

بررسی تأثیر نوع آهک و نحوه اختلاط آن در بهسازی خاک‌های متورم شونده

مهیار سجادیان (دانشجوی کارشناسی ارشد)

کاظم برخوردار* (دانشیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۶ (۱۳۹۶)
دوری ۲ - ۳، شماره ۳/۲، ص. ۱۴۱-۱۳۶، (یادداشت شفاهی)

خاک‌های متورم شونده در مناطق زیادی از جهان وجود دارند و یکی از روش‌های اصلاح آنها، اضافه کردن آهک است. در نوشتار حاضر، اثر نوع آهک و روش افزودن آن بررسی شده است. پس از تعیین درصد بهینه‌ی آهک، با آزمایش بر روی نمونه‌های یک نوع خاک با درصد آهک متفاوت، دو نوع آهک شامل آهک دولومیتی و آهک خالص استفاده و در هر مورد سعی شده است تا خاک با افزودن آهک به‌صورت شکفته و مرده تثبیت شود. نتایج به‌دست آمده نشان داده که درصد آهک بهینه، ۳٪ وزنی خاک است. از طرفی آهک خالص در مقایسه با آهک دولومیتی، تورم آزاد کمتر، ولی فشار تورم بیشتری دارد. همچنین آهک‌های شکفته نسبت به آهک‌های زنده، تورم آزاد بیشتر و فشار تورم کمتری دارند. در نهایت، بهترین روش اختلاط آهک، تثبیت آن در درصد رطوبت بهینه‌ی خاک و به‌صورت دوغاب تعیین شده است.

واژگان کلیدی: خاک متورم شونده، تثبیت، آهک.

۱. مقدمه

خاک‌های متورم شونده، یک مشکل جهانی هستند و در مناطق زیادی از جهان، به‌خصوص مناطق خشک و نیمه‌خشک وجود دارند. بزرگ‌ترین مشکل آنها این است که با مرطوب شدن، متورم و با خشک شدن، منقبض می‌شوند و این تغییر حجم، فشارهای زیادی به فونداسیون‌ها، خطوط لوله، راه‌ها و جاده‌ها وارد خواهد کرد که بعضاً موجب ترک‌خوردگی و خرابی آنها خواهد شد.^[۱] طبق آمارهای ارائه شده، خسارت‌های ناشی از اثرات مخرب خاک‌های متورم شونده در سازه‌های مهندسی انگلستان سالانه ۱۵۰ میلیون پوند، در آمریکا ۱۰۰۰ میلیون دلار و در سراسر جهان میلیاردها دلار گزارش شده است.^[۲]

برای اولین بار در سال ۱۹۳۸، اداره‌ی بهسازی زمین ایالات متحده‌ی آمریکا، مسئله‌ی تورم در خاک را از دیدگاه مکانیک خاک شناسایی کرد. از آن زمان به بعد مهندسان به این نکته پی بردند که دلایل خرابی ساختمان‌ها می‌تواند چیزی به غیر از نشست باشد. رفتار تورمی معمولاً در خاک‌هایی مشاهده می‌شود که به اندازه‌ی لازم ذرات ریزدانه‌ی رسی داشته باشند. در مسائل مکانیک خاک، به ۳ کانی رسی: مونت موریلونیت، ایلیت و کائولینیت بیشتر توجه می‌شود. مونت موریلونیت نوعی کانی رسی است که در اغلب خاک‌های متورم شونده مشاهده می‌شود.^[۳]

خاک‌های تورم‌پذیر در بیشتر نقاط جهان، مانند: آرژانتین، اسپانیا، استرالیا، آمریکا، ایران، ترکیه، فلسطین، کانادا و هند بسیار یافت می‌شود. در ایران در استان‌های

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴/۶/۱۳۹۴، اصلاحیه ۲۲/۱۲/۱۳۹۴، پذیرش ۱۸/۲/۱۳۹۵.

margmadman@gmail.com
kbarkhordari@yazd.ac.ir

خوزستان، فارس (شکل ۱)، کرمان، یزد و بخش‌هایی از استان خراسان، این نوع رس بیشتر وجود دارد.^[۴] بهسازی خاک، به اصلاح و بهبود خواص فیزیکی و مهندسی یک خاک برای تأمین یک رشته اهداف از پیش تعیین شده اطلاق می‌شود.^[۵]

