

اصلاح خواص حرارتی و هیدرولیکی خاک با استفاده از نانوسیلیکا آبروژل جهت کاهش اثر یخبندان بر روسازی راه

محسن نورمحمدی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

سید مهدی ابطحی*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

حمید هاشم الحسینی، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

سید مهدی حجازی، دانشیار، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان

Email: mabtahi@iut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۰ - پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۶

چکیده

یخبندان در خاک در مناطق سردسیر، مهم‌ترین عامل خرابی و کاهش کارایی روسازی راه‌ها و سایر سازه‌های خاکی می‌باشد. هدف از این تحقیق، معرفی روشی جدید برای کاهش اثرات نامطلوب یخبندان در خاک است. در این روش، یک عایق حرارتی سازگار با رطوبت برای ممانعت از نفوذ هوای سرد در خاک بستر تهیه شد. برای تهیه این عایق، از مخلوط خاک و سیلیکا آبروژل که یک نانومواد با هدایت حرارتی بسیار کم و آبگریزی فوق‌العاده زیاد می‌باشد استفاده گردید. سیلیکا آبروژل با نسبت‌های ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی با خاک مخلوط شد و هدایت حرارتی، آبگریزی، نفوذپذیری، درصد رطوبت در حالت اشباع و دوام در برابر چرخه‌های انجماد-ذوب این مخلوط‌ها مطالعه شد. در این مطالعه، مشاهده شد که به دلیل آبگریزی بودن سیلیکا آبروژل، مخلوط‌های خاک-آبروژل نیز به طور چشم‌گیری آبگریزی می‌شوند و جذب آب در آنها به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. به طوری که میزان رطوبت در حالت اشباع در خاک بدون سیلیکا آبروژل حدود چهار برابر میزان رطوبت در مخلوط خاک-آبروژل می‌باشد. به همین جهت، مرطوب شدن مخلوط‌های خاک-آبروژل تأثیر چندانی در افزایش هدایت حرارتی آنها ندارد. از سوی دیگر، مشاهده شد که نفوذپذیری خاک بدون سیلیکا آبروژل حدود ۲۱ برابر نفوذپذیری مخلوط خاک-آبروژل است، که نشان‌دهنده کاهش چشم‌گیر نفوذپذیری مخلوط‌های خاک-آبروژل می‌باشد. به علاوه، چرخه‌های اشباع شدن-خشک شدن و انجماد-ذوب و همچنین قرار گرفتن در معرض جریان‌های سیلابی، هیچ تأثیری بر هدایت حرارتی مخلوط‌های خاک-آبروژل نداشت. با توجه به ویژگی‌های حرارتی و هیدرولیکی مخلوط‌های خاک-آبروژل، می‌توان آنها را به عنوان عایق حرارتی سازگار با رطوبت، برای مقابله با اثرات نامطلوب یخبندان در خاک، مناسب دانست و معرفی کرد. واژه‌های کلیدی: یخبندان خاک، نفوذپذیری، چرخه‌های انجماد-ذوب، سیلیکا آبروژل، روسازی.

۱. مقدمه

انجماد آب در خاک در مناطق سردسیر یکی از چالش‌های اصلی مهندسين در زمینه راه‌سازی و حفاظت راه‌ها می‌باشد. به طور کلی، انجماد خاک موجب بروز اثرات نامطلوب متعددی در خاک می‌گردد؛ به طوری که می‌توان گفت خاک‌ها پس از ذوب شدن نسبت به قبل از انجماد ضعیف‌تر هستند (چمبرلین و همکاران، ۱۹۹۵). به طور سنتی، در اکثر راه‌ها، به منظور ممانعت از نفوذ هوای سرد در خاک بستر، ضخامت روسازی به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته می‌شود (حداقل برابر عمق نفوذ یخبندان). بدیهی است که این روش، مستلزم حجم عملیات خاکی قابل توجه و همچنین مصالح سنگی زیادی می‌باشد. به همین جهت، مطالعات متعددی در زمینه حفاظت از خاک در برابر اثرات نامطلوب یخبندان انجام گرفته است. برخی از این مطالعات، مصالح و چیدمان جدیدی را برای روسازی راه پیشنهاد می‌دهند؛ به طوری که این روسازی‌های جدید در کاهش اثرات نامطلوب یخبندان روی خاک بستر، مؤثرتر از روسازی‌های سنتی می‌باشند (زیلایی و غنی زاده، ۱۴۰۰؛ لی و همکاران، ۲۰۱۳؛ لای و همکاران، ۲۰۱۲). با وجود بهبود عملکرد این خاکریزهای جدید، حجم قابل توجه عملیات خاکی و نیاز به مقادیر زیاد مصالح سنگی همچنان از معایب این روش‌ها محسوب می‌شود.

تثبیت خاک با افزودنی‌هایی مانند سیمان و آهک و همچنین تقویت خاک توسط الیاف پلی‌پروپیلن و الیاف شیشه به منظور کاهش اثرات نامطلوب یخبندان در خاک نیز به طور گسترده مورد توجه محققان قرار گرفته است (آراکوگلو و لین، ۲۰۱۷؛ الداود و همکاران، ۲۰۱۴؛ الداود و همکاران، ۲۰۱۶؛ اُنو و کاواب، ۲۰۰۶؛ تبالدی و همکاران، ۲۰۱۶؛ جسو و همکاران، ۲۰۲۰؛ جمشیدی و همکاران، ۲۰۱۶؛ روستایی و قضاوی، ۱۳۹۱؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ سهل‌آبادی و همکاران، ۲۰۲۱؛ عربی و

همکاران، ۱۹۸۹؛ غنی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۹؛ گلچین‌فر و عباسی، ۱۳۹۲؛ گولو و خودیر، ۲۰۱۴؛ لو و همکاران، ۲۰۲۰؛ لی و همکاران، ۲۰۱۸؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۰؛ نگوین و همکاران، ۲۰۱۹). علاوه بر این، اخیراً برای مقابله با اثرات چرخه‌های انجماد-ذوب بر خواص مکانیکی خاک، مطالعاتی با استفاده از روش‌های زیستی (MICP)^۱ انجام گرفته است (سان و همکاران، ۲۰۲۱؛ گاتمن و همکاران، ۲۰۲۰). اگر چه پس از تثبیت خاک با استفاده از افزودنی‌ها یا با استفاده از روش‌های زیستی و همچنین تقویت خاک با الیاف، اثرات نامطلوب یخبندان بر خاک کاهش می‌یابد، اما بایستی توجه نمود که تثبیت خاک فرایندی طولانی و زمان‌بر است که برای شرایط دشوار موجود در مناطق سردسیر چندان مناسب نیست. کلیه روش‌های ذکر شده شامل استفاده از خاکریزهای جدید، تثبیت خاک با مواد افزودنی، استفاده از روش‌های زیستی و تقویت خاک با الیاف، نه تنها مستلزم عملیات خاکی قابل توجه و مقادیر زیاد مصالح سنگی و زمان طولانی اجرا می‌باشند، بلکه با توجه به مطالعات انجام گرفته، این روش‌ها قادر به از بین بردن کامل اثرات نامطلوب یخبندان در خاک نیستند. در حالی که با ممانعت از نفوذ هوای سرد در خاک می‌توان انجماد آب و در نتیجه اثرات نامطلوب آن بر خاک را به طور کامل از بین برد. بنابراین، استفاده از یک عایق حرارتی در سطح خاک برای ممانعت از نفوذ هوای سرد، مناسب‌تر و مؤثرتر از روش‌های مذکور می‌باشد.

به منظور کاهش عملیات خاکی و اجتناب از استفاده از مقادیر زیاد مصالح سنگی برای ممانعت از نفوذ هوای سرد در خاک، می‌توان به جای استفاده از خاکریزهای سنتی، از عایق‌های حرارتی مصنوعی استفاده نمود. پلی-استایرن منبسط شده با چگالی زیاد، رایج‌ترین عایق حرارتی مورد استفاده برای این منظور است (فریتنگ و مک‌فادن، ۱۹۹۷؛ گاندال، ۱۹۸۸؛ مک‌مستر و رانگ،

¹- Microbially Induced Carbonate Precipitation

۱۹۸۸؛ موسی و همکاران، ۲۰۱۹). مهم‌ترین نقطه ضعف پلی‌استایرن، مقاومت خمشی و کششی ناچیز آن می‌باشد؛ به طوری که تخته‌های پلی‌استایرن به راحتی در اثر بار چرخ‌های وسایل نقلیه خرد می‌شوند. به همین جهت، باید در عمق مناسب از سطح راه قرار گیرند و توسط یک لایه مصالح سنی پوشانده شوند (فریتگ و مک‌فادن، ۱۹۹۷). به عبارت دیگر، استفاده از عایق پلی‌استایرن برای جلوگیری از نفوذ هوای سرد در خاک نیز نیازمند حجم عملیات خاکی قابل توجه و همچنین مقادیر زیادی مصالح سنگی می‌باشد. از سوی دیگر، احتمال ترک خوردن و آسیب دیدن پلی‌استایرن در حین راه‌سازی و متراکم کردن لایه‌های روسازی وجود دارد.

