مقایسهٔ تأثیرسیمان، آهک و نانوپلیمر CBR PLUS در کاهش تورم خاک‌های رسی بستر روسازی‌ها

حسن طاهرخانی؛ دانشگاه زنجان، گروه راه و ترابری، زنجان، ایران
مهران جوانمرد؛ دانشگاه زنجان، گروه خاک و پی، زنجان، ایران

تاریخ: دریافت ۹۲/۹/۵ **پذیرش** ۹۳/۸/۱۹

چکیده

از مشکلات مربوط به خاک‌های رسی در بستر روسازی راه‌ها تورم آن‌ها در اثر جذب رطوبت است، که باعث ناهمواری سطح روسازی و یا شکست آن می‌شود. یکی از روش‌های برخورد با مشکل تورم خاک‌های رسی در راه‌سازی، تثبیت آن‌ها با مواد افزودنی است. این مقاله به بررسی تأثیر سه نوع مادهٔ افزودنی بر تورم دو نوع خاک رس می‌پردازد. افزودنی‌های استفاده شده شامل دو نوع تثبیت‌کنندهٔ متعارف آهک و سیمان، و یک نوع تثبیت‌کنندهٔ غیرمتعارف نانوپلیمر CBR PLUS است. این مواد با درصدهای مختلف به دو نوع خاک رس، که یکی دامنهٔ خمیری کم و دیگری دامنهٔ خمیری زیاد دارد، افزوده شد و حدود اتربرگ، و تورم خاک در زمان‌های مختلف از ۲ تا ۹٦ ساعت اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد که مادهٔ CBR PLUS تأثیر بیش‌تری در کاهش تورم خاک‌های با دامنهٔ خمیری زیاد دارد و تورم را تا ۱۵ برابر کاهش می‌دهد، اما آهک و سیمان آن را ۱۰ برابر کاهش می‌دهند. در خاک رس با دامنهٔ خمیری کم تأثیر سیمان در کاهش تورم بیش از آهک و CBR PLUS است. افزودن ۷٪ سیمان تورم را ١٤برابر کاهش داده و همین مقدار آهک آن را تا ٦ برابر کاهش می‌دهد. هم‌چنین، در خاک‌های رسی با دامنه خمیری کم و زیاد، به‌ترتیب، سیمان و CBR PLUS دامنهٔ خمیری را بیش از دو ماده دیگر کاهش می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: خاک رس، سیمان، آهک، CBR PLUS، تورم، دامنهٔ خمیری

* **نویسنده مسئول** taherkhani.hasan@yahoo.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3131]

مقدمه

از لحاظ ژئوتکنیکی، به ذراتی از خاک با اندازه‌های کوچک‌تر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر، و از لحاظ کانی‌شناسی، به زنجیره‌ای از کانی‌های مشخص که به یک‌دیگر پیوند خورده‌اند رس گفته می‌شود. خاک رس از خاک‌هایی است که به‌وفور در طبیعت یافت شده و در بیش‌تر مناطق ایران، بستر روسازی راه روی خاک‌های رسی قرار می‌گیرد، که مشکلاتی را ایجاد می‌کند. وجود رطوبت در کنار خاک رس می‌تواند مقاومت آن را به‌شدت کاهش داده و باعث افزایش حجم آن شود. سطح ذرات کانی‌های رسی بار منفی دارد، که عمدتاً به‌دلیل جای‌گزینی اتم‌های سیلسیوم و آلومینیم به‌وسیله اتم‌هایی با ظرفیت کم‌تر به‌وجود می‌آیند. وجود بار منفی باعث جذب یون‌های فلزی می‌شود که این یون‌های فلزی می‌توانند مقدار زیادی آب را جذب کرده و باعث کاهش مقاومت و افزایش حجم آن‌ها شود [۱]. این یون‌ها که جاذب‌های آب نیز نامیده می‌شوند، قویاً به سطح خاک رس پیوند خورده و به‌راحتی قابل جداکردن نیست. تورم خاک‌های رسی بستر روسازی‌ها می‌تواند باعث ناهموار شدن سطح یا شکست روسازی شود. مقدار تورم کم در خاک‌های بستر نیز می‌تواند بر کیفیت رانندگی در روسازی مؤثر باشد. علاوه بر راه حل‌های طراحی روسازی متناسب با شرایط خاک بستر، تعویض خاک بستر با خاک مناسب، و یا تغییر مسیر، یکی دیگر از روش‌های مقابله با مشکلات تورم در این خاک‌ها اصلاح و بهبود خصوصیات آن‌هابا تثبیت است. تثبیت شامل فعالیت‌هایی است که در نتیجه آن‌ها مشخصات مهندسی خاک بهبود یافته و به ویژگی‌ها و مشخصات مورد نظر می‌رسد. تثبیت خاک می‌تواند باعث افزایش مقاومت، کاهش تورم، کاهش نفوذپذیری، افزایش کارایی و اثرات سودمند دیگر شود. از انواع مختلف مواد معدنی و شیمیایی به‌عنوان افزودنی برای تثبیت خاک‌ها استفاده شده است. این افزودنی‌ها به دو گروه افزودنی‌های متعارف، شامل آهک، سیمان و قیر، و گروه غیرمتعارف شامل سیلیکات‌ها، افزودنی‌های معدنی، نمک‌ها، اسیدها، آنزیم‌ها، پلیمرها و صمغ‌ها تقسیم‌بندی می‌شوند [۲]. از نظر اثرگذاری برخاک، تثبیت کننده‌های متعارف و نامتعارف به دو دسته تقسیم می‌شوند، که یک گروه از آن‌ها باکانی‌های خاک واکنش شیمیایی نشان داده و باعث تغییر در ساختار آن‌ها می‌گردند و گروه دیگر بدون واکنش با

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3131]

ذرات خاک باعث چسبیدن آن‌ها به هم‌دیگر می‌گردند [۳]، [٤]، [٥]، [٦]. مواد افزودنی استفاده شده باعث افزایش مقاومت، تغییر در خصوصیات تراکم و حساسیت به رطوبت می‌گردند. انتخاب نوع مناسب تثبیت کننده به نوع خاک، هزینه‌ها و اهداف تثبیت بستگی دارد.

آهک از موادی است که برای تثبیت خاک‌های رسی استفاده می‌شود [۷]، [۸]، [۹]. اضافه کردن آهک به خاک رس باعث به‌وجود آمدن واکنش‌هایی می‌شود که باعث بهبود ویژگی‌های خاک می‌شود. برخی از خاک‌ها با آهک واکنش نشان نمی‌دهند، که به‌دلیل فقدان سیلیکات‌ها و آلومینات‌ها در خاک است. در این موارد می‌توان از ترکیب آهک با مواد پوزولانی مثل خاکستر بادی و یا میکروسیلیس استفاده کرد [۳]، [٤]. مادهٔ دیگری که در تثبیت انواع مختلف خاک‌ها از جمله خاک رس می‌توان استفاده کرد سیمان است. سیمان مواد پوزولانی دارد و در کنار آب مادهٔ چسباننده‌ای شده و دانه‌های خاک را به هم‌دیگر می‌چسباند. با این حال، استفاده از سیمان برای تثبیت خاک‌های ریزدانه با دامنهٔ خمیری زیاد توصیه نمی‌شود و آهک نتایج بهتری را ارائه می‌دهد [۱۰]. ییلماز و جیولکوغلو با افزودن مقادیر مختلفی از گچ به خاک تورم‌پذیر نشان دادند که می‌توان از آن به‌طور مؤثر در کاهش تورم استفاده کرد [۱۱]. لعافی و بهار با افزودن ماسه به خاک رس بنتونیت نشان دادند که می‌توان تورم خاک را به مقدار چشم‌گیری کاهش داد [۱۲].