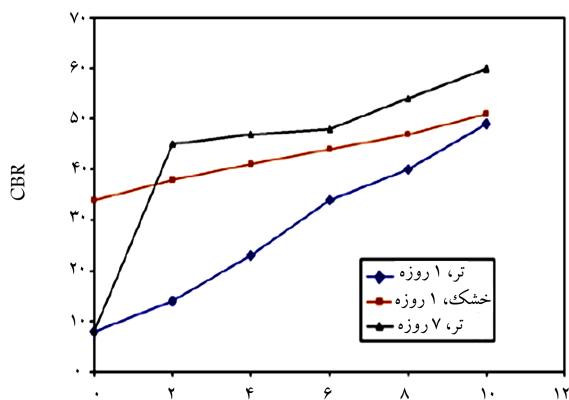
همچنین تثبیت خاک فرایندی است که طی آن مواد طبیعی یا مصنوعی به‌عنوان ماده‌ی افزودنی به خاک اضافه می‌شوند تا باعث بهبود مشخصات خاک شوند. از مهم‌ترین و معمول‌ترین موادی که در تثبیت خاک‌های رسی استفاده می‌شود، می‌توان به آهک، خاکستر زغال‌سنگ، نانومواد، سیمان، ساروج، و ... اشاره کرد.^[۶] متداول‌ترین نوع آهک‌هایی که برای تثبیت خاک استفاده می‌شوند، عبارت‌اند از: آهک زنده، آهک شکفته، آهک زنده‌ی دولومیتی و آهک شکفته‌ی دولومیتی. آهک زنده در مقایسه با آهک شکفته، تغییر حجم بیشتری دارد. به‌طور متوسط، تغییر حجم آهک زنده نسبت به آهک شکفته، ۲٫۵ تا ۳ برابر بیشتر است.^[۷]

۲. طبقه‌بندی خاک متورم شونده

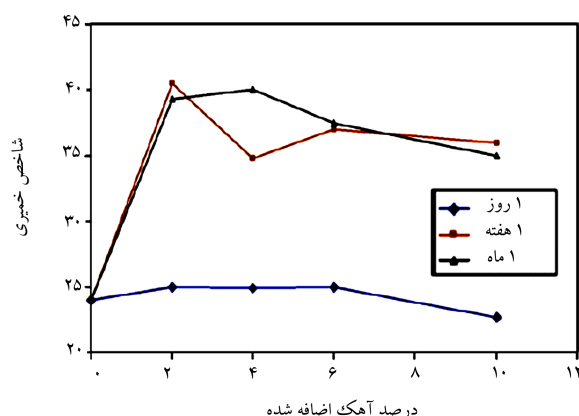
طبیعت خاک‌های متورم شونده و برخی از عوامل دیگر می‌تواند برای تعیین اینکه خاکی پتانسیل تورم دارد یا خیر، به کار برده شود. در حال حاضر، روش استاندارد مشخصی برای شناسایی خاک‌های متورم‌شونده وجود ندارد و معمولاً روش‌های حدود اتربرگ و یا درصد ذرات رسی موجود در خاک که قبلاً استفاده می‌شده است، برای طبقه‌بندی پتانسیل تورم به‌کار می‌رود. به‌طور کلی، خاک‌های با شاخص حالت

جدول ۱. طبقه‌بندی درجه‌ی تورم (پتانسیل تورم). [۹]

درجه‌ی تورم	چن (۱۹۸۳)	سید و همکاران (۱۹۶۲)	داکسانامارتی و رامون (۱۹۷۳)	هولتز و گیسیس (۱۹۵۶)
خیلی زیاد	$CC > 28$	$LL > 70$	$PI > 35$	$LL > 60$
زیاد	$20 < CC \leq 31$	$50 < LL \leq 70$	$20 < PI \leq 35$	$40 < LL \leq 60$
متوسط	$13 < CC \leq 23$	$35 < LL \leq 50$	$10 < PI \leq 20$	$30 < LL \leq 40$
کم	$CC < 13$	$20 < LL \leq 35$	$PI < 10$	$LL < 30$



شکل ۲. تغییرات مقادیر CBR با افزایش درصد آهک.



شکل ۳. تغییرات مقادیر شاخص خمیری با افزایش درصد آهک.

درصد تورم و فشار تورم به صفر کاهش می‌یابد. [۹] در سال ۲۰۰۶، نیز تأثیر افزودن آهک در خاک ماری نمونه‌برداری شده از قسمت شمالی خلیج فارس بررسی شده است. در شکل ۲، تأثیر افزودن آهک در تغییرات مقادیر CBR در حالت‌های خشک و تر و در زمان ۱ و ۷ روزه و در شکل ۳، نیز تغییرات شاخص خمیری با اضافه کردن آهک بررسی مشاهده می‌شود. [۱۱]

۴. برنامه‌ی آزمایشگاهی

آزمایش تعیین پتانسیل تورم یا نشست یک‌بعدی خاک‌های چسبنده، طبق استاندارد ASTM D4546 بر روی نمونه‌های خاکی انجام شده است. از استاندارد مذکور برای تعیین مقدار تورم یا نشست تحت فشار قائم مشخص و یا مقدار فشار لازم برای ثابت نگه داشتن حجم یک نمونه‌ی محصور شده استفاده می‌شود. [۱۲]

