, No.10, 7773-7774. **doi.org/10.3390/su15107773**
- Yu, X. B. Zhang, B. and Cartweight, D. (2010). Beneficial Utilization of Lime Sludge for Subgrade Stabilization: A Pilot Investigation.
-Zhang, R. M. Long, M. and Zheng, J. (2019). Comparison of Environmental Impacts of Two Alternative Stabilization Techniques on Expansive Soil Slopes. *Advances in Civil Engineering,* 1-13. **doi.org/10.1155/2019/9454929**
-Derafshinou, M. Alizadeh Majdi, A. and Dabiri, R. (2024). Evaluation of the Specimen Disturbance Effects on the Strength Properties of Clayey Soils. *New Findings in Applied Geology*, Vol.18, No.36, 99-117. **doi.org/10.22084/nfag.2023.27858.1556,**
-Ekinci, A. Hanafi, M. and Aydn, E. (2020). Strength, Stiffness, and Microstructure of Wood-Ash Stabilized Marine Clay. *Minerals,* Vol.10, 796-797. **doi.org/10.3390/min10090796**
-Farsamnia, R. and Dabiri, R. (2023). Effects of Saw Dust Ash on Geotechnical Properties of Clayey Soil. *Engineering Geology*, Vol.15, No.4, 79-95.
-Fondjo, A. A. Theron, E. and Ray, R. P. (2021). Stabilization of Expansive Soils Using Mechanical and Chemical Methods, A Comprehensive Review. *Civil Engineering and Architecture.*
-Ghaffari, S. and Dabiri, R. (2021). Study of Nano-clay and Limestone Powder Effects on the Geotechnical Properties of Clayey Soil of Eastern Tabriz. *Kharazmi University Journal of Engineering Geology*, Vol.15, No.3, 455-479.
-Hayder, H. A. Mohamed, A. and Shahin Walske, M. L. (2020). Review of Fly-Ash-Based Geopolymers for Soil Stabilization with Special Reference to Clay. *Geosciences,* Vol.10, 249-250. **doi: 10.3390/geosciences10070249.**
-Hooshmand, A. Aminfar, M. H. Asghari, E. and Ahmadi, H. (2011). Mechanical and Physical Characterization of Tabriz Marls, Iran. *Geotechnical and Geological Engineering,* Vol.30, 219-232. **doi.org/10.1007/s10706-011-9464-3**
-Kalkan, E. (2022). Freeze-thaw behavior of stabilized clayey soil with red mud and cement. I*nternational Journal of Science and Engineering Applications,* Vol.11, No.1, 27-30. **doi.org/10.7753/ijsea1101.1004**
-Lu, J. Tan, L. Yang, H. Wan, X. Wang, Y. and Yan, Z. (2023) "Experimental study on the hydro-thermal-deformation characteristics of cement-stabilized soil exposed to freeze–thaw cycles. *Frontiers in Earth Science,* Vol.10. **doi.org/10.3389/feart.2022.1041249.**
-Ma, Z.; Xing, Z.; Zhao, Y.; and Hu, Y.; (2023) Dynamic strength characteristics of cement-improved silty clay under the effect of freeze-thaw cycles. *Sustainability,* Vol.15, No.4, 3333. **doi.org/10.3390/su15043333**

Geotechnical Properties of Cement-Stabilized Marl for Use in the Construction of Pavement Layers under Thaw and Freeze Conditions

Mohammad Mosavi, M.Sc., Grad., Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Ta. C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

Rouzbeh Dabiri, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Ta. C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

Email: rz.dabiri@iau.ac.ir

Received: May 2025- Accepted: August 2025

ABSTRACT

Marl is considered one of the problematic soil types in civil engineering, particularly in the construction of flexible pavements in cold regions. Its behavior under freeze–thaw conditions poses significant challenges. Exposure to sub-zero temperatures leads to water absorption and the formation of ice lenses within the soil structure, causing swelling and an increase in volume. Upon temperature rise and thawing, these ice lenses melt, resulting in shrinkage, volume reduction, and a loss of mechanical strength due to the development of voids within the soil matrix. This study aims to evaluate the effectiveness of cement stabilization in improving the geotechnical properties of marl in the Tabriz region for potential use in road subgrade and pavement layer construction. Marl samples were treated with varying cement contents of 4%, 6%, and 10%, and subsequently cured for a period of 28 days. To assess the performance of the stabilized mixtures, a comprehensive series of laboratory tests was conducted, including Atterberg limits, compaction characteristics, California Bearing Ratio (CBR) in both dry and saturated conditions, unconfined compressive strength, indirect tensile strength, and permeability. The experimental results indicated that the mixture containing 10% cement yielded the most favorable outcomes. Specifically, this composition led to a 23.4-fold increase in unconfined compressive strength and a 12-fold improvement in the CBR value, while reducing swelling potential by approximately 83%. Furthermore, under repeated freeze–thaw cycles, the mixture exhibited consistent performance, with weight loss and volume reduction limited to around 5%. These findings demonstrate the suitability of the 10% cement–marl mixture for road pavement construction in cold climates.

Keywords: Marl, Cement, Stabilization, Pavement Layer, Thaw and Freeze Conditions