تأثیر تثبیت با آهک و پلیمر و تسلیح با الیاف پلیمری بر رفتار تغییر حجمی خاک‌های رسی شور

رضا ضیایی‌مؤید، مهرداد هراتیان: دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، دانشکده فنی مهندسی

تاریخ: دریافت ۸۹/۲/٤ **پذیرش** ۸۹/۱۰/۱۵

چکیده

خاک‌های شور از جمله خاک‌های مسئله‌دار هستند که مشکلات فراوانی را در پروژه‌های عمرانی به‌وجود می‌آورند. نشست و تورم از جمله موضوع‌های بحرانی در خاک‌های رسی شورند. در این تحقیق رفتار تغییر حجمی- تحکیمی این نوع خاک‌ها، همچنین تأثیر تثبیت و تسلیح بر آن بررسی شده است. محل بررسی شده در این تحقیق بزرگراه امیرکبیر واقع در بین شهرهای قم و کاشان است. پس از اخذ نمونه و آزمایش‌های مقدماتی نظیر دانه‌بندی، حدود اتربرگ و تراکم، ابتدا خاک محل تحت آزمایش‌های پتانسیل تورم و تحکیم قرار گرفت و پارامترهای تغییر حجمی خاک در حالت دست‌خورده و دست‌نخورده به‌دست آمد و مشخص شد که نمونهٔ دست‌خوردهٔ خاک مذکور دارای پتانسیل تورمی چشم‌گیری است، سپس نمونه‌های تثبیت شده خاک با درصدها و زمان‌های عمل‌آوری مختلف آهک و پلیمر رزین- اپوکسی، همچنین نمونه‌های تسلیح شده با درصدهای متفاوت الیاف پلیمری تحت آزمایش‌های پتانسیل تورم و تحکیم قرار گرفته و نتایج به‌دست آمده در دو حالت نمونهٔ تثبیت نشده و نمونهٔ تثبیت شده مقایسه شدند. با توجه به نتایج آزمایش‌های تحکیم و پتانسیل تورم، مشاهده می‌شود که دست‌خوردگی به شدت بر روی رفتار تغییر حجمی خاک تأثیر می‌گذارد. نتایج به‌دست آمده از آزمایش پتانسیل تورم حاکی از کاهش پتانسیل تورم در نمونه‌های تثبیت شده نسبت به نمونه‌های تثبیت نشده است.

واژه‌های کلیدی: خاک‌رس شور، رفتار تغییرحجمی، تورم، تحکیم، تثبیت، آهک، پلیمر رزین اپوکسی، الیاف پلیمری

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]

مقدمه

تحقیقات گوناگونی برای تعیین رفتارهای ژئوتکنیکی خاک‌های شور در سراسر دنیا انجام شده است. خاک‌های سبخا[۱] ازجمله خاک‌های شوری هستند که تحقیقات نسبتاً زیادی روی آن انجام شده است، از خصوصیات این خاک می‌توان به تراکم‌پذیری زیاد و ظرفیت باربری کم این خاک اشاره کرد[۱]. از جمله معضلات خاک‌های رسی شور قابلیت تورم این خاک‌ها است که معضل عمومی در سراسر دنیا است. با توجه به توسعهٔ سریع شهرسازی و همچنین احداث شبکهٔ راه‌ها و بزرگ‌راه‌ها بین شهرها، مهندسان ناچار به ساخت پروژه‌های مهمی بر روی چنین خاک‌هایی هستند. برای اولین بار در سال ۱۹۳۸ ادارهٔ به‌سازی زمین ایالات متحده مسئله تورم در خاک را از دیدگاه مکانیک خاک شناسایی کرد، از آن زمان به بعد مهندسان بر این نکته واقف شدند که دلایل خرابی در ساختمان‌ها می‌تواند چیزی غیر از نشست در سازه‌ها باشد [۲]. خطرهای ناشی از خاک‌های انبساطی در سازه‌های‌عمرانی(ساختمان‌ها، راه‌ها، روسازی‌ها، پی‌های دالی سبک و سایر سازه‌های سبک به لحاظ باربری) در سراسر دنیا به اثبات رسیده است [۳]. خسارت تخمینی ناشی از این خاک‌ها به سازه‌ها سالانه بالغ بر میلیاردها دلار است [٤]، [٥]. با توجه به مشکلات خاک‌های شور تحقیقات اندکی در زمینه تثبیت، تسلیح و یا اصلاح این نوع خاک‌ها انجام گرفته است. در مورد خاک سبخا تأثیر ژئوتکستایل و سیمان با هدف افزایش ظرفیت باربری روسازی‌های واقع بر این خاک‌ها بررسی شد [٦]. با توجه به این‌که بخش وسیعی از کشور ایران را خاک‌های رسی شور فرا گرفته و با توجه به مشکلات بیان شده برای این خاک‌ها، نظر به این‌که برای اجرای برخی پروژه‌ها به‌ویژه پروژه‌های راه‌سازی، به ناچار برخی سازه‌ها بر روی این خاک‌ها احداث می‌شود، لذا، در این تحقیق سعی شد تا اولاً به بررسی خصوصیات تغییر حجمی و سپس بهبود مشخصات تورمی این خاک‌ها به‌وسیله تثبیت و تسلیح پرداخته شود.

در این مقاله به مشکل به وجود آمده در کیلومتر ٥٤ بزرگ‌راه امیرکبیر واقع بین شهرهای قم و کاشان پرداخته می‌شود. در این قسمت از بزرگ‌راه سطح جاده دچار ناهمواری (به‌صورت

۱. Sabkha soils

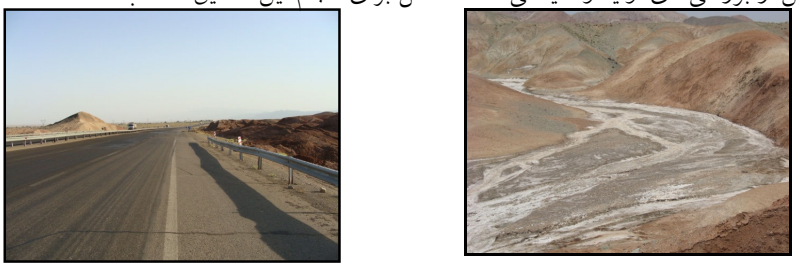
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]

موج) شده که با بررسی‌های میدانی به‌عمل آمده مشخص شد که در آن منطقه بافت زمین از خاک‌های رسی شور تشکیل شده و اتفاقاً در محل عبور روان آب‌های سطحی، جاده دچار مشکل تورم شده است.

مختصات و موقعیت محل

محل بررسی شده در این تحقیق، محلی واقع در کیلومتر ٥٤ بزرگ‌راه امیرکبیر بین شهرهای قم و کاشان است. در این قسمت از بزرگ‌راه، سطح جاده دچار ناهمواری‌هایی به‌صورت موج مانند شده است. با توجه به چندین بار ترمیم روسازی جاده مجدداً مشاهده می‌شود که پس از گذشت چند ماه و با آغاز فصل بهار سطح جاده دچار ناهمواری می‌شود. با بررسی‌های به‌عمل آمده مشخص شد که در آن قسمت از بزرگ‌راه جاده بر روی توده‌ای از خاک‌های رسی شور واقع شده که اتفاقاً محل عبور جریان‌های روان آب‌های فصلی نیز است. در شکل ۱ موقعیت بزرگ‌راه امیرکبیر بین تپه‌های نمکی در منطقهٔ پژوهش مشاهده می‌شود. پس از بررسی‌های اولیه و میدانی، خاک محل برای انجام این تحقیق انتخاب شد.



شکل ۱. موقعیت بزرگ‌راه امیرکبیر بین تپه‌های نمکی در منطقه بررسی شده

نمونه‌برداری و آزمایش‌های در محل

پس از انجام بررسی‌های اولیه و پژوهش‌های میدانی و انتخاب محل (سایت)، با حفر ۲ گمانهٔ دستی[1] به عمق ۲/۵ متر اقدام به **نمونه‌برداری** از خاک به‌صورت دست نخورده و دست‌خورده و همچنین انجام آزمایش‌هایی نظیر دانسیته در محل و SPT شد که نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است، سپس آزمایش‌های مقدماتی نظیر دانه‌بندی،

۱.Test pit

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]

هیدرومتری، حدود اتربرگ و آزمایش‌های شیمی خاک انجام شد. سایر خصوصیات خاک بررسی شده در جدول ۲ و منحنی دانه‌بندی خاک بررسی شده در شکل ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. نتایج آزمایش‌های در محل

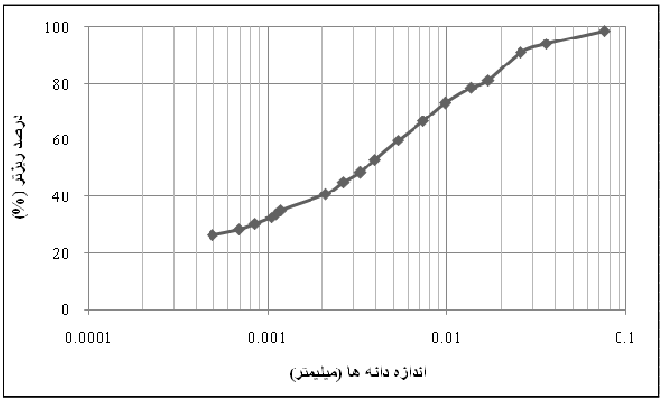
شمارهٔ گمانه	N_{SPT}	درصد رطوبت (%)	دانسیتهٔ خشک (γ_{dry}) gr/cm^3	دانسیتهٔ تر (γ_{wet}) gr/cm^3
۱	۳۷	۱۶/۶	۱/۸۳	۲/۱۱
۲	۴۱	۱۶/۳	۱/۸۸	۲/۱۵