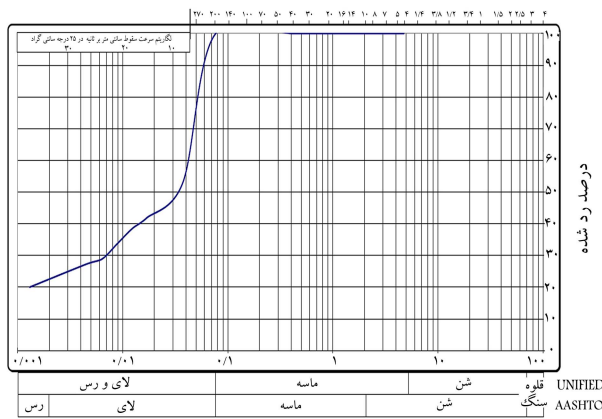


شکل ۱. وجود لایه‌های مختلف مارنی در یک محدوده - بزرگراه حسینی الهاشمی - شیراز.

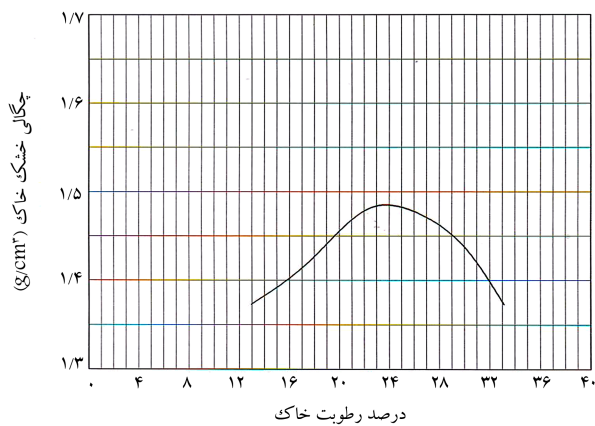
خمیری کمتر از ۱۵٪، رفتار متورم شونده‌ی خود نشان نمی‌دهند. در خاک‌های با حالت خمیری بزرگ‌تر از ۱۵٪، علاوه بر حدود اتربرگ، میزان ذرات رسی نیز باید تعیین شود. [۸] روش‌های شناسایی مورد استفاده برای تعیین خاک متورم شونده، به طور عمومی می‌تواند به ۲ دسته تقسیم‌بندی شود: دسته‌ی اول، شامل اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی خاک، مانند: حدود اتربرگ، تورم آزاد، و پتانسیل تغییر حجم است؛ و دسته‌ی دوم، شامل اندازه‌گیری ویژگی‌های شیمیایی و کانی‌شناسی، مانند: درصد رس، ظرفیت تبادل یونی و مساحت سطح رویه‌ی خاک است. [۸] برخی پژوهشگران روش‌های مختلفی برای شناسایی خاک‌های متورم شونده براساس درصد نسبت رس، شاخص خمیری، شاخص انقباض، حد روانی و حد خمیری ارائه و خاک‌ها را با درجه‌های پتانسیل متورم شونده: کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی کرده‌اند (جدول ۱). [۹]

۳. پیشینه‌ی پژوهش

در طی دهه‌های گذشته، خرابی‌های ناشی از عمل تورم خاک‌های متورم شونده، در نواحی زیادی از کشور چین به طور واضحی مشاهده و باعث خرابی فونداسیون ساختمان‌ها، روسازی‌ها و خاکریزها شده است. در پژوهشی در سال ۲۰۰۲، آهک در نسبت‌های وزنی: ۴، ۵ و ۶ درصد وزنی خاک خشک، به خاک متورم شونده اضافه شده و نتایج نشان داده است که برای خاک متورم شونده، مقدار حد خمیری خاک قادر است با ترکیب کردن آن با آهک، افزایش و حد روانی آن، کاهش یابد. بنابراین در صورت اضافه کردن آهک به خاک متورم شونده، شاخص خمیری نمونه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین چگالی خشک پیشینه‌ی نمونه‌های تثبیت شده با آهک، کمتر از خاک متورم شونده به تنهایی است. با افزایش نسبت آهک، مقادیر پیشینه‌ی چگالی خشک نمونه کاهش می‌یابد، اما درصد رطوبت بهینه‌ی آن افزایش می‌یابد. [۱۰] همچنین در سال ۲۰۰۵، خاک تورمی شهر الخود (شهر شمالی عمان) با استفاده از آهک تثبیت شده و نتایج نشان داده شده است که با افزودن ۶٪ آهک،



شکل ۵. منحنی دانه‌بندی نمونه‌ی خاک.