با توجه به کاستی‌ها و مشکلات ذکر شده برای روش‌های محافظت از خاک در برابر یخبندان، نورمحمدی و همکاران (۲۰۲۲) روش جدیدی را برای ممانعت از نفوذ هوای سرد در خاک و کاهش اثرات نامطلوب یخبندان بر خاک پیشنهاد نمودند. در این روش، آنها یک نانو مواد با هدایت حرارتی خیلی کم و آبگریزی فوق‌العاده زیاد به نام سیلیکا آبروژل را با خاک مخلوط نموده و از این مخلوط خاک- آبروژل به عنوان یک عایق حرارتی در سطح خاک استفاده کردند. بر اساس نتایج به دست آمده در این تحقیق، مخلوط خاک- آبروژل به خوبی توانست از نفوذ هوای سرد در خاک جلوگیری نموده و فرآیند انجماد خاک را به تأخیر بیندازد. اما نکته‌ای که در این روش نباید مورد غفلت قرار گیرد این است که مخلوط خاک- آبروژل به عنوان یک عایق حرارتی در سطح خاک، در معرض رطوبت و جریان آب قرار دارد. بر اساس مطالعات متعدد، هدایت حرارتی محیط‌های متخلخل، در اثر رطوبت به شدت افزایش می‌یابد (براندون و میچل، ۱۹۸۹؛ داسون، ۲۰۰۹؛ فنگ، ۱۹۹۱؛ کوروار و همکاران، ۱۹۸۳؛ میچل و سوگا، ۲۰۰۵). بنابراین، بررسی اثر رطوبت بر هدایت حرارتی و کارایی مخلوط‌های خاک- آبروژل ضروری به نظر می‌رسد. بر

همین اساس، هدف اصلی این تحقیق، بررسی اثر رطوبت بر ویژگی‌های حرارتی و ژئوتکنیک و همچنین کارایی مخلوط‌های خاک- آبروژل می‌باشد. به عبارت دیگر، در تحقیق انجام گرفته و روش پیشنهاد شده توسط نورمحمدی و همکاران (۲۰۲۲)، عملکرد مخلوط‌های خاک- آبروژل در شرایط خشک مورد بررسی قرار گرفته و نتایج خوب و قابل قبولی نیز در پیش‌گیری از نفوذ سرما در خاک داشته است. با این وجود، با توجه به وقوع بارندگی، به ویژه در مناطق سردسیر، و مرطوب شدن مخلوط‌های خاک- آبروژل، در تحقیق حاضر، ویژگی‌های این مخلوط‌ها پس از مواجهه با آب و مرطوب شدن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این بررسی، مشخص خواهد شد که آیا مخلوط‌های خاک- آبروژل پس از مرطوب شدن، همچنان قادر به خدمت‌دهی و حفاظت از خاک در برابر نفوذ هوای سرد خواهند بود؟ بدیهی است که در صورت عملکرد خوب و قابل قبول مخلوط‌های خاک- آبروژل پس از مواجهه با آب و مرطوب شدن، یکی از کاربردهای اصلی این مخلوط‌ها کنترل و کاهش اثرات نامطلوب یخبندان در روسازی راه‌ها می‌باشد.

۲. مواد استفاده شده و روش تحقیق

۲-۱. فرآیند تحقیق

با توجه به این که مخلوط‌های خاک- آبروژل پس از استفاده در سطح خاک در معرض رطوبت قرار خواهند گرفت و با توجه به نقش رطوبت در افزایش هدایت حرارتی محیط‌های متخلخل مانند مخلوط‌های خاک- آبروژل، آزمایش‌های متعددی برای مطالعه خواص هیدرولیکی مخلوط‌های خاک- آبروژل و همچنین تأثیر رطوبت بر هدایت حرارتی آنها انجام گرفته است. به این منظور، خاک با درصد‌های متفاوتی از سیلیکا آبروژل مخلوط شده و این مخلوط‌های خاک- آبروژل کاملاً اشباع شدند. سپس، برای بررسی اثر رطوبت بر هدایت

وجود، آلکوکسیدها به این دلیل که عموماً در دسترس می‌باشند، رایج‌ترین ماده اولیه برای سنتز آبروژل‌ها هستند. به طور خاص، آلکوکسیدهای سیلیکون که منجر به تولید سیلیکا آبروژل می‌شوند، اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرند. سیلیکا آبروژل در واقع یک ساختار متقاطع از زنجیره‌های دی‌اکسید سیلیکون (SiO_2) با تعداد زیادی منافذ پر از هوا می‌باشد (تورگال و همکاران، ۲۰۱۳؛ ریفات و کیو، ۲۰۱۳؛ گوراو و همکاران، ۲۰۱۰).

با توجه به خواص منحصر به فرد سیلیکا آبروژل، تا کنون کاربردهای بسیار زیادی برای آن در صنایع مختلف از هوا فضا گرفته تا داروسازی، الکترونیک و خودروسازی تعریف شده است (گوراو و همکاران، ۲۰۱۰؛ هال، ۲۰۱۰). همچنین، در صنعت ساختمان، از این ماده برای تهیه شیشه‌های عایق و همچنین تهیه گچ یا ملات عایق استفاده شده است (تورگال و همکاران، ۲۰۱۹؛ نصرتی و براردی، ۲۰۱۸). ولی تا کنون به عنوان یک افزودنی برای اصلاح خواص خاک مورد توجه قرار نگرفته است. در این تحقیق، برای اولین بار، از سیلیکا آبروژل به عنوان یک نانومواد با هدایت حرارتی بسیار کم و آبگریزی خیلی زیاد برای اصلاح خواص خاک، به منظور کاهش اثرات نامطلوب یخبندان بر روسازی، استفاده می‌شود. در شکل ۱ و جدول ۱، تصویر و مشخصات سیلیکا آبروژل استفاده شده در این تحقیق ارائه شده است.

حرارتی و همچنین کارایی مخلوط‌های خاک- آبروژل، هدایت حرارتی نمونه‌های اشباع شده اندازه‌گیری و با هدایت حرارتی نمونه‌های خشک مقایسه شده است.

همچنین، با توجه به اهمیت ویژگی‌های هیدرولیکی مخلوط‌های خاک- آبروژل و تأثیر قابل توجه این خواص بر عملکرد آنها، آبگریزی، نفوذپذیری و میزان جذب آب در این مخلوط‌ها مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس آزمایش‌های انجام شده، متغیرهای وابسته‌ی تحقیق عبارتند از هدایت حرارتی، زاویه تماس، نفوذپذیری و میزان رطوبت مخلوط‌های خاک- آبروژل. همچنین، متغیر مستقل تحقیق، میزان سیلیکا آبروژل مخلوط شده با خاک می‌باشد که برابر صفر، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی خاک در نظر گرفته شد.

۲-۲. مواد

۲-۲-۱. سیلیکا آبروژل

آبروژل‌ها در واقع ژل‌های خشکی هستند که به دلیل ساختار بسیار متخلخل، دارای خواص منحصر به فرد از قبیل هدایت حرارتی و وزن مخصوص فوق‌العاده کم می‌باشند. در تهیه آبروژل‌ها می‌توان از مواد اولیه مختلفی استفاده نمود که هر یک موجب به دست آمدن خواص متفاوتی برای آبروژل خواهند شد. برخی از نمک‌ها، اکسیدها، هیدروکسیدها و آلکوکسیدها می‌توانند به عنوان ماده اولیه در فرایند تهیه آبروژل استفاده شوند. با این



شکل ۱. سیلیکا آبروژل استفاده شده در تحقیق حاضر

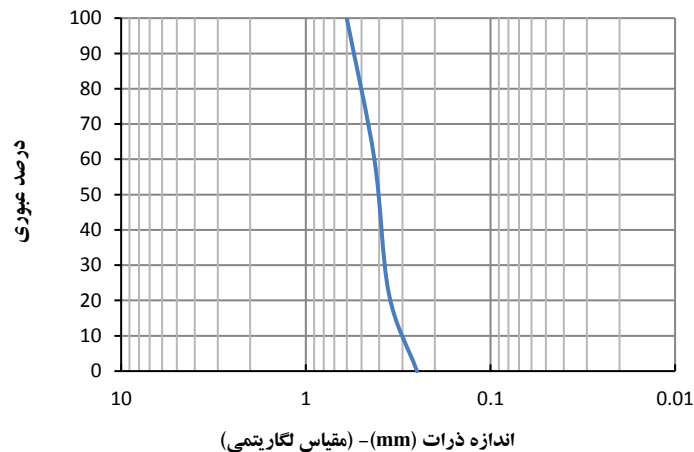
جدول ۱. ویژگی‌های سیلیکا آبروژل استفاده شده در تحقیق حاضر

اندازه ذرات (nm)	سطح ویژه (m ² /g)	دمای کاری (°C)	دمای ذوب (°C)	زاویه تماس (°)	چگالی (kg/m ³)	هدایت حرارتی (W/m. K)	حالت فیزیکی
۱۴-۱۸	>۴۰۰	۱۴۰۰	۱۸۰۰	>۱۴۵	۸۰-۱۰۰	۰/۰-۰۱۴/۰۱	پودر

۲-۲-۲. خاک

به طور کلی، نوع کانی‌های تشکیل دهنده خاک و همچنین دانه‌بندی خاک، دو عامل اصلی مؤثر بر هدایت حرارتی خاک‌ها هستند (داوسون، ۲۰۰۹؛ سولومون و همکاران، ۱۹۸۴؛ میچل و سوگا، ۲۰۰۵؛ هیلل، ۱۹۸۲). به همین جهت، خاک‌های انتخاب شده برای مخلوط کردن با سیلیکا آبروژل، هم از لحاظ کانی‌های تشکیل دهنده و هم از نظر دانه‌بندی، متفاوت و متنوع بودند (نورمحمدی و

همکاران، ۲۰۲۲). نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط نورمحمدی و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد که ماسه درشت‌دانه پس از مخلوط شدن با سیلیکا آبروژل، هدایت حرارتی کمتری نسبت به سایر خاک‌ها دارد. به همین جهت، در این تحقیق، از ماسه درشت‌دانه برای ترکیب با سیلیکا آبروژل و تهیه مخلوط‌های خاک- آبروژل استفاده شد. منحنی دانه‌بندی این خاک در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی خاک استفاده شده در این تحقیق برای تهیه مخلوط خاک- آبروژل