جدول ۲. مشخصات خاک بررسی شده

Gs	LL (%)	PL (%)	PI (%)	طبقه‌بندی USCS	PH	EC* Ds/m	TDS** (%)
۲/۷۳	۴۱	۲۲	۱۹	CL	۷/۸۰	۸۳/۳۸	۸/۰۲

* Electrical Conductivity

** Total Dissolved Salt



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی خاک بررسی شده

با توجه به هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده به میزان ۸۳/۳۸ دسی‌زیمنس بر متر و همچنین درصد کل نمک محلول در عصارG ۱۰/۱ خاک و آب به میزان ۸/۰۲ درصد، که از روش‌های طبقه‌بندی خاک‌های شور و قلیایی هستند، خاک بررسی شده در طبقه‌بندی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]

خاک‌های بسیار شور قرار گرفته است[۷] و همچنین با نتایج به‌دست آمده از آزمایش دانه‌بندی و حدود اتربرگ، خاک بررسی شده طبق سیستم طبقه‌بندی متحد در گروه CL (رس با خاصیت خمیری کم) قرار می‌گیرد.

مشخصات تثبیت کننده‌ها و تسلیح کنندG مورد استفاده

از میان تثبیت کننده‌های سنتی آهک به دلیل این‌که در تحقیقات گذشته به‌عنوان یک تثبیت کنندهٔ مناسب برای تثبیت خاک‌های شور و رسی متورم شونده نام برده شده است [۸]، [۹]، [۱۰]، [۱۱]، [۱۲] و از میان تثبیت کننده‌های غیرسنتی دسته پلیمرها به دلیل شناخته شده‌تر و در دسترس بودن در کشور انتخاب شده است. تسلیح کنندهٔ مورد استفاده در این تحقیق نیز الیاف پلیمری بوده که به دلیل سازگاری این الیاف با خاک‌های رسی و همچنین در دسترس بودن در کشور، این تسلیح کننده انتخاب شد [۱۳].

۱. آهک

در این تحقیق برای تثبیت از آهک هیدراته استفاده شده است. گرچه آهک زنده به علت درصد بالای Cao تأثیر بیش‌تری در تثبیت و اصلاح خاک نسبت به آهک هیدرات‌ها شکفته دارد ولی چون کار کردن با آهک هیدراته ایمن‌تر بوده و کاربرد آن نیز در صنعت مرسوم است، این نوع آهک انتخاب گردید. آهک استفاده شده در این تحقیق از نوع آهک هیدراته با pH برابر ۱۲/۵۲ و وزن مخصوص ۵۶۰ کیلوگرم در متر مکعب و چگالی ذرات ۲/۲۳ که بالغ بر ۹۰ درصد $Ca(OH)_2$ است. در این تحقیق نیز با توجه به نتایج تحقیق‌های مشابه و شرایط ویژهٔ خاک و همچنین احتمال اثر بخش بودن درصدهای پایین‌تر، محدودهٔ ۲ تا ٦ درصد (۲، ٤ و ٦ ٪) برای انجام آزمایش‌ها انتخاب شده است.

۲. پلیمر

پلیمری که در این تحقیق برای تثبیت خاک بررسی شده به‌کار رفته است از دستهٔ پلیمرهای رزین اپوکسی است. رزین‌های اپوکسی با نام رزین‌های اپوکسید نیز شناخته می‌شوند. ساختار شیمیایی رزین اپوکسی شامل دو بخش اپوکسی و غیر اپوکسی است. رزین

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]

اپوکسی استفاده شده در این تحقیق رزین اپوکسی بیسفنول-آ[۱] است که محصول واکنش بیسفنول-آ و اپی کلروهیدرین[۲] است. پلیمر رزین اپوکسی یک پلیمر غیر پایه آبی است به این معنی که این پلیمر قابلیت انحلال در آب را ندارد و این امر یکی از دلایل مهم انتخاب این پلیمر به‌عنوان تثبیت کننده در این تحقیق است، زیرا با توجه به مشکل خاک‌های شور که با افت شدید مقاومت هنگام تر شدن مواجه می‌شوند، امکان استفاده از پلیمرهای پایه آبی در این تحقیق وجود ندارد.

در این تحقیق از پلی‌آمید به‌عنوان سخت‌کننده استفاده شد که با توجه به ریزدانه بودن خاک و همچنین تجارب گذشته[۱٤]، نسبت ۱ به ۰/۹ پلیمر به سخت کننده انتخاب شد. در جدول ۳ بعضی از مشخصات پلیمر رزین اپوکسی استفاده شده در این تحقیق ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات پلیمر رزین اپوکسی مورد استفاده [۱٤]

ترکیب شیمیایی	$C_3H_5O\ [C_{18}H_{19}O_3]_nC_{18}H_{19}O_3$
چگالی	۲/۲ گرم بر سانتیمتر مکعب
مدول الاستیسیته	۲۰ گیگاپاسکال

برای دست‌یابی به مقادیر مناسب تثبیت کننده درصدهای وزنی مختلف پلیمر رزین اپوکسی به خاک اضافه شد، و نتایج بررسی شد. با توجه به تحقیقات گذشته [۱٤] و نتایج به‌دست آمده مشخص شد که امکان استفاده از این پلیمر در درصدهای وزنی پایین وجود ندارد. نتایج نشان دادند که پلیمر در درصدهای وزنی کم‌تر از ٤ درصد توانایی نگه‌داشتن دانه‌های خاک را در نمونه‌های ساخته شده ندارد. بنا بر این درصدهای وزنی بالاتر از ٤ (٤، ٥، ۷و ۹ درصد) برای تثبیت خاک انتخاب شد.

۳. الیاف پلیمری

الیاف مورد استفاده در این تحقیق از دسته الیاف با پایه شیمیایی پلیمر پلی پروپیلن است. با توجه به تحقیقات گذشته در زمینه تسلیح خاک با الیاف پلیمری، استفاده از این الیاف جهت بهبود خصوصیات مکانیکی خاک یکی از اقتصادی‌ترین مصالح مسلح کننده است[15]. شکل ظاهری این الیاف در شکل ۳ نشان داده شده است.

۱. Resin Epoxy Bisphenol-A ۲. Epichlorohydrin

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]



شکل ۳. الیاف پلیمری مورد استفاده در این تحقیق

در جدول ٤ مشخصات الیاف پلیمری استفاده شده در این تحقیق ارائه شده است. در این تحقیق با توجه به شرایط ویژه خاک و همچنین احتمال اثر بخش بودن درصدهای پایین‌تر بر اساس نتایج تحقیقات گذشته [۱۵] محدودهٔ ۰/۱ تا ۰/٤ درصد (۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/٤ درصد) برای انجام آزمایش‌ها انتخاب شده است.

جدول ٤. مشخصات الیاف پلیمری مورد استفاده در این تحقیق [16]

شکل ظاهری	پایه شیمیایی	وزن مخصوص	طول	قطر	مقاومت کششی	نقطه ذوب
الیاف سفید رنگ	پلیمر پلی پروپیلن	۹۰۰Kg/cm³	۱٤ میلی‌متر	۲۰ میکرون	N/mm² ۳۵۰	۱٦۰ °C

برنامهٔ آزمایشگاهی

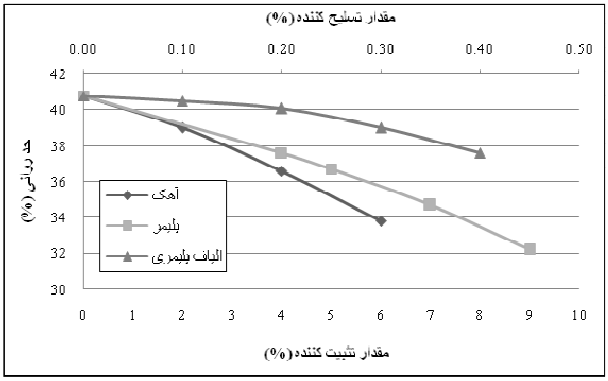
در پژوهش حاضر، خصوصیات تغییر حجمی خاک در حالت دست‌خورده، دست‌نخورده، نمونه‌های تثبیت شده با آهک و پلیمر رزین اپوکسی و همچنین نمونه‌های تسلیح شده با الیاف پلیمری با یک‌دیگر مقایسه می‌شوند. پس از انجام آزمایش تراکم بر روی خاک طبیعی، این آزمایش بر روی نمونه‌های تثبیت شده با ۲، ٤، ٦ درصد آهک و ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/٤ الیاف پلیمری انجام شد و حداکثر دانسیتهٔ خشک و رطوبت بهینه نمونه‌ها به‌دست آمد. از این مقادیر برای ساخت نمونه‌های دست‌خورده استفاده می‌شود. برنامهٔ آزمایشگاهی این تحقیق را می‌توان به چهار بخش اصلی آزمایش‌های تعیین‌حدود اتربرگ، آزمایش‌های‌تراکم، آزمایش‌های پتانسیل تورم و آزمایش‌های تحکیم تقسیم کرد:

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]

۱. آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ

در این بخش نتایج آزمایش‌های حد روانی و خمیری انجام شده برای خاک تثبیت شده با آهک و پلیمر و همچنین خاک تسلیح شده با الیاف پلیمری ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که هر دو تثبیت کننده (آهک و پلیمر) و همچنین الیاف پلیمری استفاده شده در این تحقیق باعث کاهش حد روانی خاک می‌شوند. این مطلب در شکل ٤ نشان داده شده است. چنان‌که در این شکل مشاهده می‌شود افزودن آهک و پلیمر به خاک بیش از افزودن الیاف پلیمری به آن موجب کاهش حد روانی مخلوط می‌شود. علت اصلی کاهش حد روانی در نمونه‌های تثبیت شده با آهک را می‌توان واکنش تبادل یونی ناشی از ترکیب خاک با آهک دانست. این واکنش‌ها باعث کاهش خصوصیات خمیری خاک می‌شوند که در نهایت افزایش کارآیی خاک را نتیجه می‌دهند. علت کاهش حد روانی در نمونه‌های تثبیت شده با پلیمر نیز می‌تواند به دلیل واکنش‌های شیمیایی انجام شده بین خاک و پلیمر و در پی آن سیمانتاسیون به‌وجود آمده در نمونه‌های تثبیت شده باشد.

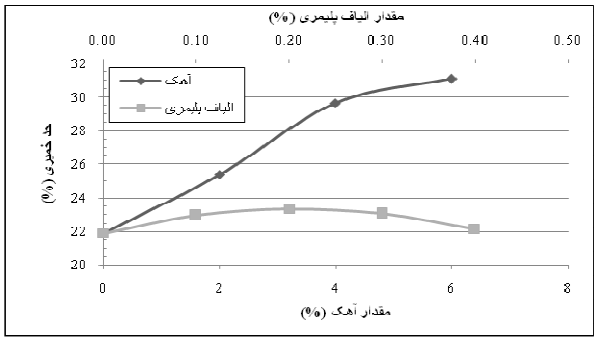


شکل ٤. تأثیر افزودن تثبیت کننده و تسلیح کننده بر روی حد روانی خاک

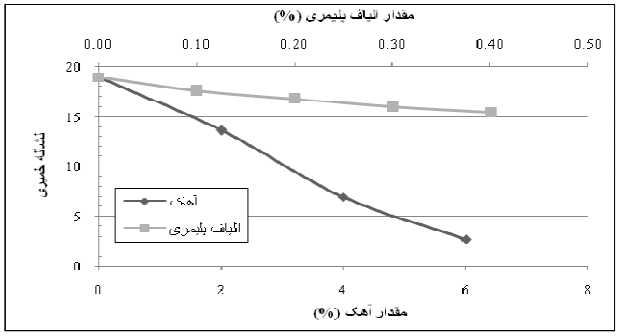
امکان آزمایش تعیین حد خمیری برای مخلوط خاک و پلیمر به علت عدم امکان فتیله کردن مخلوط خاک و تثبیت کننده وجود ندارد. نتیجهٔ آزمایش تعیین حد خمیری بر روی مخلوط خاک با آهک نشان می‌دهد که افزودن آهک باعث افزایش حد خمیری خاک شده است. چنان‌که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، تغییرات حد خمیری در مخلوط خاک با الیاف پلیمری در مقایسه با مخلوط خاک و آهک بسیار اندک بوده و بدین‌ترتیب است که تا ۰/۲

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]

درصد افزایش و از ۰/۲ درصد تا ۰/٤ درصد کاهش می‌یابد. نشانهٔ خمیری در هر دو مخلوط خاک با آهک و الیاف پلیمری کاهش یافته است. چنان‌که در شکل ٦ مشاهده می‌شود نرخ کاهش نشانهٔ خمیری در مخلوط خاک و آهک بیش از مخلوط خاک و الیاف پلیمری است.



شکل ۵. تأثیر افزودن آهک و الیاف پلیمری بر روی حد خمیری خاک



شکل ٦. تأثیر افزودن آهک و الیاف پلیمری بر روی نشانهٔ خمیری خاک

۲. آزمایش‌های تراکم

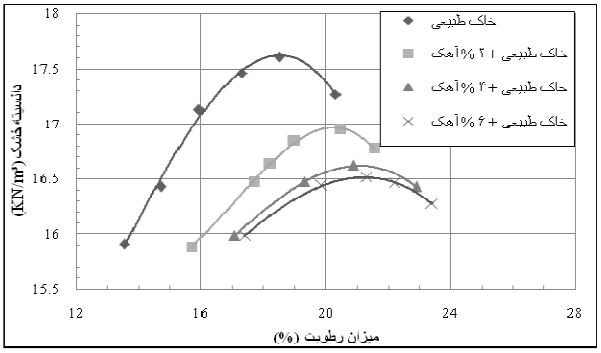
در این تحقیق آزمایش تراکم به روش پراکتور استاندارد طبق استاندارد ASTM D698 انجام شده است. هدف از انجام این آزمایش بررسی مشخصات تراکمی خاک طبیعی (میزان رطوبت بهینه و دانسیته خشک حداکثر) و همچنین اثر افزودن آهک و الیاف پلیمری بر روی آن است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

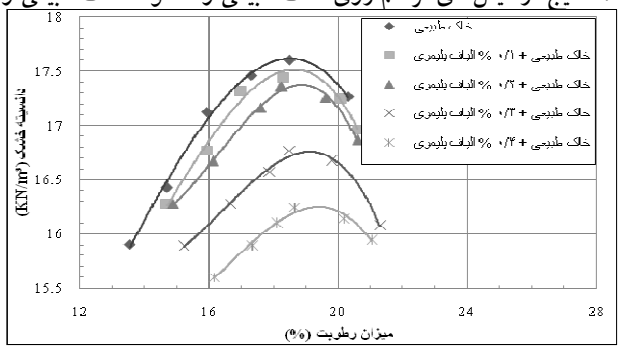
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]

لازم به ذکر است با توجه به این که پلیمر رزین اپوکسی استفاده شده از نوع پلیمرهای پایهٔ غیرآبی است و هنگام استفاده از آن خاک مورد نظر باید خشک باشد، انجام آزمایش تراکم بر روی مخلوط خاک و پلیمر میسر نیست؛ زیرا در عمل امکان افزودن آب به مخلوط خاک و پلیمر و در نتیجه متراکم کردن آن وجود ندارد.

با توجه به نتایج به‌دست آمده برای خاک طبیعی، رطوبت بهینه برابر ۱۸/۵ درصد و حداکثر دانسیته خشک برابر ۱۷/٦ کیلو نیوتن بر متر مکعب تعیین شد. نتایج آزمایش تراکم که بر روی خاک طبیعی و مخلوط خاک طبیعی و آهک در درصدهای ۲، ٤ و ٦ انجام شده است به صورت منحنی‌های تراکم در شکل ۷ و نتایج این آزمایش بر روی خاک طبیعی و مخلوط خاک طبیعی و الیاف پلیمری در درصدهای ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/٤ به صورت منحنی‌های تراکم در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۷. نتایج آزمایش‌های تراکم روی خاک طبیعی و مخلوط خاک طبیعی و آهک



شکل ۸. نتایج آزمایش‌های تراکم روی خاک طبیعی و مخلوط خاک طبیعی و الیاف پلیمری

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]

با توجه به نتایج آزمایش‌های تراکم مشاهده می‌شود که افزودن آهک و الیاف پلیمری به خاک بررسی شده موجب کاهش دانسیته خشک حداکثر و افزایش رطوبت بهینه خاک می‌شود، که این افزایش در نمونه‌های تسلیح شده با الیاف پلیمری ناچیز است. کاهش دانسیته خشک حداکثر در اثر افزودن آهک به خاک، می‌تواند به دلیل بالاتر بودن چگالی دانه‌های خاک (۲/۷۳ = Gs) نسبت به دانه‌های آهک (۲/۲۳ = GL) و همچنین کلسیمی شدن رس باشد. افزایش رطوبت بهینه نیز به علت انجام هیدراتاسیون و واکنش‌های پوزولانی میان خاک و آهک و همچنین آب دوست بودن آهک بوده چنان‌که با افزایش میزان آهک، رطوبت بهینه نیز افزایش می‌یابد.

۳. آزمایش‌های پتانسیل تورم

آزمایش پتانسیل تورم طبق استاندارد ASTM D-4546 انجام شده است. هدف اصلی از انجام این آزمایش به‌دست آوردن پارامترهای تورمی‌خاک (تورم آزاد و فشار تورمی) است که با هدف نهایی این تحقیق که بررسی پارامترهای تغییر حجمی خاک شور و اثر تثبیت بر آن‌ها است نیز منطبق است. آزمایش پتانسیل تورم شامل دو بخش است، بخش اول تورم آزاد نمونه تحت سربار ناچیز (حدود ۱ کیلوپاسکال) و بخش دوم تعیین فشار تورمی است.