شکل ۶. منحنی آزمایش تراکم نمونه‌ی خاک.

بهینه و بیشینه‌ی چگالی خشک خاک محاسبه شد. مطابق شکل ۶، درصد طوبیت بهینه‌ی نمونه‌ی خاک، ۲۳/۸٪ و بیشینه‌ی چگالی خشک آن، ۱/۴۹ (gr/cm^3) تعیین شده است. آماده‌سازی نمونه‌ها نیز به این صورت انجام پذیرفت که برای اختلاط مناسب پودر آهک با خاک، ابتدا کلوخه‌های خاکی با چکش پلاستیکی خرد و سپس خاک خردشده از الک شماره‌ی ۴۰ عبور داده شد؛ در نهایت، آهک با مقادیر موردنیاز با خاک مخلوط شد.

۵. نتایج آزمایشگاهی

۵.۱. تعیین درصد آهک بهینه

نتایج آزمایش تعیین فشار تورم بر روی نمونه‌های تثبیت شده و تثبیت نشده‌ی خاکی در شکل ۷ مشاهده می‌شود که مطابق آن، درصد آهک زنده‌ی دولومیتی بهینه برای تثبیت خاک متورم‌شونده، ۳٪ اندازه‌گیری شده است. خاک مذکور در شرایط طبیعی، فشار تورمی برابر ۱۴۹ کیلوپاسکال دارد، اما با تثبیت آن با آهک زنده‌ی دولومیتی که به صورت پودر به آن اضافه شده است، فشار تورم خاک ذکر شده به ۷۸ کیلوپاسکال می‌رسد که بیانگر این مطلب است که با استفاده از آهک زنده‌ی دولومیتی می‌توان تا حدود ۴۸٪، فشار تورم را کاهش داد. همچنین با توجه به نمودار تغییرات فشار تورم در مقابل درصد‌های مختلف آهک افزوده شده، می‌توان به این نکته اشاره کرد که تغییرات فشار تورم خاک تا رسیدن به درصد آهک بهینه، روندی کاهشی و پس از آن روندی افزایشی دارد.



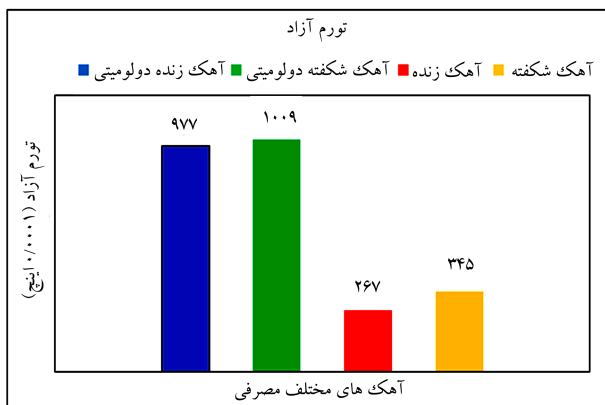
شکل ۴. محل نمونه‌برداری خاک متورم شونده.

استاندارد ASTM D۴۵۴۶، ارائه دهنده‌ی ۳ روش آزمایشگاهی برای تعیین مقدار تورم یا نشست نمونه‌های چسبنده‌ی نسبتاً دست‌نخورده یا متراکم شده است که در پژوهش حاضر از روش A آن استفاده شد. در روش مذکور، یک فشار جانشانی^۲ به اندازه‌ی کمینه‌ی ۱ کیلوپاسکال به نمونه‌ی رسی اعمال می‌شود. بعد از اینکه تغییر شکل ابتدایی در فشار جانشانی تکمیل شد، نمونه‌ی درون سلول تحکیم، با آب غرقاب می‌شود و اجازه داده می‌شود تا به صورت عمودی متورم شود. نمونه بعد از تکمیل تورم اولیه، به صورت گام به گام بارگذاری می‌شود. روند بارگذاری تا زمانی که مجدداً نمونه‌ی متورم شده به ارتفاع اولیه‌ی خود برسد، ادامه می‌یابد.^[۱۳] پتانسیل تورم به دو صورت فشار تورم و تورم آزاد بیان می‌شود. به صورت تورم، به صورت درصد افزایش ارتفاع در برابر ارتفاع اصلی و فشار تورم به صورت فشار موردنیاز برای جلوگیری از تورم تعریف می‌شود.^[۶]