CBR PLUS، محصولی ترکیبی از مشتقات سنتزی است که لایهٔ حفاظتی روغنی روی سطح دانه‌های رس تشکیل داده و جاذب‌های آب را از بین برده و خاک رس را آب‌گریز می‌کند و حساسیت خاک را به رطوبت کاهش داده و باعث افزایش کارایی و تراکم‌پذیری می‌شود، که نتیجهٔ آن افزایش مقاومت و باربری خاک است. این ماده فقط برای تثبیت خاک‌هایی قابل استفاده است که حداقل مقداری از خاک رس داشته باشند. بنا بر این، تثبیت خاک‌های غیرچسبنده زمانی امکان‌پذیراست که با مقداری خاک رس مخلوط شوند [۱۳]. این ماده به همراه آبی که در حد رطوبت بهینه تراکم خاک باشد، مخلوط شده و به خاک اضافه می‌شود. تغییرات ایجاد شده در خاک آنی نبوده و فرایند رساندن نانوپلیمر CBR PLUS به تمام ذرات خاک رس به زمان معینی نیاز دارد که به آن دورهٔ تکامل می‌گویند، که مقدار آن از

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3131]

حدود دو تا چهار هفته است. واکنش‌پذیری خاک با این ماده و مقدار مادهٔ مورد نیاز برای تثبیت، با ارسال نمونه‌های خاک به آزمایشگاه و آنالیز خاک و انجام تست واکنش‌پذیری و آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا تعیین می‌شود. در پروژهای زیادی در سراسر دنیا از این ماده برای ساخت راه‌های کم‌هزینه استفاده شده است. تثبیت‌کنندهٔ نانو پلیمری CBR-PLUS اسید سولفونیک ارگانیک است که پایه گیاهی دارد (چغندر قند) و به تأیید سازمان‌های بین‌المللی فعال در زمینهٔ سلامتی انسان و محیط زیست رسیده است [١٤]. به‌عنوان مثال این ماده بدون ذرات معلق و گاز است، قابلیت انتشار ندارد و اشتعال‌زا نیست. هم‌چنین این ماده بدون تشعشع و پرتوزایی است [١٥].

تحقیقات مختلفی در زمینهٔ اثر مادهٔ نانوپلیمر CBR PLUS روی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک انجام شده است. طاهرخانی و همکارانش، استفاده از ماده نانوپلیمر CBR PLUS برای تثبیت مخلوط شن، ماسه و رس را برای قابل استفاده کردن آن‌ها در لایهٔ اساس و زیراساس روسازی بررسی کردند. نتیجه‌گیری آن‌ها این بود که استفاده از CBR PLUS مقاومت این خاک‌ها را به‌طور چشم‌گیری افزایش و دامنهٔ خمیری آن‌ها را کاهش می‌دهد و می‌توان از این تثبیت‌کننده برای بهبود خاک‌های نامرغوب و قابل استفاده کردن آن‌ها در لایه‌های روسازی استفاده کرد [١٦]. هنرزاد و حیدریان اثر مادهٔ نانو پلیمر CBR PLUS را بر فرسایش‌پذیری خاک رس بررسی کرده و دریافتند که اثرات مثبتی بر کاهش فرسایش‌پذیری خاک دارند [١٧].

با توجه به اهمیت کاهش تورم‌پذیری خاک‌های بستر روسازی، و مشکلات مربوط به ایمنی کار با آهک، که به‌طور متداول برای تثبیت خاک‌های رسی استفاده می‌شود، و کارایی نداشتن سیمان برای خاک‌های با تورم‌پذیری زیاد، و هم‌چنین مشکل مربوط هزینه حمل ونقل این مواد تثبیت کنندهٔ متعارف، در این پژوهش، اثر ماده‌ای تثبیت‌کننده غیرمتعارف بر تورم خاک‌های رسی بررسی شده است و با سیمان و آهک مقایسه می‌شود. بررسی ادبیات فنی نشان می‌دهد که به‌طور مشخص اثر ماده CBR PLUS بر خصوصیات تورمی خاک‌ها بررسی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3131]

نشده است. بنا بر این، در این تحقیق، اثر سه نوع ماده افزودنی آهک، سیمان و CBR PLUS بر کاهش تورم دو نوع خاک رس بررسی شده و مقایسه می‌شود.

مصالح

مصالح به‌کار رفته در این تحقیق شامل دو نوع خاک رس، آهک، سیمان و نانوپلیمر CBR PLUS است. خاک‌های استفاده شده در این تحقیق از دو منطقهٔ مختلف از استان آذربایجان شرقی تهیه شدند. خاک با دامنهٔ خمیری کم از منطقه ورزقان و خاک با دامنهٔ خمیری زیاد از محل قرضه سد در حال ساخت سهند تهیه شدند. شکل ۱ دانه‌بندی دو نوع خاک را نشان می‌دهد. هر دو خاک پس از خشک شدن، با الک شماره ۸ سرند شدند و مشخصات حدود اتربرگ و تراکم آن‌ها اندازه‌گیری شد. جدول ۱ حدود اتربرگ و خصوصیات تراکمی این خاک‌ها را نشان می‌دهد. طبقه‌بندی خاک‌ها از نظر تورم، بر اساس دامنهٔ خمیری و حد روانی (شکل ۲)، نشان‌دهندهٔ تورم‌پذیری متوسط خاک‌های با دامنهٔ خمیری کم و زیاد استفاده شده در این تحقیق است.

جدول ۱. مشخصات خاک‌های استفاده شده درتحقیق

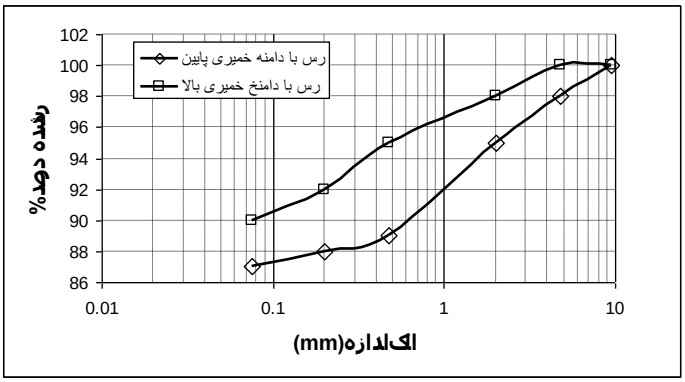
مشخصات	خاک با دامنهٔ خمیری کم	خاک با دامنهٔ خمیری زیاد
حدروانی	۳۵	٤۹
حدخمیری	۲۲	۱۷
دامنهٔ خمیری	۱۳	۳۲
درصد رطوبت بهینه ٪	۱۸/٤	۲۱/۳
وزن مخصوص خشک حداکثر (gr/cm^3)	۱/۷۹	۱/٦۲
طبقهٔ خاک در سیستم یونیفاید	CL	CH

سیمان استفاده شده در این تحقیق از نوع I-325 است که از کارخانهٔ سیمان غرب تهیه شد. جدول ۲ ترکیبات شیمیایی سیمان استفاده شده را نشان می‌دهد.