٤. آزمایش‌های پتانسیل تورم خاک طبیعی

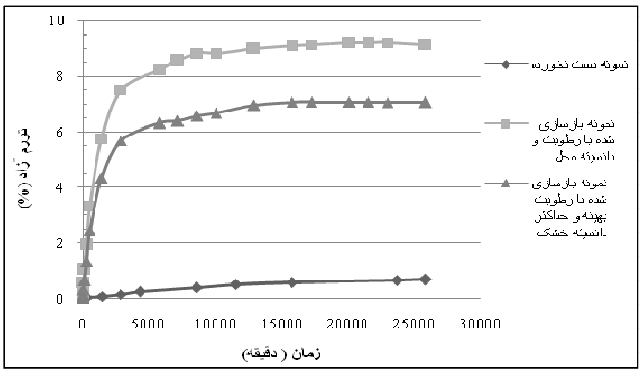
پس از نمونه‌گیری و انجام آزمایش‌های مقدماتی، جهت انجام آزمایش تورم آزاد و همچنین تعیین حداکثر فشار تورمی علاوه بر نمونهٔ دست نخورده با توجه به رطوبت و دانسیته در محل و همچنین رطوبت بهینه و حداکثر دانسیتهٔ خشک به‌دست آمده از نتایج آزمایش تراکم نمونه‌هایی بازسازی شد. در شکل ۹ نمودار تورم خاک بر حسب زمان برای سه حالت نمونهٔ دست‌نخورده، نمونهٔ دست‌خورده بازسازی شده شرایط محل و همچنین نمونهٔ دست‌خورده بازسازی شده با حداکثر دانسیته خشک و رطوبت بهینه مشاهده می‌شود.

با توجه به این شکل اثر دست‌خوردگی بر روی تورم خاک به وضوح مشهود است. با توجه به نتایج آزمایش‌های تورم به‌دست آمده بر روی خاک پروژهٔ حاضر می‌توان نتیجه گرفت

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]

که علت اصلی تورم در این خاک دست‌خوردگی خاک و تخریب ساختار و ترکیب اولیه خاک است. با عنایت به این‌که در عملیات عمرانی علی‌الخصوص در عملیاتی همچون احداث پل و زیرگذر و آبراهه و.... که دست‌خوردگی در خاک اجتناب‌ناپذیر است (چنان‌که پروژه مذکور نیز در حوالی محل احداث یک پل بوده)، برای کاهش تورم پیش آمده باید برای بهبود (کاهش) پتانسیل تورمی خاک در حالت دست‌خورده راه چاره‌ای اندیشید.



شکل ۹. نمودار تورم خاک بر حسب زمان برای نمونهٔ دست‌نخورده و نمونه‌های دست‌خورده

پس از تورم نهایی نمونه با بارگذاری دستگاه ادئومتر اقدام به تعیین فشار تورمی نمونه‌های دست‌نخورده و دست‌خورده شد. نتایج حاصل از آزمایش تورم آزاد و تعیین فشار تورمی روی نمونه‌های مذکور در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. نتایج حاصل از آزمایش پتانسیل تورم روی نمونه‌های دست‌خورده و دست نخورده

مشخصات نمونهٔ خاک	میزان تورم آزاد (میلی‌متر)	میزان تورم آزاد (٪)	درصد تورم آزاد نرمالیزه شده نسبت به نمونهٔ دست‌خورده (٪)	فشار تورم (kPa)	درصد فشار تورم نرمالیزه شده نسبت به نمونهٔ دست‌خورده (٪)
نمونهٔ دست‌نخورده	۰/۱۲	۰/۸	۱۱/۳۲	۳۹/۲۳	۲۱/۹۸
نمونهٔ دست‌خورده بازسازی شده با رطوبت و دانسیتهٔ محل	۱/۷۸	۹/۲۲	۱۳۰/٤۱	۱٦٦/۷۱	۹۳/٤۱
نمونهٔ دست‌خورده بازسازی شده با رطوبت بهینه و دانسیته خشک حداکثر	۱/۳۵	۷/۰۷	۱۰۰	۱۷۸/٤۸	۱۰۰

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]

۵. آزمایش‌های پتانسیل تورم نمونه‌های تثبیت شده با آهک

برای نشان دادن تأثیر تثبیت خاک با آهک بر خصوصیات تورمی خاک حاضر، آزمایش‌های پتانسیل تورم روی نمونه‌های تثبیت شده با ۲، ٤ و ٦ درصد آهک و در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ١٤، ۲۱ و ۲۸ روز انجام شد. برای ساخت نمونه ابتدا ترکیب خاک طبیعی با درصدهای وزنی مختلف آهک (۲،٤ و ٦ درصد) تحت آزمایش تراکم قرار گرفت و رطوبت بهینه و حداکثر دانسیتهٔ خشک برای ترکیب خاک با درصدهای مختلف آهک به‌دست آمد. سپس با توجه به درصد رطوبت بهینه و دانسیتهٔ حداکثر به‌دست آمده برای درصدهای مختلف آهک، نمونه‌های متعددی در رینگ دستگاه ادئومتر ساخته شد و نمونه‌ها جهت اعمال زمان‌های عمل‌آوری مختلف (۷، ١٤، ۲۱، ۲۸ روز) با همان درصد رطوبت بهینه در داخل کیسه‌های نایلونی که امکان ورود هوا را نداشته نگه‌داری شدند. هر نمونه پس از سپری شدن زمان عمل‌آوری مورد نظر از کیسه مربوطه خارج شده و در محفظهٔ دستگاه ادئومتر قرار گرفته و پس از تنظیم دستگاه و پر نمودن محفظهٔ دستگاه از آب مقطر تحت آزمایش تورم آزاد قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش تورم آزاد و تعیین فشار تورمی نمونه‌های تثبیت شده با آهک در جدول ٦ ارائه شده است.

با تحلیل و بررسی نتایج به‌دست آمده از آزمایش پتانسیل تورم نمونه‌های تثبیت شده با آهک می‌توان نتیجه‌گیری کرد که تثبیت خاک حاضر با آهک مؤثر واقع شده و به میزان چشم‌گیری تورم آزاد و فشار تورم خاک در حالت تثبیت نشده را کاهش می‌دهد. چنان‌که ملاحظه شد با افزودن آهک به خاک شور بررسی شده، تورم آزاد حدود ۷ الی ۲۲ درصد و فشار تورمی بین ۱۵ تا ۳۳ درصد نمونهٔ تثبیت نشده برای درصدهای مختلف آهک در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت کاهش یافته که این بیان‌گر این مطلب است که تثبیت خاک بررسی شده با آهک بسیار مطلوب است. شکل۱۰ و ۱۱ به‌ترتیب تأثیر آهک بر میزان تورم آزاد و فشار تورمی را نشان می‌دهد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]

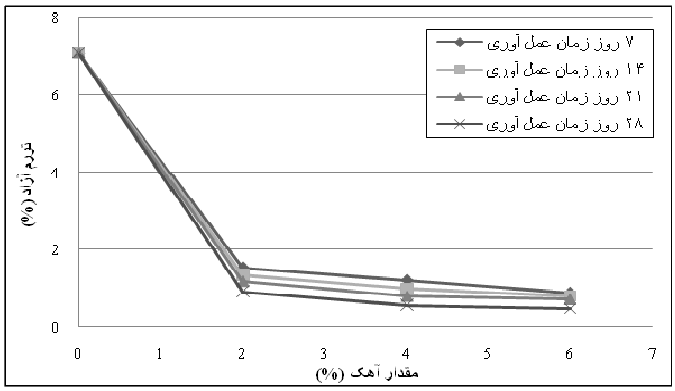
جدول ٦. نتایج حاصل از آزمایش پتانسیل تورم روی نمونه‌های تثبیت شده با آهک

مشخصات نمونهٔ خاک	تورم آزاد (٪)	درصد تورم آزاد نرمالیزه شده نسبت به نمونهٔ دست‌خورده* (٪)	فشار تورم (kPa)	درصد فشار تورم نرمالیزه شده نسبت به نمونهٔ دست‌خورده* (٪)
نمونهٔ تثبیت شده با ۲ ٪ آهک در زمان عمل‌آوری یک هفته	۱/٥٤	۲۱/۷٤	٥۸/۸٤	۳۲/۹۷
نمونهٔ تثبیت شده با ٤ ٪ آهک با زمان عمل‌آوری یک هفته	۱/۲۱	۱۷/۱۲	٥۲/٤۹	۲۹/٤۱
نمونهٔ تثبیت شده با ٦ ٪ آهک در زمان عمل‌آوری یک هفته	۰/۸۸	۱۲/٥۱	۳۹/۸۰	۲۲/۳۰
نمونهٔ تثبیت شده با ۲ ٪ آهک در زمان عمل‌آوری دو هفته	۱/۳٦	۱۹/۲۱	٥۳/٥۳	۲۹/۹۹
نمونهٔ تثبیت شده با ٤ ٪ آهک در زمان عمل‌آوری دو هفته	۱/۰۰	۱٤/۱۷	٥۰/۷٦	۲۸/٤٤
نمونهٔ تثبیت شده با ٦ ٪ آهک در زمان عمل‌آوری دو هفته	۰/۸۲	۱۱/٥٤	۳۸/٦٥	۲۱/٦٦
نمونهٔ تثبیت شده با ۲ ٪ آهک در زمان عمل‌آوری سه هفته	۱/۱۸	۱٦/٦۹	٥۲/۲٦	۲۹/۲۸
نمونهٔ تثبیت شده با ٤ ٪ آهک در زمان عمل‌آوری سه هفته	۰/۸۰	۱۱/۳۲	٤۷/۳۰	۲٦/٥۰
نمونهٔ تثبیت شده با ٦ ٪ آهک در زمان عمل‌آوری سه هفته	۰/۷۳	۱۰/۳۳	۳٥/۱۹	۱۹/۷۲
نمونهٔ تثبیت شده با ۲ ٪ آهک در زمان عمل‌آوری چهار هفته	۰/۹۲	۱۳/۰۷	٤۷/۳۰	۲٦/٥۰
نمونهٔ تثبیت شده با ٤ ٪ آهک در زمان عمل‌آوری چهار هفته	۰/٥۸	۸/۲۰	٤٥/۰۰	۲٥/۲۱
نمونهٔ تثبیت شده با ٦ ٪ آهک در زمان عمل‌آوری چهار هفته	۰/٤۹	٦/۹۳	۲٦/٥٤	۱٤/۸۷