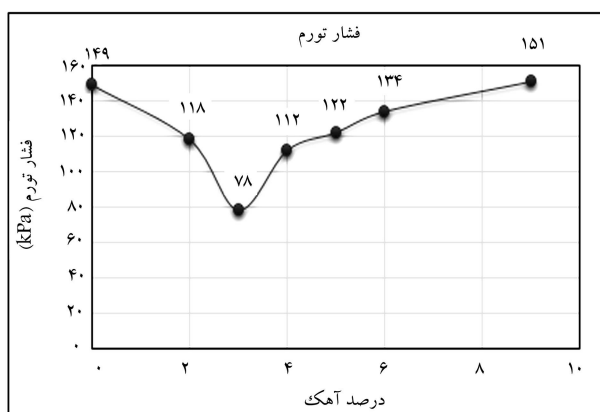
در پژوهش حاضر، ابتدا برای تعیین درصد آهک بهینه، یک نمونه‌ی خاک متورم شونده با درصد‌های مختلفی از آهک زنده‌ی دولومیتی تثبیت و آهک‌های اضافه شده در این مرحله، به نسبت‌های وزنی ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۹ به خاک اضافه شدند. همچنین آهک به صورت پودر خشک به خاک اضافه شد. پس از تعیین درصد آهک بهینه، به منظور انتخاب بهترین آهک تثبیت‌کننده‌ی خاک، آهک زنده، آهک شکفته و آهک شکفته‌ی دولومیتی نیز به خاک اضافه شدند. مقدار افزودن آهک‌های ذکر شده به خاک، برابر درصد آهک بهینه‌ی به دست آمده برای آهک زنده‌ی دولومیتی در مرحله‌ی قبل است. سپس نتایج به دست آمده، بحث و بررسی شده است. در گام آخر، نیز برای تعیین بهترین روش اختلاط، آهک زنده‌ی دولومیتی به صورت دوغاب و با غلظت‌های مختلف به خاک اضافه شد. آهک خالص و آهک دولومیتی مورد استفاده در پژوهش حاضر به ترتیب از کارخانه‌ی تولید آهک نی‌ریز استان فارس و معدن سنگ دولومیت ده بالا استان یزد تهیه شدند. خاک متورم شونده‌ی مورد استفاده نیز از بزرگراه حسینی الهاشمی شیراز (شکل ۴) نمونه‌برداری شد.

حدوداً ۱۸٪ تورم این خاک طبق استاندارد ASTM-D۴۳۱۸ اندازه‌گیری شد. حد روانی این خاک طبق آزمایش جام کاساگرانده، ۶۰ و حد خمیری آن طبق آزمایش فیتیله، ۳۹ محاسبه شده است. بنابراین شاخص خمیری خاک مذکور، ۲۱ است و بنابراین خاک مذکور طبق طبقه‌بندی گیسس، به خاک متورم شونده با درجه‌ی تورم زیاد طبقه‌بندی شد. جرم مخصوص خاک مورد آزمایش برابر ۱/۷۶ (gr/cm^3) اندازه‌گیری شد. همچنین دانه‌بندی خاک مذکور طبق استاندارد ASTM-D۴۲۲ و به روش ترو با استفاده از هیدرومتر تعیین شد. طبق آزمایش ذکر شده، این نمونه‌ی خاک به لای ارتجاعی (MH) طبقه‌بندی شد و منحنی توزیع دانه‌بندی آن نیز در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

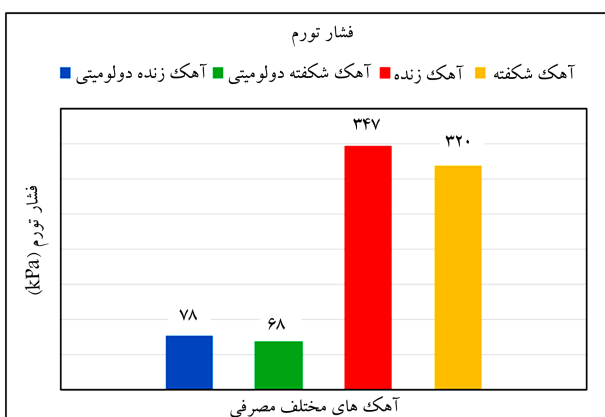
با انجام آزمایش تراکم مطابق با استاندارد ASTM-D۶۹۸A، درصد رطوبت



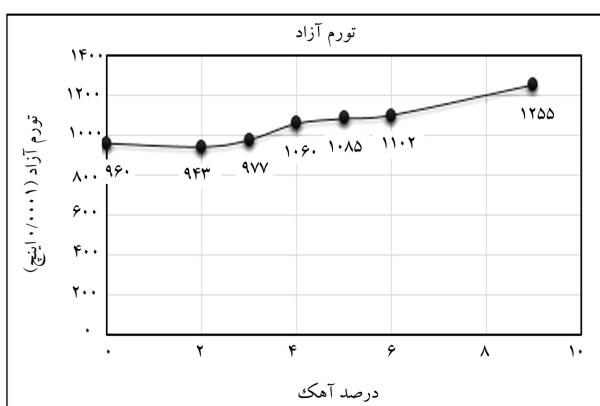
شکل ۹. تورم آزاد نمونه‌های تثبیت شده با آهک‌های مختلف.