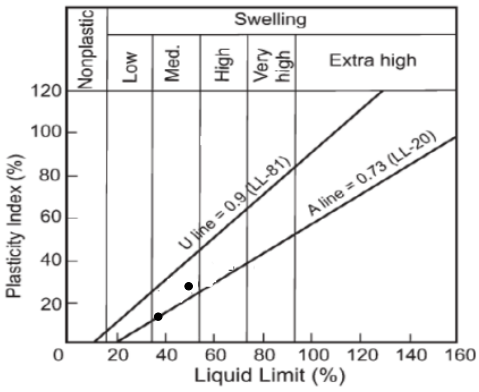
جدول ۲. ترکیبات شیمیایی سیمان تیپ I-325 کارخانهٔ سیمان غرب

ترکیب شیمیایی	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3
مقدار٪	٦۳/۱۷	۲۱/۹۰	٥/۱٤	۳/۱٦	۲/٤۸	۱/٥۱

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3131]



شکل ۱. دانه‌بندی خاک‌های استفاده شده در تحقیق



شکل ۲. طبقه‌بندی خاک‌های استفاده شده از نظر تورم‌پذیری [۱۸]

آهک استفاده شده در این تحیقق از کارخانه آهک همدان تهیه شد، که ترکیبات شیمیایی آن در جدول ۳ نشان داده شده است.

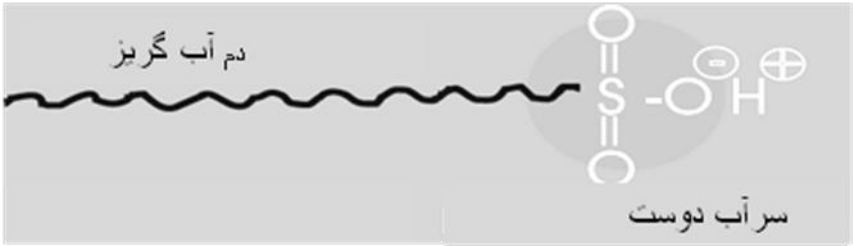
جدول ۲. آنالیزشیمیایی آهک استفاده شده

ترکیب شیمیایی	CaO	L.O.I	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Fe_2O_3
مقدار٪	۷٤/۹۲	۲۲/۸٦	۰/٥٦	۰/٦۹	۰/۳۲	۰/۱۲

تثبیت کنندهٔ CBR PLUS محلولی پلیمری است که در پژوهشگاه پلیمر ایران تهیه می‌شود. این ماده متشکل از ذراتی است که با استفاده از خاصیت نانو اعمال شده به آن‌ها به شدت آب دوست هستند. شکل ۳ نشان‌دهندهٔ مولکول CBR PLUS است. این ماده اسید

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3131]

سولفونیک ارگانیک است که پایهٔ گیاهی از چغندر قند دارد. pH این ماده ۰/۹، نقطه جوش و انجماد آن، به‌ترتیب، ۱۰۰ و۱۰- درجهٔ سیلسیوس، و چگالی نسبی آن ۰/۹٤ است. این ماده که به‌صورت مایع غلیظ به‌رنگ شکلاتی است، مولکول‌های پیچیده دارد که از دو جزء سر و دم تشکیل شده‌اند، که سرآن آب‌دوست و دم آن آب‌گریز است. برای استفاده، مقداری از این ماده در مقدار زیادی آب حل شده و با خاک مخلوط می‌گردد. این ماده برای حدود بیست سال در سراسر جهان برای کنترل گرد وخاک و بهبود عملیات تراکم استفاده شده است. در ایران نیز از این ماده در چندین پروژه در استان‌های تهران، خوزستان و آذربایجان غربی استفاده شده است. با استفاده از این ماده امکان استفاده از خاک‌های نامرغوب محل پروژه فراهم می‌شود.



شکل ۳. مولکول نانوپلیمر CBR PLUS

کارهای آزمایشگاهی

۱. برنامه آزمایش‌ها

در این تحقیق، بعد از انجام آزمایش‌های اولیه روی هر کدام از خاک‌ها، شامل دانه‌بندی، حدود اتربرگ و تراکم، که نتایج آن در بخش ۲ ارائه شد، آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم و اندازه‌گیری تورم بر خاک‌های تثبیت‌شده با مقادیر مختلف از مواد افزودنی انجام گرفت. بر اساس حدود مقادیر تجربی توصیه شده، برای سیمان و آهک، چهار درصد وزنی مختلف۱، ۳، ۵ و ۷٪ از در این تحقیق استفاده شد. برای مادهٔ افزودنی نانوپلیمر CBR PLUS، بر اساس توصیهٔ کارخانهٔ سازنده، چهار مقدار مختلف ۲۰، ۳۰، ۵۰ و٦۰ سانتی‌متر مکعب از نانوپلیمر، برای هر ۵۰۰کیلوگرم خاک، به خاک‌ها افزوده شد. این مقدار از ماده نانوپلیمر به‌تناسب به آب بهینه مورد نیاز برای تراکم نمونه افزوده شد. مقادیر استفاده شده در تحقیقات و پروژه‌های

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3131]

دیگر نیز همین محدوده‌های مقادیر را تأیید می‌کند. طاهرخانی و همکارانش مقادیر ۰/۲۵ تا ۰/۷۵٪ از وزن آب را استفاده کردند [۱٦]. آن‌ها نشان دادند که استفاده از CBR PLUS بیش از ۰/۷۵٪ از وزن آب و اختلاط با خاک تغییری در دامنهٔ خمیری خاک ایجاد نمی‌کند. یا در پروژه دیگری برای تثبیت یک خاک با دامنهٔ خمیری ۱۳ به مساحت یک مترمربع و ضخامت ۱۵ سانتی‌متر از مقدار ۰/۰۰٦ لیتر CBR PLUS استفاده شده است [۱۳].

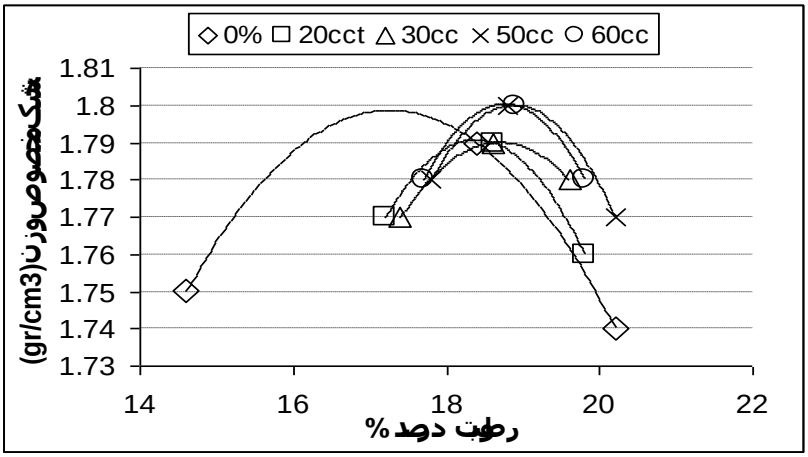
۲. آزمایش‌های حدود اتربرگ

آزمایش‌های حدود اتربرگ، شامل حد روانی و حد خمیری، بر نمونه‌های خاک تثبیت شده با مواد افزودنی با درصدهای مختلف مطابق با استاندارد ASTM D4318-87 انجام گرفت.