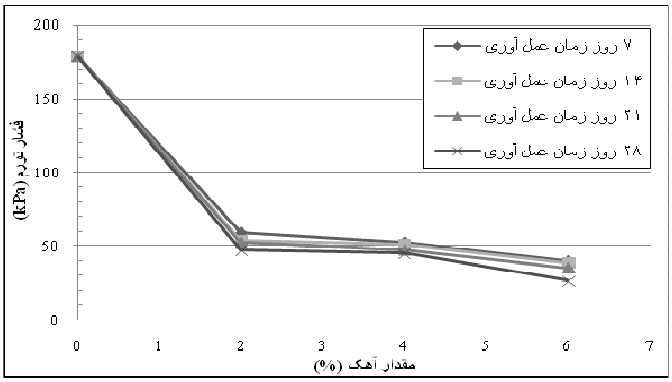
* نمونهٔ بازسازی شده خاک طبیعی با حداکثر دانسیته خشک و رطوبت بهینه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]



شکل ۱۰. تأثیر آهک بر تورم آزاد خاک شور بررسی شده



شکل ۱۱. تأثیر آهک بر فشارتورم خاک شور بررسی شده

٦. آزمایش‌های پتانسیل تورم نمونه‌های تثبیت شده با پلیمر

برای نشان دادن تأثیر تثبیت خاک با پلیمر بر خصوصیات تورمی خاک حاضر، آزمایش‌های پتانسیل تورم روی نمونه‌های تثبیت شده با ٤، ٥، ٧ و ٩ درصد پلیمر و با زمان‌های عمل‌آوری ١، ٣ و ٧ روز انجام شد. با توجه به این‌که عمل‌آوری نمونه‌های تثبیت شده با پلیمر باید به‌صورت خشک انجام می‌شد و همچنین برای ساخت نمونه‌ها امکان انجام آزمایش تراکم به دلیل عدم امکان گیرش مناسب نمونه در مجاورت رطوبت وجود نداشت، تمامی نمونه‌ها به‌صورت خشک و با دانسیتهٔ خشک نمونهٔ طبیعی بازسازی شده با رطوبت بهینه و حداکثر دانسیتهٔ خشک به‌دست آمده از آزمایش تراکم ساخته شدند. برای اعمال زمان عمل‌آوری نیز

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]

نمونه‌ها در فضای آزاد و در شرایطی که امکان عبور هوا بر روی سطوح باز نمونه وجود داشته باشد قرار داده شد. هر نمونه پس از سپری شدن زمان عمل‌آوری مورد نظر در محفظهٔ دستگاه ادئومتر قرار گرفته و پس از تنظیم دستگاه و پر کردن محفظهٔ دستگاه از آب مقطر تحت آزمایش تورم آزاد قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش تورم آزاد و تعیین فشار تورمی نمونه‌های تثبیت شده با پلیمر، در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷. نتایج حاصل از آزمایش پتانسیل تورم روی نمونه‌های تثبیت شده با پلیمر

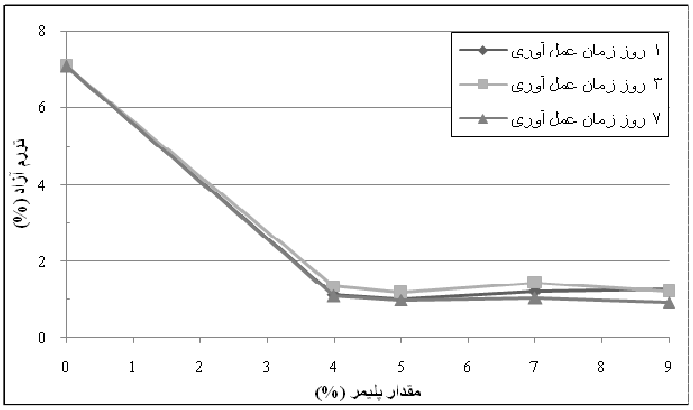
مشخصات نمونهٔ خاک	تورم آزاد (٪)	درصد تورم آزاد نرمالیزه شده نسبت به نمونهٔ دست‌خورده* (٪)	فشار تورم (kPa)	درصد فشار تورم نرمالیزه شده نسبت به نمونهٔ دست‌خورده* (٪)
نمونهٔ تثبیت شده با ٤ ٪ پلیمر با زمان عمل‌آوری یک روز	۱/۱۱	۱۵/٦۳	۱۲٤/۵۵	٦۹/۷۸
نمونهٔ تثبیت شده با ۵ ٪ پلیمر با زمان عمل‌آوری یک روز	۱/۰۰	۱٤/۱٤	۱۰۰/۰۳	۵٦/۰٤
نمونهٔ تثبیت شده با ۷ ٪ پلیمر با زمان عمل‌آوری یک روز	۱/۲۱	۱۷/۱۷	۱٦۸/٦۸	۹٤/۵۱
نمونهٔ تثبیت شده با ۹ ٪ پلیمر با زمان عمل‌آوری یک روز	۱/۲٦	۱۷/۸۷	۲۰۰/۰٦	۱۱۲/۰۹
نمونهٔ تثبیت شده با ٤ ٪ پلیمر با زمان عمل‌آوری سه روز	۱/۳۵	۱۹/۱۳	۱۷٤/۵٦	۹۷/۸۰
نمونهٔ تثبیت شده با ۵ ٪ پلیمر با زمان عمل‌آوری سه روز	۱/۱۷	۱٦/۵۷	۱۵۰/۰٤	۸٤/۰۷
نمونهٔ تثبیت شده با ۷ ٪ پلیمر با زمان عمل‌آوری سه روز	۱/٤۲	۲۰/۱۵	۱۷٤/۵٦	۹۷/۸۰
نمونهٔ تثبیت شده با ۹ ٪ پلیمر با زمان عمل‌آوری سه روز	۱/۲۰	۱٦/۹۲	۲۰۰/۰٦	۱۱۲/۰۹
نمونهٔ تثبیت شده با ٤ ٪ پلیمر با زمان عمل‌آوری هفت روز	۱/۰۸	۱۵/۰۳	۱۵۰/۰٤	۸٤/۰۷
نمونهٔ تثبیت شده با ۵ ٪ پلیمر با زمان عمل‌آوری هفت روز	۰/۹۹	۱۳/۹٦	۱۲٤/۵۵	٦۹/۷۸
نمونهٔ تثبیت شده با ۷ ٪ پلیمر با زمان عمل‌آوری هفت روز	۱/۰۳	۱٤/۵۱	۱٦۱/۸۱	۹۰/٦٦
نمونهٔ تثبیت شده با ۹ ٪ پلیمر با زمان عمل‌آوری هفت روز	۰/۹۲	۱۳/۰۳	۱۷٤/۵٦	۹۷/۸۰

* نمونهٔ بازسازی شده خاک طبیعی با حداکثر دانسیته خشک و رطوبت بهینه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]

با تحلیل و بررسی نتایج به‌دست آمده در آزمایش تورم آزاد و تعیین فشار تورم روی نمونه‌های تثبیت شده با پلیمر می‌توان نتیجه‌گیری کرد که تثبیت خاک حاضر با پلیمر نیز مؤثر واقع شده و به میزان چشم‌گیری تورم آزاد خاک در حالت تثبیت نشده را کاهش می‌دهد. چنان‌که در بخش‌های گذشته ملاحظه شد با افزودن پلیمر به خاک شور بررسی شده، تورم آزاد حدود ۸۰ الی ۸۷ درصد کاهش داشته که این بسیار مطلوب است ولی فشار تورمی بین ٤٤ درصد کاهش تا ۱۲ درصد افزایش را برای درصدهای مختلف پلیمر با زمان‌های عمل‌آوری متفاوت نسبت به خاک طبیعی نشان می‌دهد. علت افزایش فشار تورم خاک تثبیت شده با پلیمر با این وجود کاهش شدید تورم آزاد بدین علت است که خاک تثبیت شده پس از حضور آب و شروع تورم آزاد طی فعل و انفعالات شیمیایی که بین خاک و پلیمر رخ می‌دهد به شدت سخت شده و جهت برگشت به حالت اولیه (صفر کردن تورم آزاد) نیازمند اعمال فشار بیش‌تری است. شکل ۱۲ تأثیر پلیمر بر میزان تورم آزاد خاک شور بررسی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. تأثیر پلیمر بر میزان تورم آزاد خاک شور بررسی شده