شکل ۷. نمودار تغییرات فشار تورم خاک.



شکل ۱۰. فشار تورم نمونه‌های تثبیت شده با آهک‌های مختلف.



شکل ۸. نمودار تغییرات تورم آزاد خاک.

توانایی بیشتری در کاهش تورم آزاد نمونه‌ها دارند، به طوری که با تثبیت خاک با آهک زنده، تورم آزاد نمونه در مقایسه با نمونه‌ی تثبیت نشده، حدود ۲۲٪ کاهش می‌یابد. در شکل ۱۰، نیز میزان فشار تورمی نمونه‌های تثبیت شده‌ی خاک که با آهک‌های مختلف تثبیت شده است، مشاهده می‌شود. با توجه به شکل مذکور می‌توان اشاره کرد که آهک‌های دولومیتی در مقایسه با آهک خالص، فشار تورمی به مراتب کوچک‌تری از خود نشان می‌دهند، به طوری که با اضافه کردن ۳٪ آهک شکفته‌ی دولومیتی، فشار تورم از ۱۴۹ کیلوپاسکال (فشار تورم محاسبه شده برای نمونه‌ی تثبیت نشده) به ۶۸ کیلوپاسکال (حدود ۵۴٪) کاهش می‌یابد. اما فشار تورمی مذکور، با اضافه کردن ۳٪ وزنی آهک زنده به ۳۴۷ کیلوپاسکال می‌رسد که حدود ۱۳۳٪ افزایش داشته است که بیانگر این مطلب است که اضافه کردن آهک خالص به خاک ذکر شده، نه فقط فشار تورم را کاهش نمی‌دهد، بلکه باعث افزایش آن نیز می‌شود. از طرفی با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت که آهک‌های شکفته نسبت به آهک‌های زنده، فشار تورمی کمتری دارند.

۳.۵. تعیین مؤثرترین روش اختلاط آهک

با معلوم بودن مقادیر پتانسیل تورم نمونه‌ی خاک طبیعی و نمونه‌ی خاک تثبیت شده با ۳٪ آهک زنده‌ی دولومیتی که به صورت پودر خشک به خاک اضافه شده است؛ در مرحله‌ی آخر، آهک به صورت دوغاب و با غلظت‌های مختلفی به خاک اضافه می‌شود و نتایج حاصل، با مقادیر ذکر شده مقایسه می‌شود تا بهترین روش اختلاط آهک نیز به دست آید.

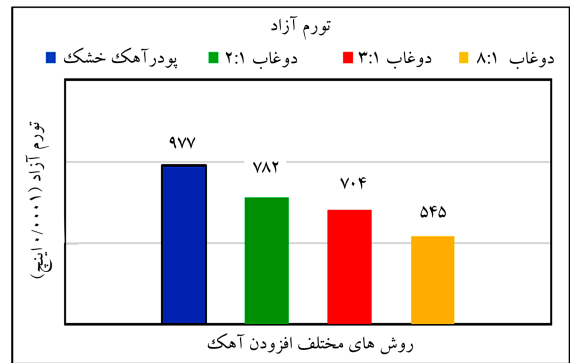
در شکل ۸، منحنی تغییرات تورم آزاد نمونه با اضافه کردن درصد‌های مختلفی از آهک زنده‌ی دولومیتی به صورت پودر رسم شده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که افزایش آهک زنده‌ی دولومیتی به صورت پودر به خاک الهاشمی، نه فقط تأثیر به سزایی در کاهش تورم آزاد نمونه‌ها ندارد، بلکه با اضافه کردن این آهک در درصد‌های تثبیت کننده‌ی بالا، تورم آزاد نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در نتیجه می‌توان به این نکته اشاره کرد که آهک زنده‌ی دولومیتی، توانایی کاهش تورم آزاد خاک متورم شونده‌ی استفاده شده در پژوهش حاضر را ندارد.