۳. آزمایش‌های تراکم

از آن‌جاکه نمونه‌های استفاده شده برای آزمایش‌های تورم باید با درصد رطوبت بهینه تراکم ساخته شود، لازم است که ابتدا آزمایش تراکم روی ترکیبات مختلف انجام شود. برای انجام آزمایش تراکم، درصدهای مختلف مواد افزودنی سیمان و آهک به‌صورت خشک با خاک مخلوط و سپس رطوبت مورد نیاز به مخلوط افزوده شده و به‌طور همگن مخلوط شدند. برای انجام آزمایش تراکم بر نمونه‌های تثبیت شده باCBR PLUS، با توجه به کم بودن میزان استفاده از مادهٔ افزودنی، هر بار۵۰ کیلوگرم خاک تهیه و مقادیر مورد نظر ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ٦۰cc به‌تناسب به آب لازم برای مرطوب کردن آن اضافه شده و سپس به خاک افزوده شد. مخلوط حاصل به‌مدت ۲ ساعت در کیسه پلاستیک نگه‌داری شده تا واکنش‌های اولیه صورت گیرد و با استفاده از آن‌ها آزمایش تراکم برای همهٔ ترکیبات مطابق استاندارد ASTM D698 انجام گرفت. با انجام آزمایش تراکم منحنی‌های تغییر وزن مخصوص خشک با درصد رطوبت برای درصدهای مختلف از مواد تثبیت کننده ترسیم شده و مقدار رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر تعیین شد. شکل ٤، برای مثال، منحنی‌های تراکم را برای خاک رس با دامنهٔ خمیری که با ترکیب مختلف از ماده CBR PLUS تثبیت شده‌اند را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود تغییر چندانی در حد اکثر وزن‌مخصوص خشک خاک ایجاد نمی‌شود ولی درصد رطوبت بهینه مقداری افزایش می‌یابد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3131]



شکل ٤. منحنی‌های تراکم خاک رس تثبیت شده CBR PLUS

٤. آزمایش‌های تورم

برای اندازه‌گیری مقدار تورم خاک‌های رس تثبیت‌شده با مواد افزودنی متفاوت، درصدهای مختلفی از مواد افزودنی به‌همراه رطوبت بهینه به‌دست آمده از آزمایش‌های تراکم به ٦ کیلوگرم خاک خشک شده اضافه شد و به‌طور همگن مخلوط شده و به‌مدت ۲ ساعت در کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شد تا واکنش‌های اولیه صورت گیرد. سپس در ۵ لایه داخل قالب ریخته شده و با چکش ۱۵ پوندی با ۳۰ ضربه کوبیده شدند. سپس، صفحه مشبک روی آن قرار داده شد و وزنه‌ای ٤/۵ کیلوگرمی روی آن گذاشته شد و مجموعه داخل آب قرار داده شد و تورم با گیج مخصوص بعد از ۱، ۲، ٤، ۸، ۱۲، ۲٤، ٤۸، ۷۲ و ۹٦ ساعت اندازه‌گیری شده و درصد تورم با تقسیم مقدار تورم بر ارتفاع اولیه نمونه محاسبه شد.

نتایج آزمایش‌ها

۱. نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ

با اندازه‌گیری حد خمیری و حد روانی خاک‌های تثبیت شده با درصدهای مختلف از مواد افزودنی، دامنهٔ خمیری آن‌ها محاسبه شد. شکل ۵ دامنهٔ خمیری خاک رس با دامنهٔ خمیری زیاد را که با درصدهای مختلف سیمان و آهک تثبیت شده است را نشان می‌دهد. چنان‌که

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3131]

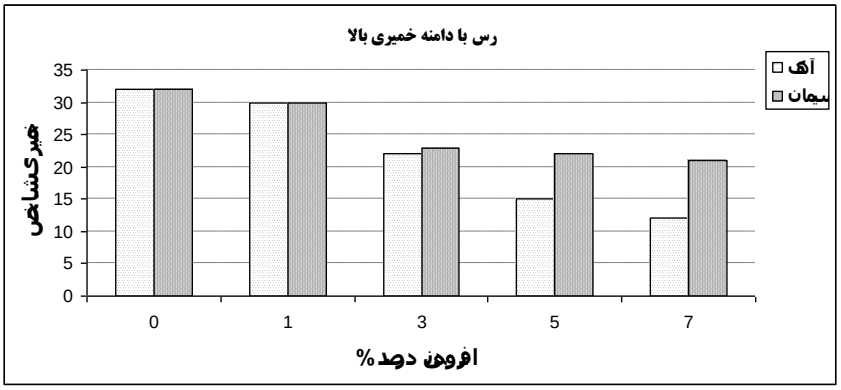
ملاحظه می‌شود، میزان دامنهٔ خمیری با افزایش درصد آهک و سیمان کاهش می‌یابد. اما، تأثیر آهک در کاهش دامنهٔ خمیری خاک رس با دامنهٔ خمیری زیاد، بیش‌تر از سیمان است، به‌طوری‌که، با افزودن ۷٪ آهک دامنهٔ خمیری خاک از ۳۲ به ۱۲ رسیده و برای سیمان به ۲۱ رسیده است. شکل ٦ دامنهٔ خمیری خاک رس با دامنهٔ خمیری کم، که با درصدهای مختلف سیمان و آهک تثبیت شده است، را نشان می‌دهد. چنان‌که ملاحظه می‌شود، افزایش سیمان و آهک دامنهٔ خمیری خاک را کاهش داده‌اند، و تأثیر سیمان در کاهش دامنهٔ خمیری بیش از آهک است. به‌طوری‌که افزودن ۷٪ سیمان، دامنهٔ خمیری را از ۱۳ به ۱، و افزودن ۷٪ آهک، دامنهٔ خمیری را از ۱۳ به ۷ کاهش داده است. شکل ۷ دامنهٔ خمیری دو نوع خاک رس که با مقادیر مختلف از ماده نانوپلیمر CBR PLUS اصلاح شده‌اند را نشان می‌دهد. چنان‌که ملاحظه می‌شود، دامنهٔ خمیری هر دو نوع خاک با افزایش مقدار نانوپلیمر کاهش می‌یابد. اما، تأثیر این ماده در کاهش دامنهٔ خمیری خاک رس با خمیری بیش‌تر بیش از آن در کاهش دامنهٔ خمیری خاک رس با خمیری کم‌تر است.