۷. آزمایش‌های پتانسیل تورم نمونه‌های تسلیح شده با الیاف پلیمری

نتایج حاصل از آزمایش پتانسیل تورم نمونه‌های تسلیح شده، با الیاف پلیمری در جدول ۸ ارائه شده است. با تحلیل و بررسی نتایج به‌دست آمده در آزمایش پتانسیل تورم نمونه‌های

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]

تسلیح شده با الیاف پلیمری می‌توان نتیجه‌گیری کرد که تسلیح خاک حاضر با الیاف پلیمری نیز مؤثر واقع شده و به میزان چشم‌گیری تورم آزاد و فشار تورم خاک در حالت تسلیح نشده را کاهش می‌دهد. در واقع می‌توان علت کاهش تورم آزاد و در نتیجهٔ آن کاهش پتانسیل تورم در نمونه‌های تسلیح شده با الیاف پلیمری را افزایش توان کششی خاک در اثر تسلیح با الیاف پلیمری بیان کرد. با توجه به این‌که جهت قرارگیری الیاف پلیمری در خاک به‌صورت کاملاً تصادفی است، وقتی که نمونه در مجاورت رطوبت قرار گرفته و شروع به تورم می‌کند، پس از اندکی تورم آزاد الیافی که در راستای تغییر شکل نمونه قرار گرفته‌اند به کشش افتاده و مانع از تورم بیش‌تر نمونه می‌گردند.

با جمع‌بندی نتایج آزمایش‌های تورم آزاد روی نمونه‌های تسلیح شده با الیاف پلیمری می‌توان نمودار درصد تورم آزاد نسبت به مقدار الیاف پلیمری نمونه‌های تسلیح شده با درصدهای مختلف الیاف پلیمری را چنان‌که در شکل ۱۳ نشان داده شده ترسیم کرد. چنان‌که ملاحظه می‌شود درنمونه‌های تسلیح شده با مقادیر بیش از ۰/۲ درصد الیاف پلیمری نتایج مطلوبی حاصل نمی‌شود که این می‌تواند به دلیل افزایش زه‌کشی آب به داخل نمونه و در نتیجه افزایش تورم نمونه باشد. نمودار فشار تورم بر حسب درصد الیاف پلیمری نیز در شکل (١٤) ترسیم شده است.

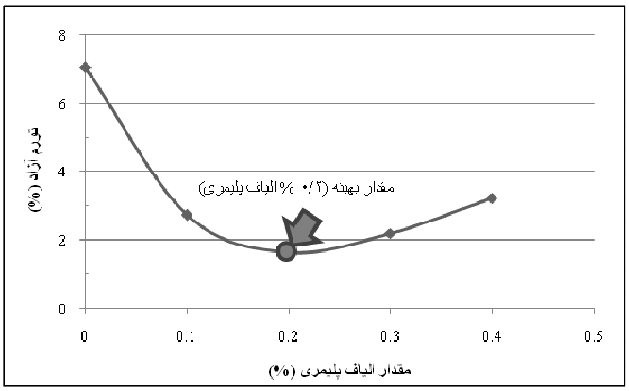
جدول ۸. نتایج حاصل از آزمایش پتانسیل تورم نمونه‌های تسلیح شده با الیاف پلیمری

میزان الیاف پلیمری (٪)	میزان تورم آزاد (میلی‌متر)	میزان تورم آزاد (٪)	درصد تورم آزاد نرمالیزه شده نسبت به نمونهٔ دست‌خورده (٪)	فشار تورم (kPa)	درصد فشار تورم نرمالیزه شده نسبت به نمونهٔ دست‌خورده (٪)
۰/۱	۰/۵۲	۲/۷٤	۳۸/۷٦	۵۰/۰۱	۲۸/۰۲
۰/۲	۰/۳۱	۱/٦٤	۲۳/۲۰	۳۳/۳٤	۱۸/٦۸
۰/۳	۰/٤۲	۲/۲۱	۳۱/۲٦	٤٤/۱۳	۲٤/۷۳
۰/٤	۰/٦۲	۳/۲٤	٤۵/۸۳	٤۹/۰۳	۲۷/٤۷

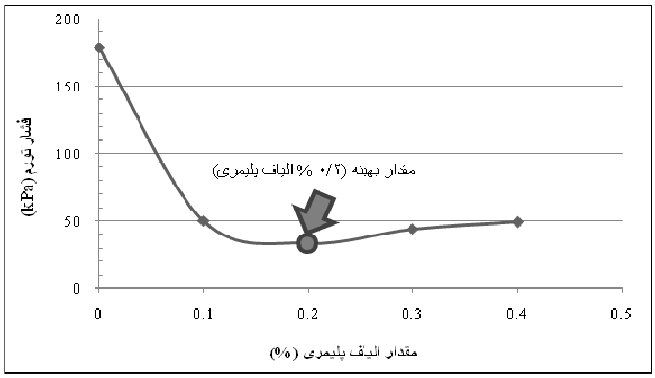
* نمونهٔ بازسازی شده خاک طبیعی با حداکثر دانسیتهٔ خشک و رطوبت بهینه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]



شکل ۱۳. نمودار درصد تورم آزاد نسبت به مقدار الیاف پلیمری نمونه‌های تسلیح شده با الیاف پلیمری



شکل ۱٤. نمودار فشار تورم بر حسب درصد الیاف پلیمری

آزمایش‌های تحکیم

آزمایش تحکیم طبق استاندارد ASTM D2435 انجام شده است. هدف اصلی از انجام این آزمایش به‌دست آوردن پارامترهای تحکیمی خاک (نشست تحکیمی، نشانه فشردگی، ضریب تحکیم و...) است که بر هدف نهایی این تحقیق که بررسی پارامترهای تغییر حجمی خاک شور و اثر تثبیت بر آن‌ها است نیز منطبق است. در این تحقیق از نمونه‌های به قطر ۷۵ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰ میلی‌متر استفاده شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]

آزمایش تحکیم در ادامهٔ آزمایش پتانسیل تورم و در صورت اطمینان از اشباع شدن نمونه‌ها انجام می‌شود. با توجه به این‌که سیکل آزمایش‌های پتانسیل تورم انجام شده روی خاک بررسی شده حدود ۲ هفته زمان می‌برد، تقریباً می‌توان گفت اکثر نمونه‌ها طی این دو هفته اشباع شده‌اند؛ ولی برای اطمینان از اشباع نمونه، پس از پایان تورم آزاد، نمونهٔ وزن شده و با توجه به تغییر ارتفاع ناشی از تورم آزاد درجهٔ اشباع نمونهٔ محاسبه شده و در صورت اشباع بودن نمونهٔ آزمایش تحکیم انجام شده است. لازم به ذکر است آزمایش تحکیم نمونه‌های تثبیت شده با پلیمر به علت اشباع نشدن نمونه‌ها میسر نشد.

برای تعیین ضریب تحکیم با توجه به بررسی‌های انجام گرفته از روش جذر زمان استفاده شد. با توجه به این‌که پارامترهای تحکیمی نظیر ضریب تحکیم(c_v)، ضریب تغییر حجم (m_v)، ضریب قابلیت فشردگی(a_v) و ضریب نفوذپذیری (K) در طی زمان فرآیند آزمایش تحکیم و در فشارهای مختلف متغیر هستند، مقادیر ارائه شده در این تحقیق میانگین مقادیر به‌دست آمده در محدوده تنش‌های ۲۰۰-۱۰۰ کیلوپاسکال است. این محدودهٔ تنش با توجه به فشار طراحی اعمالی روسازی راه بر خاک بستر انتخاب شده است. برای تعیین فشار بیش تحکیمی (P_c) از روش ترسیمی کاساگرانده (۱۹۳٦) در روی نمودار تخلخل ـ فشار استفاده شده است.

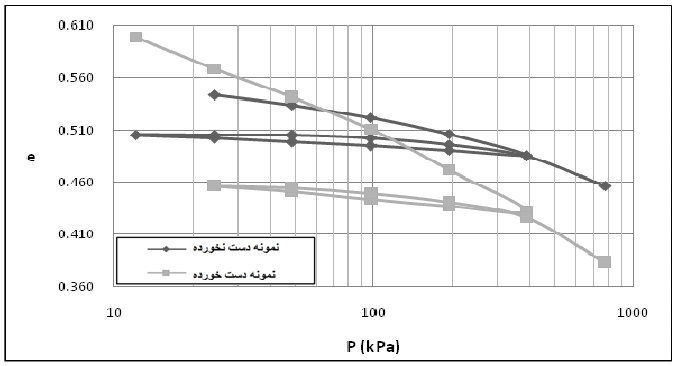
نتایج آزمایش‌های تحکیم خاک بررسی شده

برای بررسی پارامترهای تحکیمی خاک شور آزمایش تحکیم در سه حالت نمونهٔ دست نخورده، نمونهٔ دست‌خورده بازسازی شده با درصد رطوبت و دانسیته محل و نمونهٔ دست‌خورده‌ی بازسازی شده با دانسیتهٔ خشک حداکثر و رطوبت بهینه به‌دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد خاک بررسی شده انجام شده است. برای مقایسه و تأثیر دست‌خوردگی نمودار تخلخل- فشارر برای دو حالت دست‌نخورده و دست‌خورده بازسازی شده با شرایط محل در شکل ۱۵ ترسیم شده است. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود دست‌خوردگی موجب افزایش نشست تحکیمی و همچنین افزایش شیب منحنی تخلخل ـ فشار می‌شود. پارامترهای تحکیمی در سه حالت مذکور که از آزمایش تحکیم به‌دست آمده‌اند در جدول ۹ آمده است. با

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]

توجه به نتایج این جدول ملاحظه می‌شود در اثر دست‌خوردگی ضریب تحکیم افزایش یافته و مدول الاستیسیته و فشار بیش تحکیمی خاک کاهش می‌یابد.