۲.۵. تعیین مؤثرترین آهک مصرفی

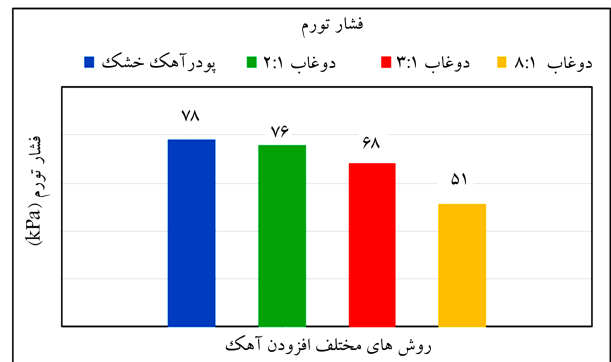
برای تعیین مؤثرترین نوع آهک مصرفی به منظور کاهش پتانسیل تورم خاک، خاک متورم‌شونده با آهک‌های متداول، مانند: آهک زنده، آهک شکفته، آهک زنده‌ی دولومیتی و آهک شکفته‌ی دولومیتی در درصد آهک بهینه‌ی مشخص شده در مرحله‌ی قبل (۳٪ وزنی) تثبیت می‌شود و در ادامه، نتایج آنها تفسیر و بررسی شده است. در شکل ۹، مقایسه‌ی بین تورم آزاد نمونه‌های تثبیت شده با آهک‌های مختلف بر روی نمونه‌ی خاک مشاهده می‌شود. مطابق شکل مذکور، مصرف آهک به صورت شکفته، تورم آزاد بیشتری نسبت به مصرف آن به صورت زنده دارد که می‌تواند به دلیل کاهش پتانسیل جذب آب توسط آهک به صورت شکفته باشد. برای تبدیل آهک زنده به آهک شکفته، آب اضافه می‌کنند. به همین دلیل، آهک شکفته در هنگام آزمایش، توانایی کمتری برای جذب آب دارد و در نتیجه تورم آزاد بیشتری دارد. همچنین می‌توان اشاره کرد که آهک‌های خالص در مقایسه با آهک‌های دولومیتی،

شونده بررسی شده است. در ابتدا، با افزودن آهک زنده دولومیتی به صورت پودر خشک با نسبت‌های وزنی ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۹ درصد آهک نسبت به خاک خشک، درصد آهک بهینه مشخص شده است. سپس به منظور تعیین مؤثرترین آهک مصرفی در کاهش پتانسیل نمونه‌ی خاک، آهک خالص و آهک دولومیتی، هر کدام به صورت آهک زنده و شکفته به نمونه‌ی خاکی اضافه شدند. درصد افزودن آهک‌های مذکور به خاک، درصد آهک بهینه‌ی محاسبه‌شده در گام نخست (۳٪ وزنی) است. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تعیین فشار تورم و پتانسیل تورم خاک، این نتایج به دست آمده است:

- آهک زنده دولومیتی، نه فقط توانایی کاهش تورم آزاد نمونه‌ی خاک را ندارد، بلکه با اضافه کردن آن به خاک، تورم آزاد خاک مذکور افزایش می‌یابد.
- درصد آهک زنده دولومیتی بهینه‌ی به دست آمده با بررسی معیار فشار تورم، مقدار آهک را ۳٪ وزنی مشخص کرده است. در مقدار آهک ذکر شده، فشار تورم حدود ۴۸٪ نسبت به فشار تورم خاک طبیعی کاهش می‌یابد. تغییرات فشار تورم با اضافه کردن آهک زنده دولومیتی تا قبل از رسیدن به نسبت آهک ۳٪، روند نزولی دارد و پس از آن یک روند صعودی را پیش می‌گیرد.
- از مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از تثبیت خاک با آهک‌های مختلف، می‌توان به این نکته اشاره کرد که آهک‌های خالص در مقایسه با آهک‌های دولومیتی، توانایی بسیار بیشتری در کاهش تورم آزاد نمونه‌ها دارند. همچنین مصرف آهک به صورت شکفته، تورم آزاد بیشتری نسبت به مصرف آن به صورت زنده دارد. در نتیجه می‌توان اشاره کرد که برای کارهای راه‌سازی جاده‌ی، که در آنها معیار تورم آزاد اهمیت بیشتری دارد، آهک‌های خالص نسبت به آهک‌های دولومیتی برای تثبیت خاک مؤثرتر هستند.
- از طرفی با بررسی فشار تورم نمونه‌های تثبیت شده با آهک‌های مختلف می‌توان اشاره کرد که فشار تورم نمونه‌های تثبیت شده با آهک دولومیتی، بسیار کمتر از نمونه‌های تثبیت شده با آهک خالص است. همچنین آهک‌های شکفته نسبت به آهک‌های زنده، توانایی بیشتری در کاهش فشار تورمی خاک دارند. در نتیجه می‌توان بیان کرد که برای تثبیت خاک پی‌های ساختمانی، که بحث فشار تورم در آنها اهمیت بیشتری دارد، استفاده از آهک دولومیتی نسبت به آهک خالص، ارجحیت بیشتری دارد.
- از بررسی تأثیر افزودن آهک به خاک به روش‌های مختلف می‌توان اشاره کرد که اضافه کردن آهک به صورت دوغاب به خاک، تورم آزاد و فشار تورم کمتری نسبت به افزودن آهک به صورت پودر خشک به خاک دارد. همچنین این نکته شایان ذکر است که تثبیت آهک در درصد رطوبت بهینه‌ی خاک، بیشترین تأثیر را در کاهش پتانسیل تورم خاک دارد. البته با توجه به نفوذپذیری و تریق‌پذیری اندک خاک مذکور، به نظر می‌رسد تریق آهک با خاک به صورت دست نخورده، یک فرایند غیرعملی است.