۲. نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری تورم

شکل ۸ نشان‌دهنده میزان تورم دو نوع خاک رس استفاده شده در این تحقیق، بدون استفاده از مواد تثبیت‌کننده است. چنان‌که ملاحظه می‌شود، میزان تورم خاک رس با دامنهٔ خمیری زیاد بیش از دو برابر خاک رس با دامنهٔ خمیری کم است و با افزایش زمان میزان تورم در خاک‌ها افزایش یافته است. اگر چه مقدار تورم در این خاک‌ها زیاد به‌نظر نمی‌رسد. اما، ساخت روسازی بر روی بسترهایی از این نوع خاک‌ها در مقاطع خاک‌ریزی و یا خاک‌برداری می‌تواند تورم چشم‌گیری را در روسازی ایجاد کند. برای مثال، اگر ۵ متر از خاک رس با دامنهٔ خمیری زیاد که در این پژوهش استفاده شده است، در معرض رطوبت قرار گیرد ۲سانتی‌متر متورم می‌شود که می‌تواند تأثیر زیادی در افت کیفیت رانندگی داشته باشد. جلالی و همکارانش با بررسی‌های یک روسازی ساخته شده بر خاک تورم‌پذیر در الجزایر نشان داد که تغییر شکلی عمودی به‌مقدار ۲/۱ سانتی‌متر با فشار رو به بالای ۳۵۰kPa همراه است و باعث بروز انواع ترک‌های طولی، عرضی، بلوکی و پوست سوسماری و شیار افتادگی و ناهمواری در

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3131]

سطح روسازی شده است [۱۹]. با این حال، به‌نظر می‌رسد نتایج گرفته شده در این تحقیق برای خاک‌های با قابلیت تورم بیش‌تر نیز قابل استفاده باشد.



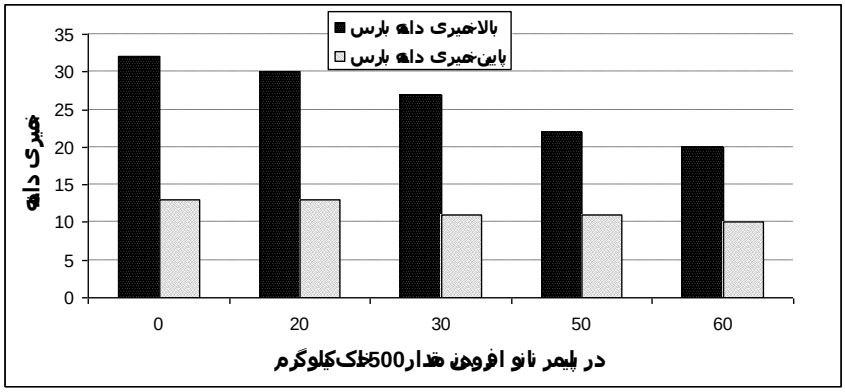
شکل ۵. دامنهٔ خمیری خاک رس با دامنهٔ خمیری زیاد تثبیت شده با درصدهای مختلف سیمان و آهک

شکل ٦. دامنهٔ خمیری خاک رس با دامنهٔ خمیری کم تثبیت شده با درصدهای مختلف سیمان و آهک

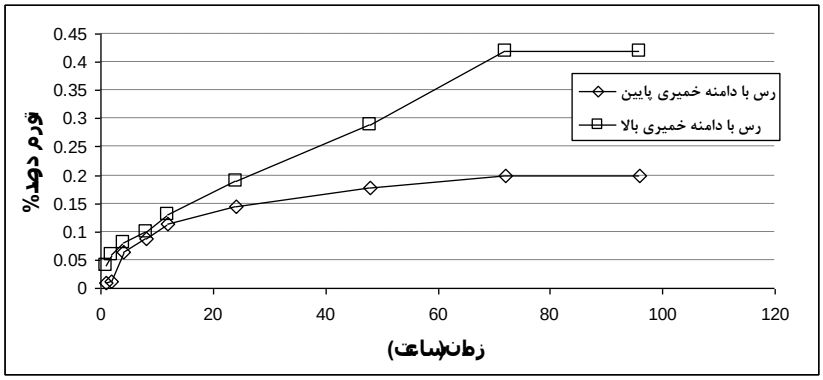
شکل ۹ تغییرات تورم خاک رس با دامنهٔ خمیری کم را، که با درصدهای مختلف آهک تثبیت شده است، نشان می‌دهد. چنان‌که ملاحظه می‌شود، درصد تورم خاک با افزایش درصد آهک کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که، با افزودن ۷٪ آهک میزان تورم تا حدود ٦ برابر نسبت به خاک رس بدون ماده افزودنی کاهش یافته است. در این شکل، هم‌چنین ملاحظه می‌شود که نرخ افزایش تورم تا ٦۸ ساعت افزایش و پس از آن تغییر چندانی نمی‌کند. دلیل کاهش تورم

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3131]

خاک با افزودن آهک اثر آنی آهک در به‌هم چسباندن سریع ذرات رس به‌هم‌دیگر در اثر تعویض کاتیون‌ها و ایجاد مواد سیمانی آلومینات و سیلیکات کلسیم در اثر واکنش پوزولانی است.



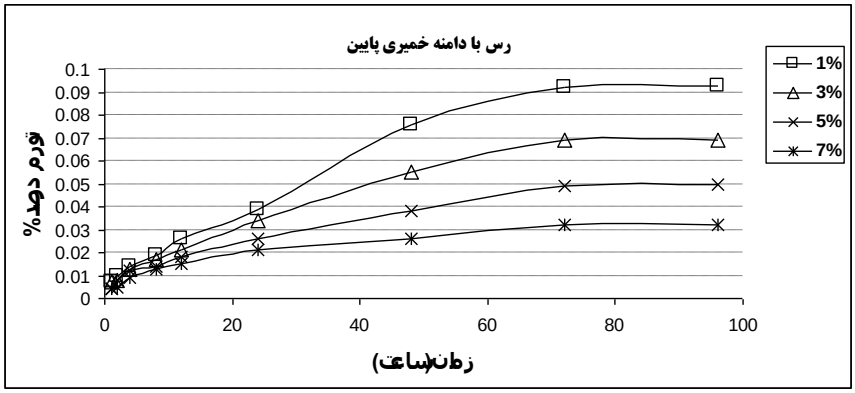
شکل ۷. دامنهٔ خمیری خاک‌های رس تثبیت شده با درصدهای مختلف نانوپلیمر CBR PLUS



شکل ۸. تغییرات میزان تورم با زمان برای خاک‌های رس بدون مواد تثبیت‌کننده

شکل ۱۰ اثر مادهٔ افزودنی سیمان را بر تورم خاک رس با دامنهٔ خمیری کم نشان می‌دهد. چنان‌که ملاحظه می‌شود، مشابه آهک، مقدار تورم با افزایش درصد سیمان کاهش می‌یابد و تغییرات در مقدار تورم بعد از ٦۸ ساعت ناچیز است. با این حال، اثر سیمان در کاهش تورم خاک رس بیش از آهک است، به‌طوری‌که با افزودن ۷ درصد سیمان مقدار تورم بعد از ۹٦ ساعت ۰/۰۱٤درصد است که نسبت به تورم خاک رس بدون مادهٔ افزودنی ۱٤ برابر کاهش و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3131]