۳. آزمایش‌ها

۳-۱. آزمایش هدایت حرارتی مخلوط‌های خاک- آبروژل

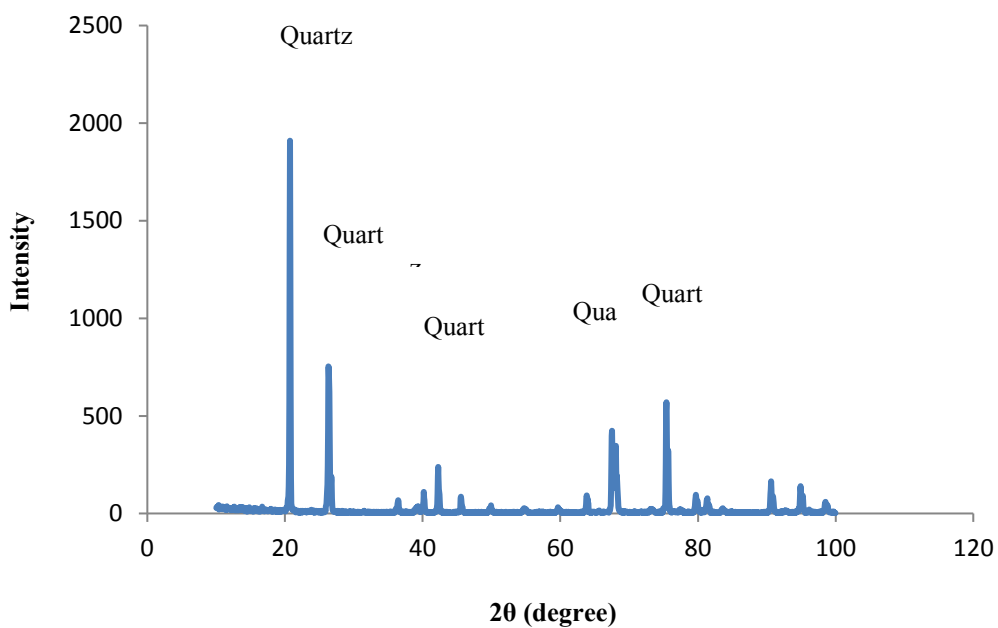
در این تحقیق، بر اساس استاندارد ASTM D5354، از سوزن حرارتی برای تعیین هدایت حرارتی مخلوط‌های خاک- آبروژل استفاده شد. تصویر دستگاه اندازه‌گیری هدایت حرارتی در شکل ۴ ارائه شده است.

همچنین، نتایج آنالیز XRF و XRD خاک مورد نظر به ترتیب در جدول ۲ و شکل ۳ ارائه شده است. با توجه به شکل‌های ۲ و ۳ و جدول ۲، مشخص است که خاک انتخاب شده برای تهیه مخلوط‌های خاک- آبروژل، ماسه بددانه‌بندی شده (یکنواخت) بوده و کانی اصلی تشکیل دهنده آن کوارتز می‌باشد.

اصلاح خواص حرارتی و هیدرولیکی خاک با استفاده از نانوسیلیکا آبروژل جهت...

جدول ۲. آنالیز XRF خاک استفاده شده برای تهیه مخلوط خاک- آبروژل

مقدار (%)	کانی
۹۷	SiO ₂
۱/۰۴	Al ₂ O ₃
-	MgO
۰/۴۵	Fe ₂ O ₃
۰/۳۵	CaO
۰/۰۵	Na ₂ O
۰/۰۶	K ₂ O



شکل ۳. آنالیز XRD خاک استفاده شده برای تهیه مخلوط خاک- آبروژل



شکل ۴. وسیله اندازه‌گیری هدایت حرارتی مخلوط خاک- آبروژل

۳-۲. آزمایش تعیین زاویه تماس مخلوط‌های

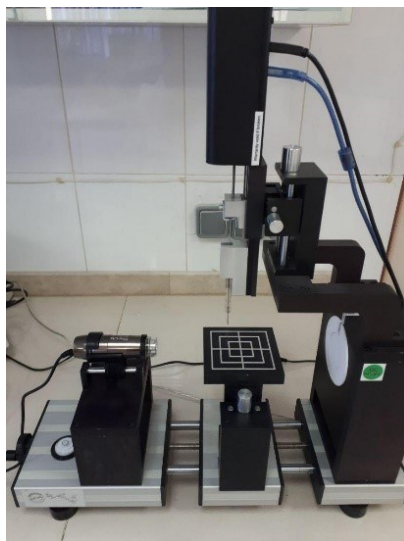
خاک- آبروژل

یکی از ویژگی‌های بارز سیلیکا آبروژل، شیمی سطح و آبگریزی فوق العاده‌ی آن می‌باشد. با توجه به آبگریزی بودن سیلیکا آبروژل، بدیهی است که با ترکیب خاک و سیلیکا آبروژل، علاوه بر خواص حرارتی خاک، رفتار خاک در مواجهه با رطوبت نیز تغییر خواهد کرد. به عبارت دیگر، سیلیکا آبروژل می‌تواند موجب آبگریزی شدن مخلوط خاک- آبروژل شده و در نتیجه مانع نفوذ آب در آن گردد. بنابراین، آبگریزی مخلوط‌های خاک- آبروژل در این تحقیق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و باید مورد ارزیابی قرار گیرد.

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری میزان آبگریزی یک سطح وجود دارد که رایج‌ترین آنها روش اندازه‌گیری زاویه تماس است. در این روش، زاویه تماس یک قطره آب با سطح مورد نظر با روش پردازش تصویر اندازه‌گیری می‌شود. بر اساس اصول مطرح شده در این روش، سطوح با زاویه تماس بیشتر از ۹۰ درجه، آبگریزی و سطوح با زاویه تماس کمتر از ۹۰ درجه، آبدوست هستند.

شکل ۵، دستگاه اندازه‌گیری زاویه تماس که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است را نشان می‌دهد. به منظور تعیین زاویه تماس قطره آب با سطح مخلوط خاک- آبروژل، قطره کوچکی توسط سوزن دستگاه روی سطح قرار داده شد و پس از تصویربرداری، زاویه تماس با استفاده از نرم‌افزار ویژه پردازش تصویر اندازه‌گیری شد.

بر اساس نتایج آزمایش‌های ارائه شده توسط نورمحمدی و همکاران (۲۰۲۲)، مقادیر سیلیکا آبروژل کمتر از ۲ درصد وزنی، بیشترین تأثیر را در کاهش هدایت حرارتی خاک دارد. به همین جهت، در این تحقیق از ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی سیلیکا آبروژل برای تهیه مخلوط‌های خاک- آبروژل استفاده شد. ابتدا ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی سیلیکا آبروژل با خاک مورد نظر (ماسه درشت‌دانه یکنواخت) مخلوط شده و پس از اطمینان از اختلاط کاملاً همگن و یکنواخت خاک و سیلیکا آبروژل، مخلوط‌های خاک- آبروژل به روش پروکتور اصلاح شده تراکم شدند. لازم به ذکر است که یکی از دلایل استفاده از ماسه درشت‌دانه یکنواخت برای تهیه مخلوط‌های خاک- آبروژل، تراکم‌پذیری ناچیز این نوع خاک می‌باشد. با توجه به کاربرد تعریف شده برای مخلوط‌های خاک- آبروژل به عنوان عایق حرارتی، بدیهی است که هر چقدر تراکم این مخلوط‌ها کمتر باشد، هدایت حرارتی آنها نیز کمتر خواهد بود. به همین جهت، یکی از محاسن استفاده از ماسه درشت‌دانه یکنواخت، تراکم کمتر و در نتیجه هدایت حرارتی کمتر مخلوط‌های خاک- آبروژل می‌باشد (نورمحمدی و همکاران، ۲۰۲۲). در نهایت، برای بررسی اثر رطوبت بر هدایت حرارتی مخلوط‌های خاک- آبروژل، این مخلوط‌ها اشباع شدند و هدایت حرارتی آنها اندازه‌گیری شد.



شکل ۵. وسیله اندازه‌گیری زاویه تماس (گونومتر)

مخلوط خاک- آبروژل به طور جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفت. برای تعیین ضریب نفوذپذیری مخلوط خاک- آبروژل، از آزمایش نفوذپذیری با بار ثابت استفاده شد. وسیله استفاده شده برای انجام این آزمایش در شکل ۶ نشان داده شده است.

۳-۳. آزمایش نفوذپذیری مخلوط‌های خاک-

آبروژل

آبگریزی و نفوذپذیری، دو ویژگی متفاوت مخلوط خاک- آبروژل هستند؛ به طوری که آبگریزی سطح برای اثبات نفوذناپذیری کافی نیست. بنابراین، نفوذپذیری



شکل ۶. وسیله آزمایش نفوذپذیری مخلوط خاک- آبروژل

جدا شده‌اند. پس از قرار دادن نمونه در محفظه تحتانی، دو قسمت به یکدیگر متصل می‌شوند. برای انجام آزمایش، ابتدا مخلوط خاک- آبروژل در قسمت تحتانی

مطابق شکل ۶، وسیله آزمایش دارای دو قسمت تحتانی و فوقانی می‌باشد، که برای قرارگیری راحت نمونه در داخل محفظه تحتانی، این دو قسمت از یکدیگر

چرخه‌های انجماد-ذوب بر خواص حرارتی مخلوط‌های خاک- آبروژل، این مخلوط‌ها طبق استاندارد ASTM D560 در معرض ۱۲ چرخه انجماد-ذوب قرار گرفتند. بر اساس روش آزمایش، ابتدا نمونه‌ها اشباع شده و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۳- درجه سلسیوس منجمد شدند. سپس، نمونه‌ها به مدت ۲۳ ساعت در دمای ۲۱ درجه سلسیوس نگهداری شدند تا کاملاً ذوب شوند. به منظور حفظ رطوبت نمونه‌ها، مخلوط‌های خاک- آبروژل در مرحله ذوب شدن، با آب در تماس بودند. در نتیجه، به دلیل خاصیت موینگی، رطوبت کافی برای آنها تأمین گردید.