شکل ۱۱. تورم آزاد نمونه‌های خاک تثبیت شده با آهک به روش‌های مختلف.



شکل ۱۲. فشار تورم نمونه‌های خاک تثبیت شده با آهک به روش‌های مختلف.

در مرحله‌ی کنونی، دوغاب‌های استفاده شده با نسبت‌های وزنی ۱:۲ و ۱:۳ آب - آهک تهیه شدند. همچنین مقداری آب (یک بار) طوری به آهک اضافه می‌شود که در هنگام اختلاط با خاک، رطوبت آن با درصد رطوبت بهینه‌ی خاک طبیعی (۲۳/۸٪) برابر باشد (نسبت وزنی ۱:۸ آب - آهک). شکل ۱۱، روند تغییرات تورم آزاد برای روش‌های مختلف افزودن آهک به خاک را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مذکور می‌توان بیان کرد که هر چه نسبت وزنی آب نسبت به آهک بیشتر باشد، نمونه‌ها تورم آزاد کمتری از خود نشان می‌دهند.

با توجه به شکل ۱۲ نیز می‌توان بیان کرد که فشار تورم نمونه‌هایی که به روش دوغاب آهک به خاک اضافه می‌شوند، در مقایسه با افزودن آهک به صورت پودر خشک، فشار تورمی کمتری دارند. همچنین می‌توان مشاهده کرد که کاهش غلظت دوغاب آب - آهک، باعث کاهش فشار تورمی نمونه‌های تثبیت‌شده‌ی خاک مذکور می‌شود.

۶. نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر، تأثیر افزودن آهک در ویژگی‌های تورمی یک نمونه خاک متورم

پانویس‌ها

1. clay mineral
2. seating pressure

منابع (References)

1. Al-Mukhtar, M., Lasledj, A. and Alcover, J. "Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C", *Applied Clay Science*, 50(2), pp. 191-198 (2010).

2. Pashavandi, M.A. "Effect of fly ash on the engineering properties of expansive clay soil", *The First National Conferences of Structure Earthquake and Geotechnical*, Iran University of Science and Technology, pp. 1-8 (2010).
3. Ashayeri, A. and Yasrebi, Sh. "Estimate the swelling potential of expansive clay soil", *Moddares Technical Journal*, **25**, pp.132-141 (2005).
4. Dehghan, M., Soroush, A. and Salehi, M. "The swelling capacity of Yazd soil", *Journal of Omrane Moddares*, **13**, pp. 109-130 (2012).
5. Department of Transportation, Transportation Research Institute, *The Directory of Stabilization of Pavement Layers* (2009).
6. Al-Rawas. A.A., Hago A.W. and Al-Sarmi, H. "Effect of lime, cement and sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman", *Building and Environment*, **40**(5), pp. 681-687 (2005).
7. Askari, F. and, Fakher, A. "Soil swelling from the perspective of geotechnical engineering", SID Publication of Tehran University, pp.15-26 (1993).
8. Aldaood, A., Bouasker, M. and Al-Mukhtar, M. "Free swell potential of lime-treated gypseous soil", *Applied Clay Science*, **102**, pp. 93-103 (2014).
9. Management and Planning - Center of Scientific Publications, *Stabilization of Embankment and Pavement Layers Instructions* (2011).
10. Al-Rawas, A.A. and Goseen, M., *Expansive Soils - Recent Advances in Characterization and Treatment*, CRC press, 544 p. (2006).
11. Yong, R.N. and Ouhadi, V.R. "Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils", *Applied Clay Science*, **35**(3-4), pp. 238-249 (2007).
12. Hi-ru, Zh. and Xing, C. "Stabilization of expansive soil by lime and fly ash", *Journal of Wuhan Univesity of Technology*, **17**(4), pp. 73-77 (2002).
13. Haydariyan, H., *Standard Methods of Soil Mechanic Laboratory Tests According to ASTM Standards*, Avand Andishe Publication (2010).
14. Stoltz, G., Cuisinier, O. and Masrouri, F. "Multi-scale analysis of the swelling and shrinkage of a lime-treated expansive clayey soil", *Applied Clay Science*, **61**, pp. 44-51 (2012).