شکل ۱۵. تأثیر دست خوردگی در نمودار e-log P

جدول ۹. پارامترهای تحکیمی خاک طبیعی

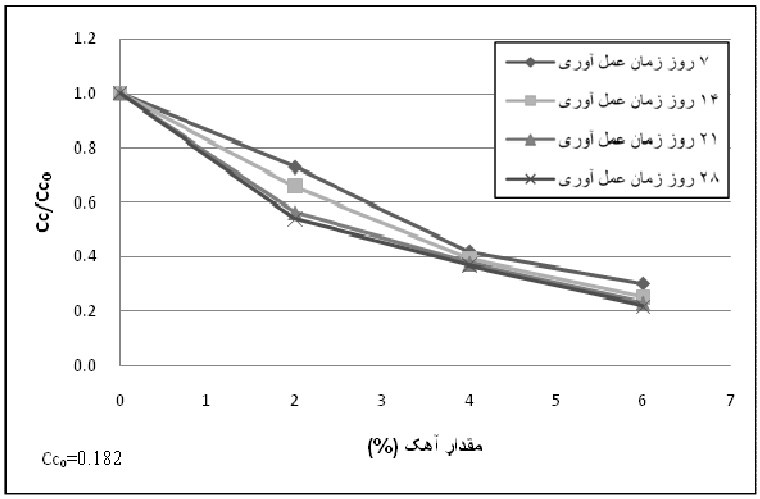
پارامترهای تحکیمی	نماد	واحد	نمونهٔ دست‌نخورده	نمونهٔ بازسازی شده با شرایط محل	نمونهٔ بازسازی شده با رطوبت بهینه و دانسیتهٔ خشک حداکثر
فشار بیش تحکیمی	P_c	kPa	۱۸۳	۱۱۰	۱۶۸
نشانهٔ فشردگی	C_c	-	۰/۰۹۱	۰/۱۳٤	۰/۱۸۲
نشانهٔ تورم	C_s	-	۰/۰۱۲	۰/۰۲۳	۰/۰۱۳
نشانهٔ فشردگی	C_r	-	۰/۰۲۰	۰/۰٤٥	۰/۰۳۱
ضریب تحکیم * $(\times 10^{-4})$	C_v	cm²/sec	٤/٤۸	٦/٤۳	٦/۰٦
ضریب تغییر حجم *	m_v	cm²/kg	۰/۰۱۳	۰/۰۳۳	۰/۰۲٤
ضریب قابلیت فشردگی *	a_v	cm²/kg	۰/۰۲۰	۰/۰٥۳	۰/۰۳۹
ضریب نفوذپذیری * $(\times 10^{-8})$	k	cm/sec	۰/٥۸	۲/۱	۱/٤
مدول الاستیسیته	E	kg/cm²	۱۰۰/۷۹	۳۷/٤٦	٥۱/٦۳

* مقادیر ارائه شده میانگین بازهٔ تنش‌های ۱۰۰ – ۲۰۰ کیلو پاسکال است

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]

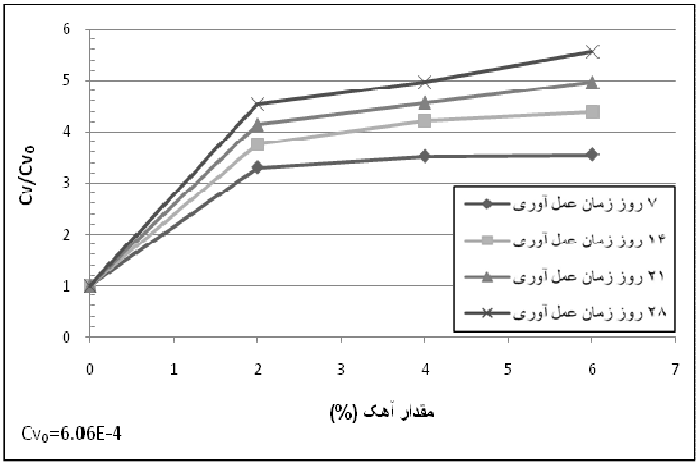
نتایج آزمایش‌های تحکیم نمونه‌های تثبیت شده با آهک

برای مقایسه تأثیر آهک بر نشانهٔ فشردگی (C_C)، شکل ١٦ نمودار نشانه فشردگی در برابر مقدار آهک را نشان می‌دهد که نسبت به نشانهٔ فشردگی خاک طبیعی در حالت تراکم آزمایشگاهی نرمالیزه شده است. همان‌طور چنان‌که در این شکل مشاهده می‌شود افزودن آهک به خاک شور بررسی شده موجب کاهش نشانه فشردگی(C_C) می‌شود که نرخ میزان آن با افزایش آهک برای زمان‌های عمل‌آوری مختلف کاهش می‌یابد. این کاهش به علت گیرش آهک با خاک و مقاومت نمونه در برابر نشست بوده که این مقاومت با افزایش مقدار آهک و همچنین افزایش زمان عمل‌آوری بیش‌تر شده و در نتیجه شیب منحنی بارگذاری اولیه کاهش می‌یابد. با توجه به این نمودار ملاحظه می‌شود نشانهٔ فشردگی خاک با افزودن ٤،٢ و ٦ درصد آهک در زمان عمل‌آوری ۷ روز به ترتیب ۲۷، ۵۸ و ۷۰ درصد نسبت به حالت تثبیت نشده کاهش داشته که حاکی از کاهش چشم‌گیر نشست خاک با افزودن آهک است. برای مقایسهٔ تأثیر آهک بر ضریب تحکیم، شکل ۱۷ نمودار ضریب تحکیم در برابر مقدار آهک را نشان می‌دهد که نسبت به ضریب تحکیم خاک طبیعی در حالت تراکم آزمایشگاهی نرمالیزه شده است.



شکل ١٦. تأثیر آهک بر نشانهٔ فشردگی خاک به صورت نرمالیزه شده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]



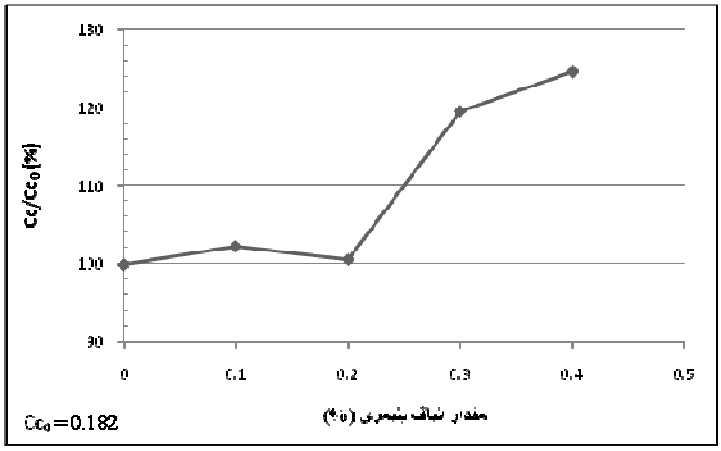
شکل ۱۷. تأثیر آهک بر ضریب تحکیم خاک به صورت نرمالیزه شده

چنان‌که در این شکل مشاهده می‌شود افزودن آهک به خاک شور بررسی شده موجب افزایش ضریب تحکیم می‌شود که میزان رشد آن با افزایش آهک برای زمان‌های عمل‌آوری مختلف افزایش می‌یابد. با توجه به این نمودار ملاحظه می‌شود ضریب تحکیم خاک با افزودن ٤،٢ و ٦ درصد آهک در زمان عمل‌آوری ۷ روز به ترتیب ۳/۳۰، ۳/۵۰ و ۳/٥٤ برابر می‌شود.