۴. بررسی نتایج

۴-۱. اثر رطوبت بر هدایت حرارتی مخلوط‌های

خاک- آبروژل

برای بررسی اثر رطوبت، نمونه‌های CS1، CS0.5، CS0 و CS2 اشباع شده و هدایت حرارتی آنها اندازه‌گیری شد. در نام‌گذاری نمونه‌ها، دو حرف CS نشان‌دهنده نوع خاک (ماسه درشت‌دانه) و عدد بعد از آن نشان‌دهنده درصد وزنی سیلیکا آبروژل می‌باشد. به عنوان مثال، نمونه CS1 عبارتست از ماسه درشت‌دانه مخلوط شده با ۱ درصد وزنی سیلیکا آبروژل. هدایت حرارتی به دست آمده برای نمونه‌های CS0، CS0.5، CS1 و CS2 در شرایط اشباع در شکل ۷ ارائه شده است. با توجه به این شکل، مشخص است که حتی در شرایط اشباع، سیلیکا آبروژل موجب کاهش قابل توجه هدایت حرارتی خاک شده است. به طوری که هدایت حرارتی ماسه درشت‌دانه (CS0) در شرایط اشباع برابر $2/42 \text{ W/m.K}$ بوده، در حالی که هدایت حرارتی همین خاک با ۰/۵ درصد وزنی سیلیکا آبروژل (CS0.5) در شرایط اشباع به $0/81 \text{ W/m.K}$ کاهش یافته است.

قرار گرفته و سپس روی آن یک سنگ متخلخل و یک واشر فنی برای ثابت نگه داشتن آن قرار می‌گیرد. در زیر محفظه، یک شیر خروجی برای تخلیه آب عبوری از نمونه پیش‌بینی شده است.

پس از قرار دادن نمونه در قسمت تحتانی، بخش فوقانی توسط واشر و بست به آن متصل می‌شود. سپس سطح نمونه تا ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر با آب پر شده و در طول آزمایش، ارتفاع این ستون آب به طور ثابت حفظ می‌گردد. در هر آزمایش، بر اساس استاندارد ASTM D2434، پس از عبور آب از مخلوط خاک- آبروژل و اطمینان از جریان یکنواخت آب، حجم آب خارج شده از نمونه در زمان مشخص اندازه‌گیری شده و ضریب نفوذپذیری مخلوط‌های خاک- آبروژل اندازه‌گیری شد.

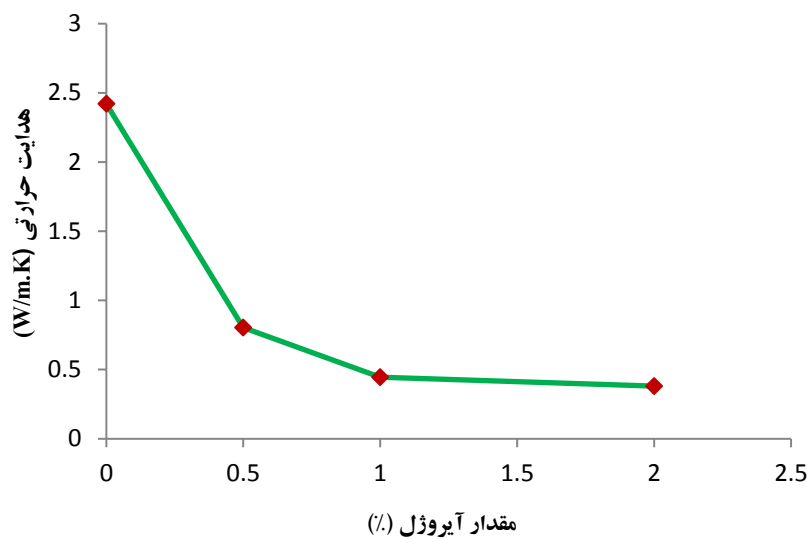
۴-۳. آزمایش میزان رطوبت مخلوط‌های خاک-

آبروژل

با توجه به کاربرد تعریف شده برای مخلوط‌های خاک- آبروژل و قرار گیری آنها در معرض رطوبت و همچنین با توجه به تأثیر رطوبت در افزایش هدایت حرارتی خاک، بررسی میزان جذب آب توسط مخلوط‌های خاک- آبروژل و تأثیر آن بر هدایت حرارتی آنها ضروری است. به همین جهت و به منظور بررسی و ارزیابی رفتار مخلوط‌های خاک- آبروژل در شرایط اشباع، این مخلوط‌ها اشباع شده و میزان رطوبت آنها در شرایط اشباع تعیین شد.

۴-۵. آزمایش چرخه‌های انجماد-ذوب

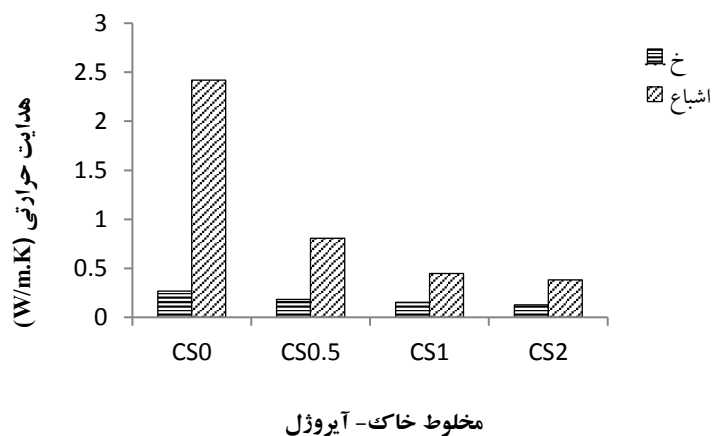
بدیهی است که در صورت مرطوب شدن مخلوط‌های خاک- آبروژل، به دلیل برودت هوا در مناطق سردسیر، این مخلوط‌ها همیشه در معرض چرخه‌های انجماد-ذوب قرار خواهند داشت. به منظور بررسی تأثیر



شکل ۷. هدایت حرارتی مخلوط‌های خاک آبروژل در شرایط اشباع

پس از اشباع نمونه، هدایت حرارتی آن سه برابر افزایش یافته است. از سوی دیگر، در نمونه بدون سیلیکا آبروژل (CS0)، هدایت حرارتی در شرایط خشک و اشباع به ترتیب برابر 0.267 W/m.K و 2.42 W/m.K می‌باشد که نشان می‌دهد پس از اشباع نمونه، هدایت حرارتی آن حدود ۹ برابر افزایش یافته است. به عبارت دیگر، در صورت مرطوب شدن مخلوط‌های خاک- آبروژل، سیلیکا آبروژل مانع افزایش قابل توجه هدایت حرارتی آنها خواهد شد. به منظور بررسی بیشتر این موضوع، درصد رطوبت در نمونه‌های اشباع CS0، CS0.5، CS1 و CS2، اندازه‌گیری شد و مورد بررسی قرار گرفت.

همچنین، به منظور بررسی اثر رطوبت بر افزایش هدایت حرارتی مخلوط‌های خاک- آبروژل، هدایت حرارتی نمونه‌های CS0، CS0.5، CS1 و CS2 در شرایط خشک و اشباع در شکل ۸ با یکدیگر مقایسه شده است. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که اثر رطوبت بر افزایش هدایت حرارتی نمونه‌های حاوی سیلیکا آبروژل (CS2 و CS1، CS0.5) بسیار کمتر از نمونه‌ی بدون سیلیکا آبروژل (CS0) بوده است. به عنوان مثال، در نمونه CS2 که حاوی ۲ درصد وزنی سیلیکا آبروژل است، هدایت حرارتی در شرایط خشک و اشباع به ترتیب برابر 0.126 W/m.K و 0.381 W/m.K بوده که نشان می‌دهد

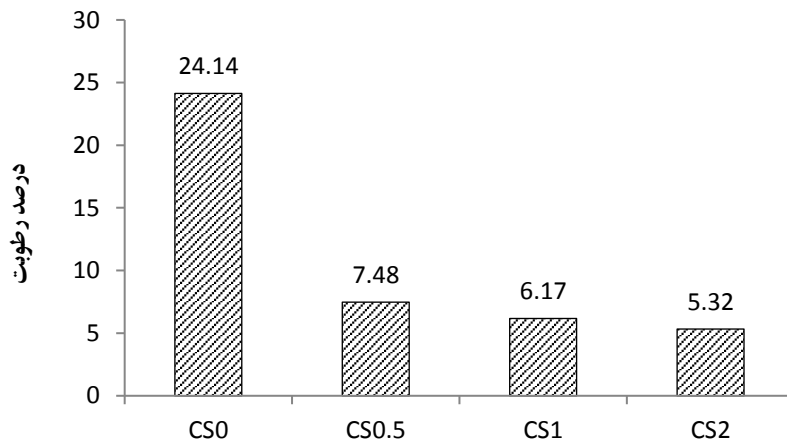


شکل ۸. مقایسه هدایت حرارتی مخلوط‌های خاک- آبروژل در حالت خشک و اشباع

وارد و از سمت دیگر خارج می‌شود. همچنین، اکثر منافذ خاک نیز توسط ذرات سیلیکا آبروژل پر شده و فضایی برای پر شدن توسط آب، باقی نمی‌ماند. به عبارت دیگر، سیلیکا آبروژل از طریق دو مکانیزم موجب کاهش جذب آب در مخلوط‌های خاک- آبروژل می‌گردد. مکانیزم اول، پوشاندن سطح دانه‌های خاک و در نتیجه آبگریز شدن آنها می‌باشد؛ و مکانیزم دوم، پر کردن منافذ خاک و در نتیجه کاهش فضای موجود برای آب منفذی است. لذا، با در نظر گرفتن این دو مکانیزم بیان شده، آب جذب شده توسط مخلوط‌های خاک- آبروژل، ناچیز بوده و میزان رطوبت آنها در مقایسه با خاک بدون سیلیکا آبروژل به طور قابل توجهی کمتر است. به نحوی که تأثیر رطوبت در افزایش هدایت حرارتی مخلوط‌های خاک- آبروژل در مقایسه با خاک بدون سیلیکا آبروژل، ناچیز می‌باشد.

در شکل ۹، درصد رطوبت نمونه‌های خاک- آبروژل در شرایط اشباع با خاک بدون سیلیکا آبروژل (CS0) مقایسه شده است. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که میزان رطوبت در نمونه اشباع CS0 در مقایسه با نمونه‌های اشباع CS0.5، CS1 و CS2 به طور متوسط ۳/۸ برابر بیشتر است. به عبارت دیگر، سیلیکا آبروژل موجب کاهش قابل توجه در میزان جذب رطوبت در خاک شده و از این طریق از افزایش هدایت حرارتی مخلوط‌های خاک- آبروژل در اثر مرطوب شدن، ممانعت می‌کند.