شکل ۹. تغییرات تورم خاک با زمان در درصدهای مختلف افزودن آهک به خاک رس با دامنهٔ خمیری کم

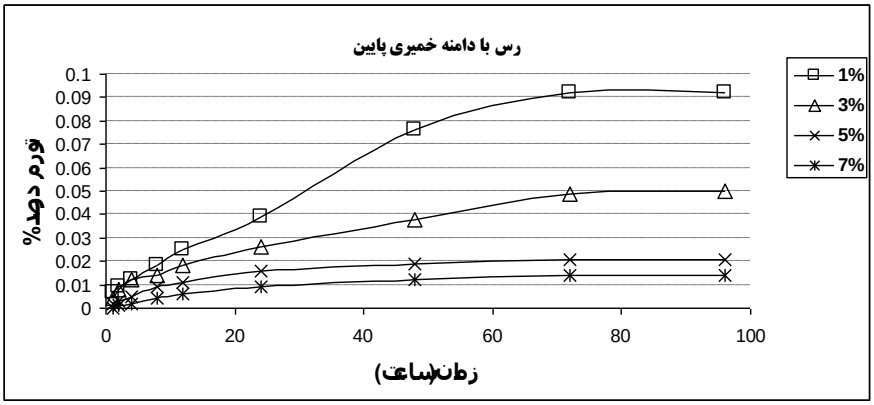
نسبت به افزودن ۷٪ آهک بیش از دو برابر کاهش را نشان می‌دهد. اثر اصلاحی سیمان از بسیاری جهات مشابه آهک است، اما، اثر واکنش سریع آهک که منجر به کاهش دامنهٔ خمیری می‌گردد بیش از سیمان است و اثر دراز مدت سیمان بیش‌تر است.

شکل ۱۱ تغییرات میزان تورم خاک رس با دامنهٔ خمیری کم که با درصدهای مختلف نانوپلیمر CBR PLUS تثبیت شده است را با زمان نشان می‌دهد. چنان‌که ملاحظه می‌شود، با افزایش مادهٔ افزودنی CBR PLUS مقدار تورم کاهش یافته است. هم‌چنین، مشابه نتایج ارائه شده در شکل ۸، ۹ و ۱۰، مقدار تورم بعد از ٦٨ ساعت تغییری نمی‌کند. با این حال، تأثیر افزودنی نانوپلیمر CBR PLUSدر کاهش تورم رس با دامنهٔ خمیری کم از دو ماده افزودنی آهک و سیمان کم‌تر است. به‌طوری‌که، با افزودن ٦٠cc به‌ازای ۵۰۰ کیلوگرم خاک، مقدار تورم خاک رس از ۰/۲درصد به ۰/۰٤٦درصد رسیده است، که ٤/۵ برابر کاهش در تورم را نشان می‌دهد. اما افزودن ۷٪ آهک و سیمان به خاک رس، به‌ترتیب، تورم خاک را ٦ و ١٤ برابر کاهش داده‌اند. اثر اصلاحی CBR PLUS در خاک‌های رسی، از آن‌جا ناشی می‌شود که این ماده حرکت‌پذیری یون و مبادله آن را کاهش داده و هم‌چنین، با حذف آب خاک را آب‌گریز کرده و در نتیجه رس کم‌تر به رطوبت حساس شده و تورم ان کاهش می‌یابد.

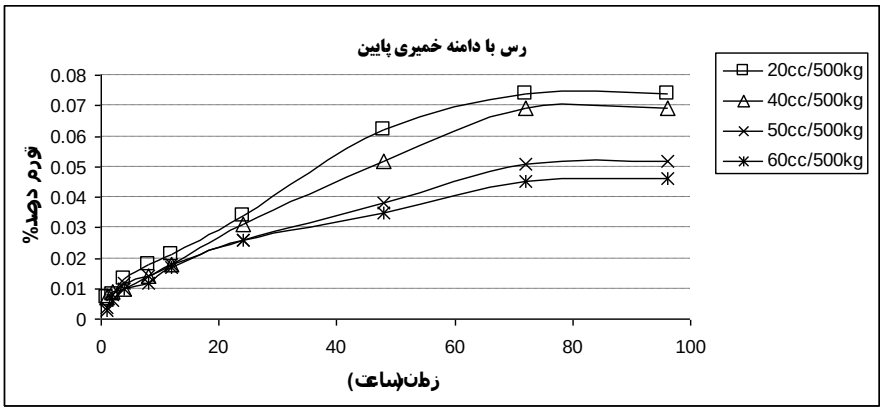
شکل ۱۲ تغییرات میزان تورم خاک رس با دامنهٔ خمیری زیاد، که با درصدهای مختلف آهک تثبیت شده است، را با زمان نشان می‌دهد. چنان‌که ملاحظه می‌شود، میزان تورم خاک با

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3131]

افزایش درصد آهک کاهش یافته است. در مقایسه با نتایج ارائه شده در شکل ۸، ملاحظه می‌شود که افزودن آهک به خاک رس با دامنهٔ خمیری زیاد اثر بیش‌تری در کاهش تورم داشته است، به‌طوری‌که میزان تورم ۰/٤۲٪ خاک رس بدون ماده افزودنی، به ۰/۰٤ درصد با ۷٪ ماده افزودنی آهک رسیده است، که ۱۰ برابر تورم را کاهش داده است. دلیل این موضوع به انجام واکنش بیش‌تر آهک با خاک با دامنهٔ خمیری زیاد ارتباط می‌یابد که مواد چسباننده بیش‌تری را تولید کرده و واکنش‌های اولیه نیز بیش‌تر است.



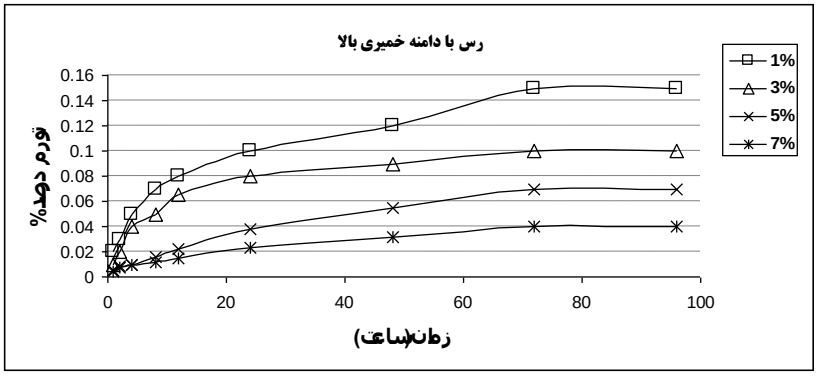
شکل ۱۰. تغییرات درصد تورم با زمان برای درصدهای مختلف افزودنی سیمان به خاک رس با دامنهٔ خمیری کم



شکل ۱۱. تغییرات درصد تورم با زمان برای درصدهای مختلف افزودنی CBR PLUS به خاک رس با دامنهٔ خمیری کم

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3131]