نتایج آزمایش‌های تحکیم نمونه‌های تسلیح شده با الیاف پلیمری

برای انجام آزمایش تحکیم بر روی نمونه‌های تسلیح شده با الیاف پلیمری، نمونه‌هایی با درصد رطوبت بهینه و دانسیتهٔ خشک حداکثر به‌دست آمده از نتایج آزمایش تراکم بر روی نمونه‌های خاک شور به اضافه ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/٤ درصد الیاف پلیمری ساخته شد. سپس نمونه‌ها در محفظهٔ دستگاه ادئومتر قرار گرفته و پس از اشباع و تورم آزاد تحت آزمایش تحکیم قرار گرفتند. برای مقایسهٔ بهتر تأثیر الیاف پلیمری بر نشانهٔ فشردگی (C_C)، شکل ۱۸ نمودار نشانهٔ فشردگی در برابر مقدار الیاف پلیمری را نشان می‌دهد که نسبت به نشانهٔ فشردگی خاک طبیعی در حالت تراکم آزمایشگاهی نرمالیزه شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]

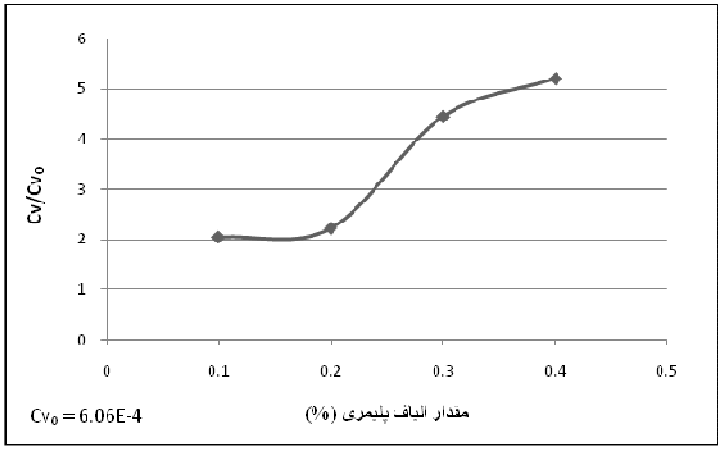


شکل ۱۸. تأثیر الیاف پلیمری بر نشانهٔ فشردگی خاک به صورت نرمالیزه شده

چنان‌که در این شکل مشاهده می‌گردد افزودن الیاف پلیمری به خاک شور بررسی شده موجب افزایش نشانهٔ فشردگی (C_C) می‌شود که میزان آن با افزایش مقدار الیاف پلیمری تا ۰/۲ درصد تقریباً ثابت و از ۰/۲ درصد تا ۰/٤ درصد به‌صورت افزایشی است. این افزایش به علت افزایش نفوذپذیری خاک و در نهایت افزایش نشست تحکیمی بوده و در نتیجه شیب منحنی بارگذاری اولیه افزایش می‌یابد. با توجه به این نمودار ملاحظه می‌شود نشانهٔ فشردگی خاک با افزودن ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/٤ درصد الیاف پلیمری به ترتیب ۲/۳، ۰/٦، ۱۹/٦ و ۲٤/٦ درصد نسبت به حالت تسلیح نشده افزایش داشته که حاکی از افزایش نشست خاک با افزودن الیاف پلیمری است.

برای مقایسهٔ تأثیر الیاف پلیمری بر ضریب تحکیم، شکل (۱۹) نمودار ضریب تحکیم در برابر مقدار الیاف پلیمری را نشان می‌دهد که نسبت به ضریب تحکیم خاک طبیعی در حالت تراکم آزمایشگاهی نرمالیزه شده است. چنان‌که در این شکل مشاهده می‌گردد افزودن الیاف پلیمری به خاک شور بررسی شده موجب افزایش ضریب تحکیم می‌شود که میزان رشد آن با افزایش الیاف پلیمری افزایش می‌یابد. با توجه به این نمودار ملاحظه می‌شود ضریب تحکیم خاک با افزودن ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/٤ درصد الیاف پلیمری به ترتیب ۲/۰٤، ۲/۲۲، ٤٤/٤ و ۵/۲۰ برابر نسبت به حالت تثبیت نشده افزایش داشته است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]



شکل ۱۹. تأثیر الیاف پلیمری بر ضریب تحکیم خاک به صورت نرمالیزه شده

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی خصوصیات تغییر حجمی یک خاک رسی شور در حالت دست‌نخورده، دست‌خورده، تثبیت شده با آهک و پلیمر و همچنین تسلیح شده با الیاف پلیمری ارائه شده است. با توجه به تحقیق انجام شده می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد:

- با توجه به نتایج آزمایش‌های تورم خاک پروژهٔ حاضر، می‌توان نتیجه گرفت که علت اصلی تورم در این خاک دست‌خوردگی خاک و تخریب ساختار و ترکیب اولیهٔ خاک است.
- با انجام آزمایش تحکیم بر روی نمونه‌های دست‌نخورده و دست‌خورده مشاهده شد، دست‌خوردگی موجب افزایش نشست تحکیمی و همچنین افزایش شیب منحنی تخلخل ـ فشار می‌شود. علی‌رغم دانسیتهٔ بالاتر نمونهٔ بازسازی شده با شرایط محل نشست تحکیمی این نمونه در بارگذاری اولیه بیش‌تر از نمونهٔ ساخته شده با رطوبت بهینه و دانسیته حداکثر آزمایش تراکم است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]

- در اثر دست‌خوردگی ضریب تحکیم افزایش می‌یابد.
- افزودن آهک، پلیمر و الیاف پلیمری به خاک موجب کاهش حد روانی خاک می‌شود، ولی میزان این کاهش در آهک و پلیمر در مقایسه با الیاف پلیمری بیش‌تر است.
- مقایسهٔ بین پارامترهای تورمی (تورم آزاد و فشار تورم) نمونه‌های تثبیت شده با آهک و پلیمر و نمونه‌های تسلیح شده با الیاف پلیمری نشان می‌دهد که همگی باعث کاهش تورم آزاد می‌شوند، ولی در مورد فشار تورم، پلیمر در مخلوط ۹ درصد موجب افزایش و در سایر موارد کاهش آن می‌شود که این مسئله از نکات منفی تثبیت با پلیمر به‌شمار می‌رود.
- مقایسه بین پارامترهای تحکیمی نمونه‌های تثبیت شده با آهک و نمونه‌های تسلیح شده با الیاف پلیمری نشان می‌دهد که نشست تحکیمی در نمونه‌های تسلیح شده با الیاف پلیمری افزایش و در نمونه‌های تثبیت شده با آهک کاهش می‌یابد، همگی باعث افزایش ضریب تحکیم می‌شوند، ولی در مورد مدول الاستیسیته، آهک موجب افزایش و در سایر موارد کاهش آن می‌شود که این مسئله از نکات منفی نمونه‌های تسلیح شده با الیاف پلیمری به‌شمار می‌رود.

✓ **با توجه به تمام شرایط و همچنین هزینه بالا و نکات منفی استفاده از پلیمر و نمونه‌های تسلیح شده با الیاف پلیمری نسبت به آهک به نظر می‌رسد که آهک هر چند که تثبیت کننده‌ای بسیار قدیمی است اما همچنان برای اکثر پروژه‌ها مقرون به صرفه‌تر بوده و استفاده از پلیمر با توجه به گیرش سریع آن تنها در پروژه‌های خاص توصیه می‌شود.**

منابع

1. Mosleh, A., AL-Shamrani "Applicability of the rectangular hyperbolic method to settlement predictions of sabkha soils" Geotechnical and Geological Engineering (2004) 563-587.

2. Chen, F. H., Foundations on Expansive Soils, ELSEVIER (1988).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]

3. Likos, W. J., "Measurement of crystalline swelling in expansive clay", Geotechnical Testing Journal, Vol. 27, No. 6 (2004) 1-7.

4. Sherif, M. A., Ishibashi, I., and Medhin, B. W., ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 108(1) January (2004) 33-45.

5. Jones D. E., "Expansive soils and housing development" Proceedings, Workshop on Expansive Clays and Shale in Highway Design and Construction, Vol. (1973) 1.

6. Aiban, S. A., Al-Ahmadi, H. M. "Effect of geotextile and cement on the performance of sabkha subgrade" Building and Environment (2006) 807-820.

۷. حیدری، س.؛ تثبیت خاک‌های شور با استفاده از آهک و میکروسیلیس، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره) (۱۳۸۷).

8. Rajasekaran, G., Narasimha Rao, S. "Compressibility behaviour of lime-treated marine clay" Ocean Engineering 29 (2002) 545-559.

9. Al-Khashab, M. N., Al-Hayalee, M. T. "Stabilization of Expansive Clayey Soil Modified by Lime with an Emulsified Asphalt Addition" Eng.& Technology, Vol. 26, No.10 (2008).

10. Mohamed, A., Sakr, Mohamed, A., Shahin, Yasser, M., Metwally "Utilization of Lime for Stabilizing Soft Clay Soil of High Organic Content" Geotech Geol Eng 27, 105-113, © Springer Science+Business Media B.V (2009).

11. HSAI-Yang Fang "Foundation engineering handbook" The Chapman & Hall (1991).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]

12. Kariuki, P. C., Meer, F. "A unified swelling potential index for expansive soils" Journal of Engineering Geology, Vol.72 (2004) 1-8.

۱۳. عبدی، م.ر.؛ ابراهیمی، ا.؛ *تأثیرطول و مقدار الیاف پلی پروپیلن بر خصوصیات مکانیکی کائولینیت*، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین (۱۳۸۷).

۱٤. صمیمی‌فر، م.؛ *بررسی پارامترهای مقاومت برشی خاک شور و اثر تثبیت بر آن*، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین (۱۳۸۸).

15. Banu Ikizler, S., Mustafa Aytekin, Emel Türker, Halil İbrahim Yavuz. "Effect of fibers on swelling characteristics of bentonite" 2nd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Near East University, Nicosia, North Cyprus (2009).

۱٦. شرکت وند شیمی ساختمان، ایران، تهران.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.4.2]