در بخش‌های بعدی، شرح داده خواهد شد که سیلیکا آبروژل به دلیل آبگریزی فوق‌العاده، موجب آبگریز شدن مخلوط‌های خاک- آبروژل می‌گردد. به همین جهت، آب امکان مرطوب کردن دانه‌های خاک پوشیده شده با نانوذرات سیلیکا آبروژل را نداشته و از یک سمت نمونه



مخلوط خاک- آبروژل اشباع

شکل ۹. مقایسه درصد رطوبت در مخلوط‌های اشباع خاک- آبروژل

می‌گیرد، بنابراین، بررسی تأثیر چرخه‌های تر شدن- خشک شدن بر خواص آنها ضروری است. به منظور بررسی اثر چرخه‌های تر و خشک شدن در هدایت حرارتی مخلوط‌های خاک- آبروژل، هدایت حرارتی نمونه‌های CS0.5، CS1 و CS2 پس از پنج دوره اشباع

۴-۲. اثر چرخه‌های تر شدن- خشک شدن بر

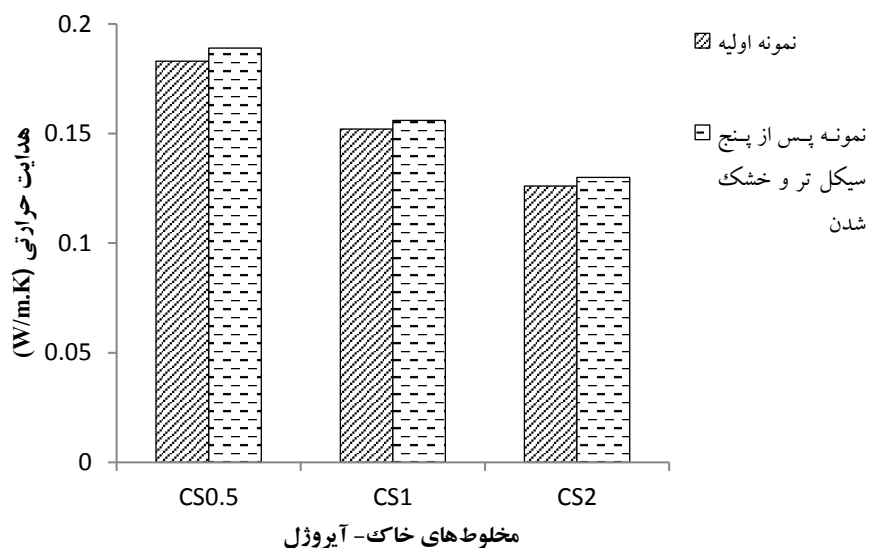
هدایت حرارتی مخلوط‌های خاک- آبروژل

با توجه به این که مخلوط خاک- آبروژل به عنوان یک عایق حرارتی در سطح خاک در معرض رطوبت قرار

پنج دوره تر و خشک شدن به ترتیب برابر $W/m.K$ 0.183 و 0.189 می‌باشد. در واقع، این نکته نشان می‌دهد که با عبور آب از مخلوط‌های خاک-آبروژل، سیلیکا-آبروژل موجود در آن در اثر جریان آب خارج نشده و مخلوط خاک-آبروژل، پس از سیکل‌های تر و خشک شدن و قرار گرفتن در معرض جریان آب، ترکیب خود را حفظ می‌نماید.

شدن و خشک شدن، با هدایت حرارتی اولیه این نمونه‌ها در شکل ۱۰ مقایسه شده است.

با توجه به این شکل، مشخص است که هدایت حرارتی نمونه‌هایی که پنج دوره اشباع شدن و خشک شدن را تجربه کرده‌اند، تقریباً با هدایت حرارتی ابتدایی آنها قبل از اشباع شدن برابر است. به عنوان مثال، در نمونه CS0.5، هدایت حرارتی اولیه و هدایت حرارتی پس از



شکل ۱۰. اثر سیکل‌های تر و خشک شدن بر هدایت حرارتی مخلوط‌های خاک-آبروژل

و هدایت حرارتی آنها توسط سوزن حرارتی اندازه‌گیری شد.

در شکل ۱۱، هدایت حرارتی مخلوط‌های خاک-آبروژل که ۱۲ چرخه انجماد-ذوب را تجربه کرده‌اند با هدایت حرارتی اولیه آنها مقایسه شده است. با توجه به این شکل، مشخص است که چرخه‌های انجماد-ذوب تأثیری بر هدایت حرارتی مخلوط‌های خاک-آبروژل نداشته است. به عنوان مثال، هدایت حرارتی نمونه CS0.5 قبل و بعد از چرخه‌های انجماد-ذوب به ترتیب برابر 0.183 $W/m.K$ و 0.180 $W/m.K$ می‌باشد.

۴-۳. اثر سیکل‌های انجماد-ذوب بر هدایت

حرارتی مخلوط‌های خاک-آبروژل

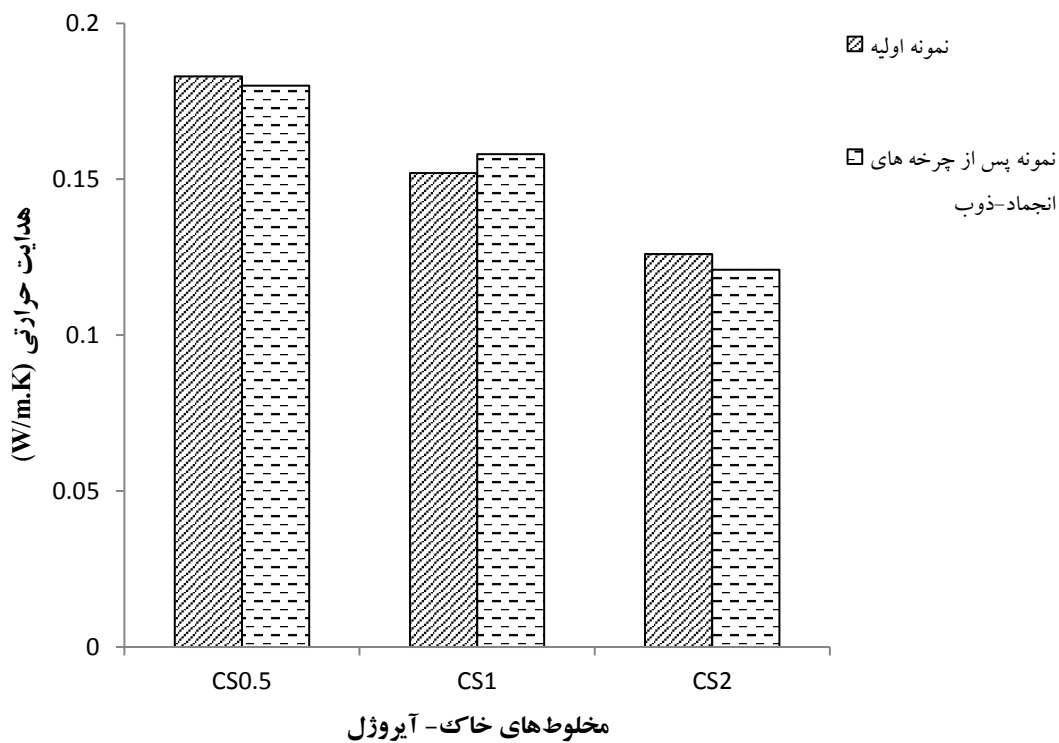
با توجه به کاربرد مخلوط‌های خاک-آبروژل در مناطق سردسیر و همچنین احتمال مرطوب شدن آنها، بدیهی است که این مخلوط‌ها همواره در معرض سیکل‌های انجماد-ذوب خواهند بود. بنابراین، بایستی اثر سیکل‌های انجماد-ذوب روی هدایت حرارتی مخلوط‌های خاک-آبروژل مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور، نمونه‌های CS0.5، CS1 و CS2 پس از اشباع شدن مطابق با استاندارد ASTM D560، در معرض ۱۲ چرخه انجماد-ذوب قرار گرفتند. پس از پایان چرخه‌های انجماد-ذوب، نمونه‌ها در آون خشک شده

۴-۴. اثر سیلیکا آبروژل بر آبگریزی مخلوط‌های

خاک- آبروژل

بر اساس اطلاعات ارائه شده در جدول ۱، زاویه تماس ۱۴۵ درجه برای سیلیکا آبروژل استفاده شده در این تحقیق نشان‌دهنده آبگریزی فوق‌العاده آن می‌باشد. بنابراین، احتمالاً در اثر ترکیب خاک و سیلیکا آبروژل، مخلوط‌های خاک- آبروژل نیز آبگریز خواهند شد. در