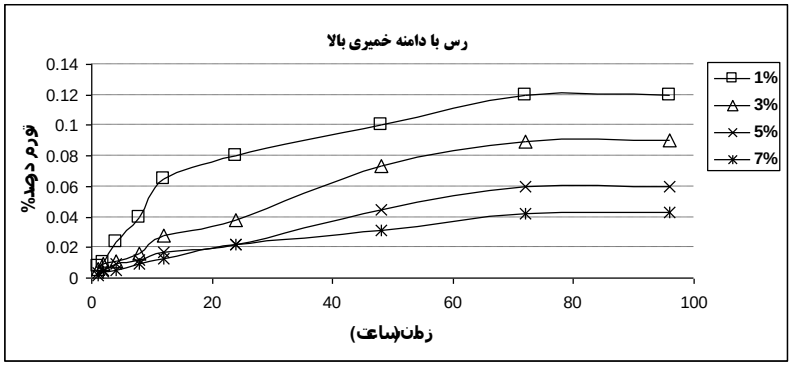
شکل ۱۳ تغییرات میزان تورم خاک رس با دامنهٔ خمیری زیاد، که با درصدهای مختلف سیمان تثبیت شده است، را با زمان نشان می‌دهد. چنان‌که ملاحظه می‌شود، میزان تورم خاک با افزایش درصد سیمان کاهش یافته است، به‌طوری‌که، با افزودن ۷٪ سیمان به خاک رس با دامنهٔ خمیری زیاد، بیش‌ترین کاهش در میزان تورم رخ داده و میزان تورم از ۰/٤۲٪ به ۰/۰٤۳٪ کاهش یافته است. این مقدار تورم کمی از مقدار تورم با ۷٪ آهک بیش‌تر است، که نشان‌دهندهٔ این است که، بر خلاف خاک رس با دامنهٔ خمیری کم، برای خاک رس با دامنهٔ خمیری زیاد، تأثیر آهک در کاهش میزان تورم بیش از سیمان است، که تأییدکنندهٔ نتایج تحقیقات ارائه شده در ادبیات موضوع است.



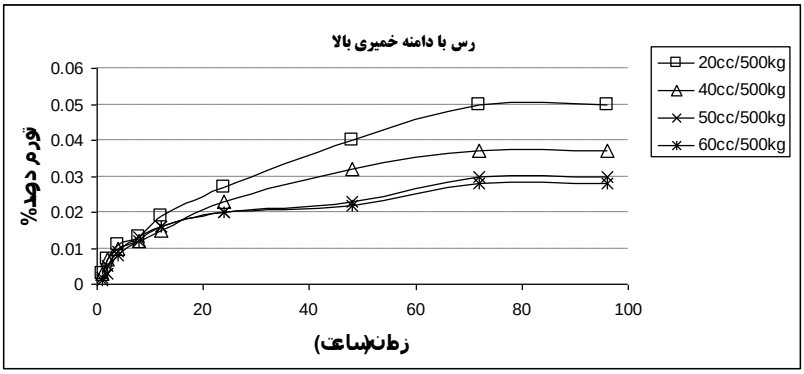
شکل۱۲. تغییرات درصد تورم با زمان برای درصدهای مختلف افزودنی آهک به خاک رس با دامنهٔ خمیری زیاد

شکل ١٤ تغییرات میزان تورم خاک رس با دامنهٔ خمیری زیاد، که با درصدهای مختلف مادهٔ نانوپلیمر CBR PLUS تثبیت شده است، را با زمان نشان می‌دهد. چنان‌که ملاحظه می‌شود، میزان تورم خاک با افزایش درصد CBR PLUS کاهش یافته است، و با افزودن ٦۰cc به‌ازای ۵۰۰ کیلوگرم خاک، میزان تورم بعد از ۹٦ ساعت به ۰/۰۲۸درصد کاهش یافته است، که نشان‌دهندهٔ ۱۵ برابر کاهش در تورم نسبت به خاک رس بدون مادهٔ افزودنی است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3131]



شکل ۱۳. تغییرات درصد تورم با زمان برای درصدهای مختلف افزودنی سیمان به خاک رس با دامنهٔ خمیری زیاد



شکل ١٤. تغییرات درصد تورم با زمان برای درصدهای مختلف افزودنی CBR PLUS به خاک رس با دامنهٔ خمیری زیاد

مقایسه اقتصادی مواد تثبیت‌کننده

یکی از معیارهای مهم ارزیابی مواد تثبیت‌کننده هزینهٔ اجرای تثبیت با این مواد است. به‌منظور ارزیابی اقتصادی مواد به‌کار رفته در این تحقیق، هزینهٔ لازم برای کاهش تورم هر تن خاک به مقدار مشخص محاسبه می‌شود. برای مثال، برای کاهش تورم خاک رس با دامنهٔ خمیری زیاداز مقدار ٠/٤٪ به ٠/٠٤٪ به مقدار ٧٪ از وزن خشک خاک به سیمان و آهک و ٤٠ سانتی مترمکعب از مادهٔ CBR PLUS برای هر٥٠٠ کیلوگرم خاک لازم است. بنا بر این، برای کاهش تورم هر تن خاک به مقدار مذکور حدود ٧٠ کیلوگرم آهک و سیمان و ٨٠

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3131]

سانتی‌مترمکعب CBR PLUS لازم است. با توجه به قیمت هر کیلوگرم آهک و سیمان در سال ۱۳۹۲، به‌ترتیب، مقدار حدود ۵۰ و ۱۵۰ تومان و هر سانتی‌مترمکعب CBR PLUS به مقدار ۳۰۰ تومان، هزینهٔ کاهش تورم هر تن خاک با آهک، سیمان و CBR PLUS، به‌ترتیب، ۳۵۰۰، ۱۰۵۰۰ و ۲٤۰۰۰تومان است، که نشان‌دهندهٔ اقتصادی‌تر بودن آهک است. محاسبات مشابه برای سایر مقادیر کاهش مقدار تورم برای هر دو خاک نیز نشان‌دهندهٔ اقتصادی‌تر بودن آهک است. اما، در هر یک از خاک‌های بررسی شده، فقط یکی از مواد هستند که می‌توانند مقدار تورم را تا سطح معینی کاهش دهند. برای مثال، برای خاک با دامنهٔ خمیری کم، تنها سیمان می‌تواند مقدار تورم را تا ۰/۰۱۵٪ کاهش دهد، و برای خاک با دامنهٔ خمیری زیاد، تنها با CBR PLUS می‌توان مقدار تورم را به کم‌تر از ۰۳/٪ رساند. بنا بر این، اگر هدف رساندن مقدا تورم به کم‌تر از حد معینی باشد تنها یک گزینه وجود دارد. از طرف دیگر، قیمت زیاد مادهٔ CBR PLUS به‌دلیل وارداتی بودن این محصول است و در صورت تولید آن در داخل کشور می‌توان با قیمت کم‌تری آن را تهیه کرد و هزینهٔ اجرای تثبیت را کاهش داد. ضمناً، در این بررسی اثرات زیست محیطی آهک و سیمان و هزینه حمل ونقل آن‌ها در نظر گرفته نشده است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به دو نوع خاک رس، یکی با دامنهٔ خمیری کم، و دیگری با دامنهٔ خمیری زیاد درصدهای مختلفی از سه نوع مادهٔ تثبیت‌کننده، شامل سیمان، آهک و نانوپلیمر CBR PLUS اضافه شده و حدود اتربرگ و تورم آن‌ها اندازه‌گیری شد. به‌طور خلاصه، در محدودهٔ مقادیر استفاده شده از مواد افزودنی در این تحقیق، نتایج را می‌توان بدین‌صورت بیان کرد:

- اثر آهک در کاهش دامنهٔ خمیری خاک رس با دامنهٔ خمیری زیاد بیش از سیمان و ماده نانوپلیمر CBR PLUS است.
- اثر سیمان در کاهش دامنهٔ خمیری خاک رس با دامنهٔ خمیری کم بیش از آهک و CBR PLUS است.
- اثر سیمان در کاهش تورم خاک رس با دامنهٔ خمیری کم بیش‌تر از دو ماده دیگر است، به‌طوری‌که، با افزایش ۷٪ سیمان، تورم تا ١٤ برابر کاهش می‌یابد. اما، با افزودن ۷٪ آهک،

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3131]

تورم ٦ برابر و با افزودن ٦٠سانتی‌مترمکعب از CBR PLUS، به‌ازای هر ۵۰۰ کیلورم خاک، تورم ٤/۵ برابر کاهش می‌یابد.

- اثر CBR PLUS در کاهش تورم خاک رس با دامنهٔ خمیری زیاد بیش از سیمان و آهک است، به‌طوری‌که، با افزایش ٦٠ سانتی‌مترمکعب از CBR PLUS، به‌ازای هر ۵۰۰ کیلوگرم خاک، تورم تا ۱۵ برابر کاهش می‌یابد. اما، با افزودن ۷٪ آهک و سیمان، تورم تقریبا ۱۰ برابر کاهش می‌یابد.
- برای همهٔ مواد افزودنی و خاک‌های استفاده شده در این تحقیق، میزان تورم بعد از ٦۸ ساعت افزایش ناچیزی دارد.
- گزینهٔ اقتصادی در مواد تثبیت‌کننده به‌مقدار کاهش تورم مورد نظر بستگی دارد. در خاک‌های با دامنهٔ خمیری کم، برای کاهش سطح تورم تا ۰/۰۳٪ آهک اقتصادی‌تر از بقیه مواد تثبیت کننده است و برای کم‌تر از ۰/۰۳٪ سیمان مناسب است. برای خاک‌های با دامنهٔ خمیری زیاد، برای کاهش تورم تا ۰٤/.٪ آهک اقتصادی است و برای کم‌تر از آن CBR PLUS مناسب است. استفاده از آهک در کاهش تورم خاک‌های بررسی شده در این تحقیق اقتصادی‌تر از سیمان و CBR PLUS است.
- از دیگر معیارهای ارزیابی مواد تثبیت‌کننده دوام مصالح تثبیت شده تحت شرایط بهره‌برداری و دوام کیفیت آن در طول زمان است. این موضوع در این تحقیق بررسی نشده و توصیه می‌شود که بیش‌تر بررسی شود.

منابع

1. Petry T., Little D. "Review of stabilization of Clays and Expansive Soils in Pavements and Lightly Loaded Structures-History, Practice, and Future", Journal of Materials in Civil Engineering, 14(6) (2002) 447-460.
2. Tingle J. S., "Emulsion polymers for soil stabilization", in Proceedings of the FAA Worldwide Airport Technology Transfer conference, Atlantic city, New jersey, USA (2004).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3131]

3. Mishra E. N. K., "Strength characteristics of clays subgrade soil stabilization with fly-ash and lime for road works", Indian Geotechnical Journal, Sep. 2012, Vol. (4), Issue 7 (2012) 206-211.

4. Beeghly J. H., "Recent Experiences with Lime-Fly Ash Stabilization of Pavement Subgrade Soils, Base, and Recycled Asphalt", Proceedings of the International Ash Utilization Sumposium, University of Kentucky, Lexington, US (2003).

5. Sharma N. K., Swain S. K., Sahoo U. C., "Stabilization of a clayey soil with fly-ash and lime: a micro level investigation", Journal of Geotechnical and Geological Engineering, June (2012) 1197-1205.

6. Liongso P. E., "Field evaluation of stabilization in swelling clay for concrete pavement", International conference on sustainable design and construction, ASCE Texas section (Fall 2012).

7. Puppala A. J., Mohammad L. N., Allen A., "Engineering behavior of lime-treated Louisiana subgrade soil", Transportation Research Record, No. 1546, (1996).

۸. کاوسی ا.، هاشمیان ل.، *بررسی تثبیت خاک بااستفاده ازآهک درفرودگاه پارس*، مجموعه مقالات نخستین کنفرانس به‌سازی زمین، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران (۱۳۸۰).

۹. پژوهشکده حمل ونقل وزارت راه وترابری، *کاربردCBR غیراشباع درطراحی روسازی*، تهران، انتشارات پژوهشکده حمل ونقل وزارت راه وترابری (۱۳۸٦).

10. Mallik R. B., El-Korchi T., "Pavement engineering: principle and practice", second Edition, CRS Press, Newyork, US (2009).

11. Yilmaz I., Civelekoglu B., "Gypsum: an additive for stabilization of swelling clay soils", Journal of applied clay science, Vol. 44, 1-2 (2009) 166-172.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3131]

12. Louafi B., Bahar R., "Sand: an additive for stabilization of swelling clay soils", International Journal of Geoscience, Vol. 13, No. 4 (2012) 719-725.

13. Ziaie Moayed R., Allahyari F., "Determination of required ion exchange solution for stabilizing clayey soil with various PI", World Academy of Science, Engineering and Technology, 61 (2012) 1098-1102.

14. CBR PLUS Effective soil stabilization & dust control for roads, "Technical information on soil stabilization using liquid chemical soil stabilizers", CBR PLUS North American Inc. #2-5136 Imperial Street Bumaby. BC V5J 1E2, www.cbrplus.com .

15. CBR PLUS Effective soil stabilization & dust control for roads, "Report on the various toxicity tests and shemical analysis of the CBR PLUS anionic synthetic thio compound", CBR PLUS North American Inc. #2-5136 Imperial Street Bumaby. BC V5J 1E2, www.cbrplus.com.

۱٦. طاهرخانی ح.، هاشمی ع.، شریفی و. ، *بررسی استفاده از مواد تثبیت کننده نانوپلیمر CBR PLUS برای ساخت لایه‌های روسازی راه*، فصلنامهٔ مهندسی حمل ونقل، سال سوم، شماره چهارم، (تابستان ۱۳۹۲) ۳٤۷-۳۳۹.

۱۷. هنرزاد ه.، حیدریان، ه.، *بررسی تأثیر محصولی از فناوری نانو (CBR+) بر میزان فرسایش‌پذیری خاک‌های رسی*، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه زاهدان، (اردیبهشت۱۳۹۲).

18. Dakshanamanhy V., Raman V., "A simple method of identifying an expansive soil", Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Soils and Foundations, Vol. 13 (1973) 97-104.

19. Djellali A., Ounis A., Saghafi B., "Behaviour of flexible pavements on expansive soils", International Journal of Transportation Engineering, Vol. 1, No. 1, (Winter 2012) 1-14.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3131]