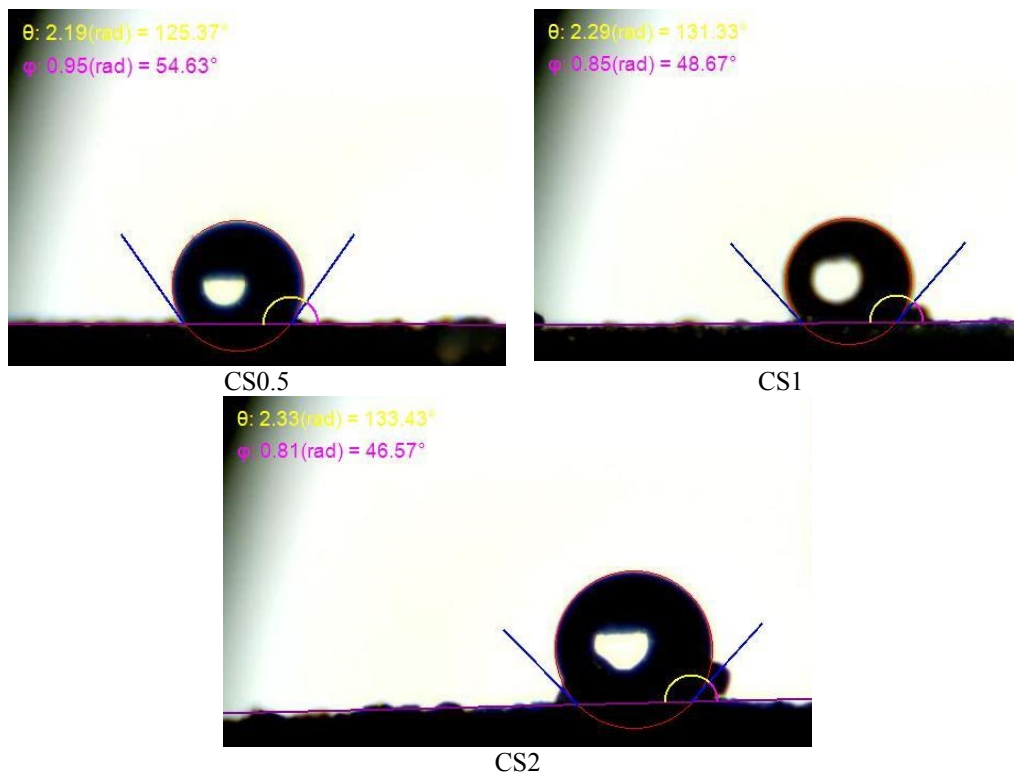
بخش‌های قبل، مشاهده شد که میزان جذب آب توسط مخلوط‌های خاک- آبروژل در مقایسه با خاک بدون سیلیکا آبروژل بسیار اندک بود، که می‌توان یکی از دلایل احتمالی آن را آبگریزی مخلوط‌های خاک- آبروژل عنوان نمود. در این بخش، با اندازه‌گیری زاویه تماس قطره آب با سطح مخلوط‌های خاک- آبروژل، میزان آبگریزی آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۱۱. اثر سیکل‌های انجماد- ذوب بر هدایت حرارتی مخلوط‌های خاک- آبروژل

(ماسه درشت‌دانه بدون سیلیکا آبروژل)، به علت جذب آبی قطره آب توسط خاک، امکان تصویربرداری و پردازش تصویر وجود نداشت. بنابراین، زاویه تماس این نمونه، برابر صفر درجه در نظر گرفته می‌شود

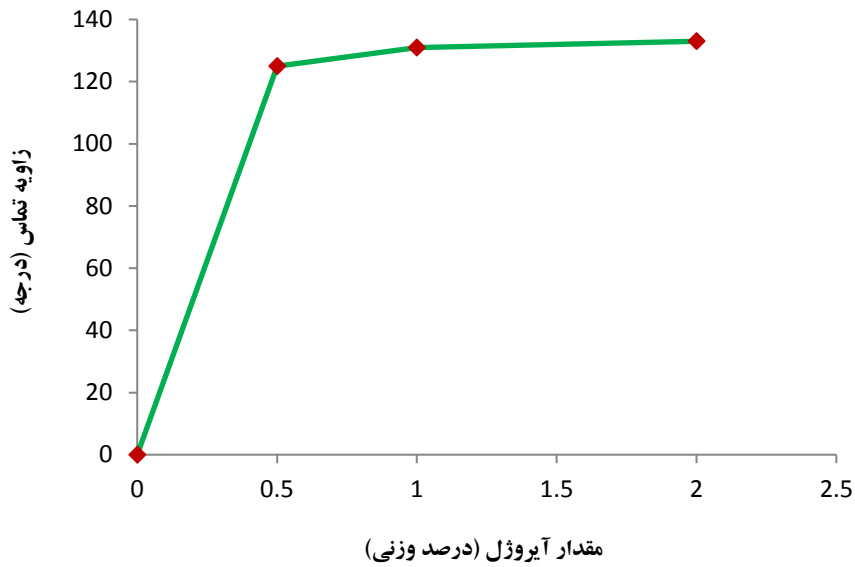
در شکل ۱۲، زاویه‌ی تماس نمونه‌های CS0.5، CS1 و CS2 که توسط روش پردازش تصویر به دست آمده، نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، زاویه تماس به دست آمده برای این سه نمونه به ترتیب برابر ۱۲۵، ۱۳۱ و ۱۳۳ درجه می‌باشد. در خصوص نمونه CS0



شکل ۱۲. زاویه تماس نمونه‌های CS0.5، CS1 و CS2

در شکل ۱۳، تغییر زاویه تماس نمونه‌های خاک-آبروژل بر حسب مقادیر مختلف سیلیکا آبروژل نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، می‌توان مشاهده نمود که با افزودن ۰/۵ درصد وزنی سیلیکا آبروژل به خاک، زاویه تماس و در نتیجه آبگریزی آن به شدت افزایش یافته؛ ولی با افزایش مقدار سیلیکا آبروژل، از میزان تأثیر آن در افزایش زاویه تماس و آبگریزی خاک کاسته شده است. به منظور بررسی بیشتر این موضوع، از تصاویر SEM مخلوطه‌های خاک-آبروژل استفاده شد.

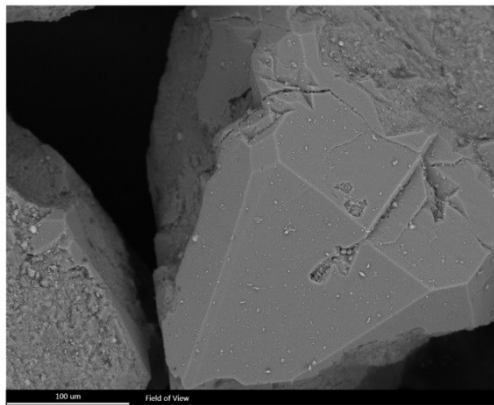
با توجه به این که زاویه تماس نمونه‌های CS0.5، CS1 و CS2، به مراتب بیشتر از ۹۰ درجه می‌باشد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزودن سیلیکا آبروژل موجب آبگریز شدن خاک شده است. با توجه به تعریف سطوح فوق آبگریز که به سطوح با زاویه تماس بیش از ۱۵۰ درجه اطلاق می‌شود (آگرت و همکاران، ۲۰۰۹)، و با توجه به زاویه‌ی تماس به دست آمده برای مخلوطه‌های خاک-آبروژل، می‌توان به آبگریزی قابل توجه این مخلوطه‌ها پی برد. در واقع، سیلیکا آبروژل، هر چند با مقادیر کم، به علت داشتن نسبت سطح به حجم فوق-العاده، به طور قابل توجهی سطح دانه‌های خاک را پوشانده و موجب آبگریز شدن خاک می‌شود.



شکل ۱۳. تأثیر سیلیکا آیروزل بر آبگریزی خاک

با پوشش ایجاد شده در نمونه CS0.5 چندان متفاوت نیست؛ بلکه ضخامت لایه سیلیکا آیروزل روی سطح دانه‌های خاک در نمونه‌های CS1 و CS2 افزایش یافته است. لذا، با توجه به پوشیده شدن سطح دانه‌های خاک توسط ذرات سیلیکا آیروزل در نمونه CS0.5، با افزایش میزان سیلیکا آیروزل بیش از ۰/۵ درصد وزنی، شاهد تغییر چشم‌گیری در آبگریزی مخلوط خاک- آیروزل نخواهیم بود.

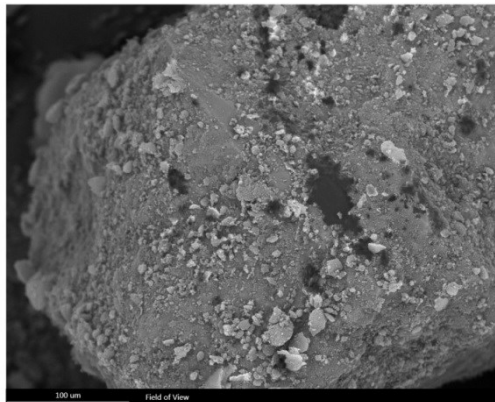
شکل ۱۴، تصاویر SEM از نمونه‌های CS0، CS0.5، CS1 و CS2 را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، مشخص است که در نمونه CS0.5 سطح دانه خاک تقریباً به طور کامل توسط ذرات سیلیکا آیروزل پوشیده شده است. در حالی که با افزایش میزان سیلیکا آیروزل به ۱٪ و ۲٪ در نمونه‌های CS1 و CS2، هر چند که میزان ذرات آیروزل قرار گرفته روی سطح دانه‌های خاک افزایش یافته ولی میزان پوشش ایجاد شده روی سطح دانه خاک



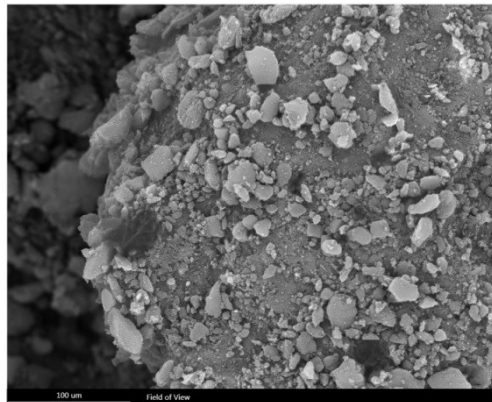
CS0



CS0.5



CS1



CS2

شکل ۱۴. تصاویر SEM از نمونه‌های CS0، CS0.5، CS1 و CS2

۴-۵. اثر سیلیکا آبروژل بر نفوذپذیری مخلوط‌های

خاک- آبروژل

همان گونه که قبلاً بحث شد، آبرگریزی و نفوذپذیری دو ویژگی مجزا در مخلوط‌های خاک- آبروژل می‌باشند، و آبرگریزی نمونه‌های خاک- آبروژل برای اثبات نفوذناپذیری آنها کافی نیست. به همین جهت، در این بخش، میزان نفوذپذیری مخلوط‌های خاک- آبروژل بررسی می‌شود. به این منظور، نفوذپذیری نمونه‌های CS0، CS0.5، CS1 و CS2 اندازه‌گیری شد. در شکل ۱۵، تغییرات نفوذپذیری این نمونه‌ها در اثر افزایش مقدار سیلیکا آبروژل نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، کاهش قابل توجه نفوذپذیری خاک در اثر افزودن ۰/۵ درصد وزنی سیلیکا آبروژل قابل مشاهده می‌باشد. به طوری که نفوذپذیری خاک CS بدون افزودن سیلیکا آبروژل برابر 0.03 cm/s بوده و با افزودن ۰/۵ درصد سیلیکا آبروژل، نفوذپذیری آن به 0.0074 cm/s تقلیل می‌یابد. مشابه رفتار قبلی مخلوط‌های خاک- آبروژل که در مورد آبرگریزی آنها مشاهده شد، در خصوص نفوذپذیری نمونه‌ها نیز همان رفتار قابل مشاهده است. به عبارت دیگر، با افزایش مقدار سیلیکا آبروژل بیش از ۰/۵ درصد، شیب نمودار نفوذپذیری کاهش یافته و از اثربخشی سیلیکا آبروژل در کاهش نفوذپذیری خاک

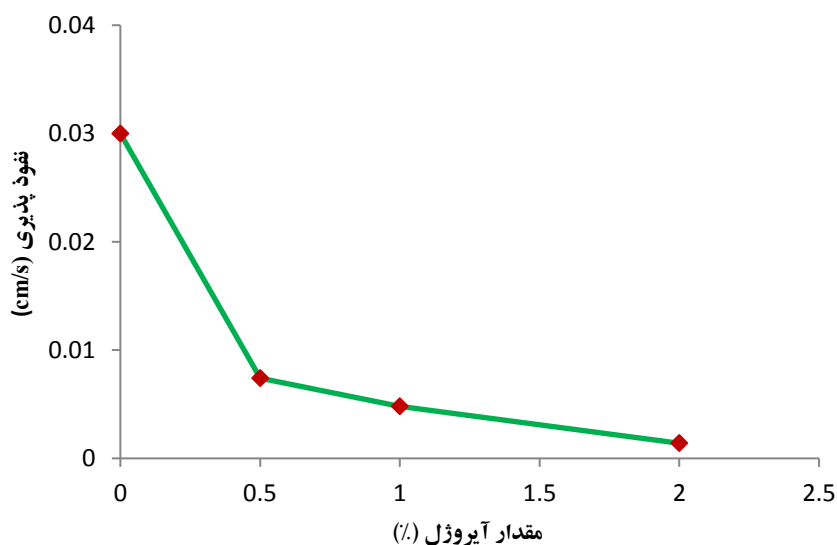
لازم به ذکر است که با توجه به آبرگریزی بودن سیلیکا آبروژل، این ماده هیچ واکنشی با آب انجام نداده و بدون ایجاد چسبندگی یا افزایش حجم، صرفاً از طریق پر کردن منافذ و همچنین پوشاندن سطح دانه‌های خاک، موجب آبرگریزی شدن و سایر ویژگی‌های مخلوط‌های خاک- آبروژل می‌گردد. در مجموع، با افزودن سیلیکا آبروژل به خاک، حتی با مقادیر کم، خاک به طور قابل توجهی آبرگریزی شده و به همین جهت، مرطوب کردن مخلوط‌های خاک- آبروژل در مقایسه با خاک بدون سیلیکا آبروژل، کار دشواری است. به عبارت دیگر، نمی‌توان به راحتی مخلوط‌های خاک- آبروژل را مرطوب و یا اشباع نمود. این ویژگی مخلوط‌های خاک- آبروژل، به طور قابل توجهی برای اهداف این تحقیق مفید می‌باشد. زیرا همان‌گونه که بیان شد، افزایش رطوبت خاک موجب افزایش چشم‌گیری در هدایت حرارتی آن خواهد شد. ولی مخلوط‌های خاک- آبروژل با استفاده از خاصیت آبرگریزی خود، مانع نفوذ آب و مرطوب شدن آنها می‌شوند. در نهایت، می‌توان بیان نمود که ویژگی آبرگریزی مخلوط‌های خاک- آبروژل، آنها را به انتخابی مناسب به عنوان یک عایق حرارتی برای ممانعت از نفوذ سرما در شرایط مرطوب تبدیل می‌کند.

سطوح دانه‌های خاک توسط ذرات سیلیکا آبروژل اشغال شده و به همین جهت در افزایش‌های بعدی، منافذ و به ویژه سطوح جدید زیادی برای پر شدن یا پوشیده شدن توسط ذرات سیلیکا آبروژل وجود ندارد.

با توجه به نقش رطوبت در افزایش هدایت حرارتی محیط‌های متخلخل، بدیهی است که کاهش نفوذپذیری مخلوط خاک- آبروژل و همچنین سایر ویژگی‌های هیدرولیکی آن مانند آگریزی و میزان جذب آب، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. با توجه به نتایج آزمایش‌ها، می‌توان بیان نمود که خواص و ویژگی‌های هیدرولیکی مخلوط‌های خاک- آبروژل، کاملاً هم‌جهت با کاربرد تعریف شده برای آنها به عنوان یک عایق حرارتی بوده و موجب عملکرد مناسب مخلوط خاک- آبروژل در شرایط مرطوب می‌گردد.

کاسته می‌شود. البته، این بدان معنی نیست که افزایش مقدار سیلیکا آبروژل بیش از ۰/۵ درصد تأثیر قابل توجهی بر کاهش نفوذپذیری نداشته است؛ بلکه در مقایسه با مقدار اولیه ۰/۵ درصد، تأثیر افزایش‌های بعدی کمتر بوده است. به طوری که با افزایش میزان سیلیکا آبروژل به ۰/۱٪ و ۰/۲٪، نفوذپذیری خاک به ترتیب برابر 0.0048 cm/s و 0.0014 cm/s می‌شود.

در توضیح کاهش اثربخشی سیلیکا آبروژل در افزایش‌های بعد از ۰/۵ درصد، می‌توان همان استدلال انجام گرفته برای تغییرات آگریزی خاک را ارائه نمود. به عبارت دیگر، با افزودن ۰/۵ درصد سیلیکا آبروژل به خاک، با توجه به دانسیته بسیار کم و در نتیجه حجم قابل توجه سیلیکا آبروژل و همچنین با توجه به نسبت سطح به حجم قابل توجه در سیلیکا آبروژل، اکثر منافذ و



شکل ۱۵. تأثیر سیلیکا آبروژل بر نفوذپذیری خاک

ممانعت از نفوذ هوای سرد در خاک معرفی گردید. سیلیکا آبروژل یک نانو مواد با هدایت حرارتی فوق‌العاده کم و آگریزی بسیار زیاد است که در این تحقیق پس از مخلوط شدن با خاک، مخلوط خاک- آبروژل را به یک عایق حرارتی آگریز تبدیل نمود. با توجه به نقش

۵. نتیجه‌گیری

یخبندان خاک در مناطق سردسیر موجب خسارات و خرابی‌های زیادی در راه‌ها و سایر سازه‌های خاکی می‌گردد. در این تحقیق، مخلوط خاک- آبروژل به عنوان یک عایق حرارتی سازگار با شرایط مرطوب به منظور

آنها را به انتخابی مناسب برای استفاده به عنوان یک عایق حرارتی در سطح خاک در شرایط مرطوب تبدیل می‌کند. یکی از کاربردهای اصلی مخلوط‌های خاک- آبروژل، حفاظت از روسازی راه در برابر یخبندان می‌باشد. به طوری که بدون نگرانی از کاهش کارایی آنها در اثر رطوبت و سیکل‌های انجماد- ذوب، می‌توان از آنها به عنوان یک عایق حرارتی در روسازی راه برای ممانعت از نفوذ هوای سرد و کاهش اثرات نامطلوب یخبندان در خاک بستر استفاده نمود. در روش پیشنهاد شده، هیچیک از کاستی‌ها و مشکلات موجود در روش‌های فعلی پیش‌گیری از یخبندان، مانند حجم قابل توجه عملیات خاکی، نیاز به مصالح سنگی زیاد، مدت زمان اجرای طولانی و مقاومت کم در برابر بار چرخ‌ها به چشم نمی‌خورد. با توجه به مزایای استفاده از عایق حرارتی در سطح خاک در مقایسه با سایر روش‌ها، پیشنهاد می‌گردد محققان در تحقیقات آتی، روش‌ها و همچنین مواد جدید برای تهیه یک عایق حرارتی سازگار با شرایط مرطوب خاک در مناطق سردسیر را مورد مطالعه قرار دهند. بدیهی است مهم‌ترین عامل در انتخاب مواد جدید، هدایت حرارتی آنها می‌باشد؛ و پس از آن سایر عوامل از قبیل دوست‌دار محیط‌زیست بودن، توجیه اقتصادی مواد جدید و عدم واکنش با آب باید مورد توجه قرار گیرد.

رطوبت در افزایش هدایت حرارتی خاک، خواص هیدرولیکی مخلوط‌های خاک- آبروژل مورد مطالعه قرار گرفت. در این بررسی، مشخص شد که زاویه تماس قطره آب با سطح مخلوط خاک- آبروژل حدود ۱۳۰ درجه است که نشان‌دهنده آبگریزی فوق‌العاده این مخلوط می‌باشد. همچنین، اندازه‌گیری رطوبت مخلوط‌های خاک- آبروژل در حالت اشباع نشان داد که به دلیل آبگریزی بودن این مخلوط‌ها، جذب آب در آنها بسیار کمتر از خاک بدون سیلیکا آبروژل است. به طوری که میزان رطوبت جذب شده توسط خاک بدون سیلیکا آبروژل حدود چهار برابر رطوبت جذب شده توسط مخلوط‌های خاک- آبروژل می‌باشد. به همین جهت، در صورت مرطوب شدن مخلوط خاک- آبروژل، هدایت حرارتی آن در مقایسه با خاک بدون سیلیکا آبروژل، چندان افزایش نمی‌یابد. همچنین، نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری نشان داد که سیلیکا آبروژل موجب کاهش قابل توجه نفوذپذیری خاک نیز می‌گردد. از سوی دیگر، بر اساس نتایج به دست آمده، چرخه‌های تر شدن- خشک شدن و انجماد- ذوب و همچنین قرار گرفتن در معرض جریان آب، هدایت حرارتی مخلوط‌های خاک- آبروژل را تغییر نمی‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق، مجموعه خواص هیدرولیکی مخلوط‌های خاک- آبروژل

۶. مراجع

- روستایی، م. و قضاوی، م. ۱۳۹۱. "اثر سیکل‌های یخبندان و ذوب یخ بر مقاومت خاک ریزدانه مسلح شده بوسیله الیاف پلی‌پروپیلن و لایه‌های ژئوتکستایل". رساله دکتری تخصصی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.
- زیلایی، م. و غنی‌زاده، ع. ۱۴۰۰. "مقاومت و دوام مصالح باطله سنگ آهن تثبیت شده با سیمان به عنوان مصالح اساس: مورد مطالعاتی معدن گل‌گهر". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۷(۲): ۱۰۱-۱۲۲.
- غنی‌زاده، ع.، ذوالفقاری، م. و عباسلو، ح. ۱۳۹۹. "مشخصات مکانیکی و دوام بستر رسی تثبیت شده با ترکیب باطله سنگ آهن و آهک شکفته". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۶(۳): ۸۸-۶۹.
- گلچین‌فر، ن. و عباسی، ن. ۱۳۹۲. "اثر ذوب و یخبندان‌های مکرر بر ویژگی‌های مکانیکی خاک‌های رسی تثبیت شده با آهک و مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن". مهندسی عمران امیرکبیر، ۴۵(۲): ۱-۱۲.

- Aegerter, M. A., Leventis, M. and Koebel, M. 2009. "Aerogels Handbook: Advances in sol-gel derived materials and technologies". Springer.
- Aldaood, A., Bouasker, M. and Mukhtar, M. 2014. "Impact of freeze-thaw cycles on mechanical behaviour of lime stabilized gypseous soils". *Cold Reg. Sci. Technol.*, 99: 38-45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2013.12.003>
- Aldaood, A., Bouasker, M. and Mukhtar, M. 2016. "Effect of water during freeze-thaw cycles on the performance and durability of lime treated gypseous soil". *Cold Reg. Sci. Technol.*, 123: 155-163. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.12.008>
- Arabi, M., Vild, S. and Rowlands, G. O. 1989. "Frost resistance of lime-stabilized clay soil". *Transport. Res. Record*, 1219: 93-102. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1989/1219/1219-009.pdf>
- Brandon, T. L. and Mitchell J. K. 1989. "Factors influencing thermal resistivity of sands". *ASCE, J. Geotech. Eng.*, 115(2): 1683-1698. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339410\(1989\)115:12\(1683\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339410(1989)115:12(1683))
- Chamberlain, E. J., Erikson, A. E. and Benson, C. H. 1995. "Effects of frost action on compacted clay barriers". *Geoenviron.*, 2000(1): 702-717.
- Dawson, A. 2009. "Water in road structures: Movement, drainage and effects". Springer.
- Fang, H. Y. 1991. "Foundation engineering handbook". Chapman and Hall.
- Freitag, D. R. and McFadden, T. 1997. "Introduction to cold regions engineering". New York: ASCE Press.
- Gandahl, R. 1988. "Polystyrene foam as a frost protection measure on national roads in Sweden". *Transport. Res. Record*, 1146: 1-9. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1987/1146/1146-001.pdf>
- Gowthaman, S., Nakashima, K. and Kawasaki, S. 2020. "Freeze-thaw durability and shear responses of cemented slope soil treated by microbial induced carbonate precipitation". *Soils Found.*, 60: 840-855. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.05.012>
- Gullu, H. and Khudir, A. 2014. "Effect of freeze-thaw cycles on unconfined compressive strength of fine-grained soil treated with jute fiber, steel fiber and lime". *Cold Reg. Sci. Technol.*, 106-107: 55-65. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.06.008>
- Gurav, J. L., Jung, I. K., Park, H., Kang, E. S. and Nadargi, D. Y. 2010. "Silica aerogel: Synthesis and applications". *J. Nanomater.*, Article ID: 409310. <https://doi.org/10.1155/2010/409310>
- Hall, M. R. 2010. "Materials for energy efficiency and thermal comfort in buildings". Woodhead.
- Hillel, D. 1982. "Introduction to soil physics". Academic Press.
- Jamshidi, R., Lake, B., Gunning, P. and Hills, C. 2016. "Effect of freeze/thaw cycles on the performance and microstructure of cement-treated soils". *ASCE, J. Mater. Civ. Eng.*, 28(12). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001677](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001677)
- Jesu, J., Baldovino, A., Izzo, R. L. and Rose, J. L. 2020. "Effects of freeze-thaw cycles and porosity/cement index on durability, strength and capillary rise of a stabilized silty soil under optimal compaction conditions". *Geotech. Geol. Eng.*, 39: 481-498. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01507-y>
- Koorevaar, P., Menelik, G. and Dirksen, C. 1983. "Elements of soil physics". Elsevier.
- Lai, Y., Zhang, S. and Yu, W. 2012. "A new structure to control frost boiling and frost heave of embankments in cold regions". *Cold Reg. Sci. Technol.*, 79-80: 53-66. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.04.002>
- Li, Y., Ling, X., Su, L., An, L., Li, P. and Zhao, Y. 2018. "Tensile strength of fiber reinforced soil under freeze-thaw condition". *Cold Reg. Sci. Technol.*, 146: 53-59. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.11.010>
- Li, Z., Liu, S., Wang, L. and Zhang, C. 2013. "Experimental study on the effect of frost heave prevention using soil bags". *Cold Reg. Sci. Technol.*, 85: 109-116. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.08.008>
- Liu, C., Lv, Y., Yu, X. and Wu, X. 2020. "Effects of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of straw fiber-reinforced soil". *Geotext. Geomembranes*, 48(4): 581-590. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2020.03.004>
- Lu, Y., Liu, S., Zhang, Y., Li, Z. and Xu, L. 2020. "Freeze-thaw performance of a cement-treated expansive soil". *Cold Reg. Sci. Technol.*, 170: 102926. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102926>
- MacMaster, J. B. and Wrong, G. A. 1988. "The role of extruded expanded polystyrene in Ontario's provincial transportation system". *Transport. Res. Record*, 1146: 10-22. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1987/1146/1146-002.pdf>
- Mitchel, K. J. and Soga, K. 2005. "Fundamentals of soil behavior". Wiley.
- Moussa, A., Shalaby, A., Kavanagh, L. and Maghoul, P. 2019. "Use of rigid geofom insulation to mitigate frost heave at shallow culvert installations". *J. Cold Reg. Eng.*, 33(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CR.1943-5495.0000185](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000185)
- Nguyen, T. T. H., Cui, Y. J., Ferber, V., Herrier, G., Ozturk, T., Plier, F., Puiatti, D., Salager, S. and Tang, A. M. 2019. "Effect of freeze-thaw cycles on mechanical strength of lime-treated fine-grained soils". *Transport. Geotech.*, 21: 100281. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100281>

- Nosrati, R. H. and Berardi, U. 2018. "Hygrothermal characteristics of aerogel-enhanced insulating materials under different humidity and temperature conditions". *Energy Build.*, 158: 698-711.
- Nourmohamadi, M., Abtahi, M., Hashemolhosseini, H. and Hejazi, M. 2022. "Control of frost effects in susceptible soils using a novel sandwich geocomposite composed of geotextile-soil-nano silica aerogel-geotextile liners". *Transport. Geotech.*, 33: 100718. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100718>
- Ono, T. and Kawabe, K. 2006. "Frost susceptibility of stabilized soils". 13th International Conference on Cold Regions Engineering, Orono, Maine, United States. [https://doi.org/10.1061/40836\(210\)36](https://doi.org/10.1061/40836(210)36)
- Orakoglu, M. E. and Liu, J. 2017. "Effect of freeze-thaw cycles on triaxial strength properties of fiber-reinforced clayey soil". *KSCE J. Civ. Eng.*, 21: 2128-2140. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0960-8>
- Riffat, S. B. and Qiu, G. 2013. "A review of state-of-the-art aerogel applications in buildings". *Int. J. Low-Carbon Technol.*, 8: 1-6. <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts001>
- Sahlabadi, S. H., Bayat, M., Mousivand, M. and Saadat, M. 2021. "Freeze-thaw durability of cement-stabilized soil reinforced with polypropylene/basalt fibers". *ASCE, J. Mater. Civ. Eng.*, 33(9). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003905](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003905)
- Salomone, L. A., Kovacs, W. D. and Kusuda, T. 1984. "Thermal performance of fine-grained soils". *J. Geotech. Eng.*, 110(3): 359-374. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339410\(1984\)110:3\(359\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339410(1984)110:3(359))
- Sun, X., L., Miao, Wang, H., Chen, R. and Guo, X. 2021. "Improvement of characteristics and freeze-thaw durability of solidified loess based on microbially induced carbonate precipitation". *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 80: 4957-4966. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02241-2>
- Tebaldi, G., Orazi, M. and Orazi, U. S. 2016. "Effect of freeze-thaw cycles on mechanical behavior of lime-stabilized soil". *ASCE, J. Mater. Civ. Eng.*, 28(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.19435533.0001509](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.19435533.0001509)
- Torgal, F. P., Diamanti, M. V., Nazari, A. and Granqvist, G. 2013. "Nanotechnology in eco-efficient construction". Woodhead.
- Torgal, F. P., Diamanti, M. V., Nazari, A., Granqvist, G., Pruna, A. and Amirkhanian, S. 2019. "Nanotechnology in eco-efficient construction". Woodhead.
- Zhang, Y., Johnson, A. and White, D. J. 2016. "Laboratory freeze-thaw assessment of cement, fly ash, and fiber stabilized pavement foundation materials". *Cold Reg. Sci. Technol.*, 122: 50-57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.11.005>