

## بررسی رفتار تغییر حجمی خاک‌های متورم‌شونده تثبیت‌شده با الیاف نواری

حدیثه رفعت‌جو<sup>۱\*</sup>، علی رئیسی استبرق<sup>۲</sup>، جمال عبدالهی<sup>۳</sup>

۱. کارشناس ارشد سازه‌های آبی دانشگاه تهران

۲. دانشیار گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

۳. مربی گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۸/۲۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۳/۴)

### چکیده

حجم خاک‌های متورم‌شونده، در اثر تغییرات رطوبت، تغییر می‌کند. محققان برای به‌سازی این خاک‌ها روش‌های شیمیایی و مکانیکی را پیشنهاد کرده‌اند. در این کار مطالعاتی به‌سازی یک خاک متورم‌شونده با استفاده از روش مسلح کردن تصادفی با دو نوع الیاف مصنوعی با عرض‌های ۳ و ۵ میلی‌متر بررسی شد. نمونه‌های آزمایشگاهی با طول‌های ۱۰، ۲۰، و ۳۰ میلی‌متر و درصد‌های وزنی ۰/۵، ۱، و ۱/۵ از الیاف تهیه شد و آزمایش‌ها در دستگاه تحکیم معمولی صورت پذیرفت. نتایج نشان داد مسلح‌سازی موجب کاهش ویژگی‌های تورمی می‌شود و این کاهش تابعی از درصد وزنی و طول الیاف است. مقایسه اثر دو الیاف نیز نشان داد که در درصد وزنی و طول ثابت افزایش عرض رشته‌های الیاف موجب کاهش بیشتر پتانسیل تورمی و فشار تورمی می‌شود.

**کلیدواژگان:** الیاف مصنوعی، به‌سازی خاک، پتانسیل تورمی، خاک متورم‌شونده، فشار تورمی

### مقدمه

معمولاً وقتی خاک‌های متورم‌شونده در معرض تغییرات رطوبت قرار می‌گیرند تغییر حجم می‌دهند. این موضوع می‌تواند خسارات جدی به سازه‌های بناشده روی این خاک‌ها، مانند بزرگراه‌ها و پل‌ها و ساختمان‌ها، ایجاد کند (Nelson and Miller, 1992). به‌منظور تعیین پارامترهایی که بر میزان تورم این نوع خاک‌ها مؤثر است و مشکلات ناشی از آن تلاش‌های زیادی صورت گرفته است و محققان روش‌های بسیاری را به منظور به‌سازی و تثبیت این خاک‌ها، با استفاده از مواد شیمیایی و مکانیکی و حرارتی، پیشنهاد کرده‌اند. آهک مؤثرترین ماده افزودنی شیمیایی برای کاهش پتانسیل تورمی خاک‌های متورم‌شونده است که به صورت گسترده از آن استفاده می‌شود (Nelson and Miller, 1992). (Al-Rawas et al., 2005) آزمایش‌هایی بر خاک‌های متورم‌شونده انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که با اضافه کردن آهک به خاک متورم‌شونده درصد تورم و فشار تورمی آن به میزان زیادی، بعضاً تا حدود ۰ درصد، کاهش می‌یابد. محققانی همچون Miller and Azad (2000) به بررسی اثر سیمان در به‌سازی خاک‌های متورم‌شونده پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزودن سیمان به این

خاک‌ها سبب کاهش پتانسیل تورمی و نشانه خمیری و حد روانی و افزایش حد انقباض و تنش برشی مقاوم این خاک‌ها می‌شود. Kumar et al. (2007) تأثیر خاکستر بادی و آهک و الیاف پلی‌استر را بر ویژگی‌های مقاومتی و تراکم خاک متورم‌شونده بررسی کردند و نتیجه گرفتند که خاک متورم‌شونده به‌خوبی با مخلوط الیاف و آهک و خاکستر بادی تثبیت می‌شود. Ji-ru et al. (2002) تأثیر آهک و خاکستر بادی را بر خاک متورم‌شونده بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که هر چه درصد آهک و خاکستر بادی در خاک افزایش یابد، مقادیر تورم آزاد کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده تثبیت خاک متورم‌شونده با آهک و خاکستر بادی به‌خوبی انجام می‌شود. محققان دیگری روش‌های مکانیکی را جهت تثبیت خاک‌ها، با استفاده از افزودن مواد پلیمری یا عناصر فلزی با مقاومت بالا، به‌کار بردند (Vidal, 1969). روش‌های سنتی تثبیت مکانیکی خاک‌ها نیز شامل قرارگیری پیوسته موادی مانند نوارهای ژئوسنتتیک‌ها و ژئوتکستایل‌ها در خاک بودند. این مواد معمولاً در جهت‌های خاصی بین لایه‌های خاک قرار داده می‌شدند. همچنین محققان الیاف را به منظور بهبود خصوصیات فیزیکی خاک‌های ماسه‌ای استفاده کردند. Gary and Ohashi (1983) و Maher and Gary (1990) گزارش کردند که تقویت خاک‌های ماسه‌ای با الیاف مقاومت

\* نویسنده مسئول: h.rafatjoo@ut.ac.ir

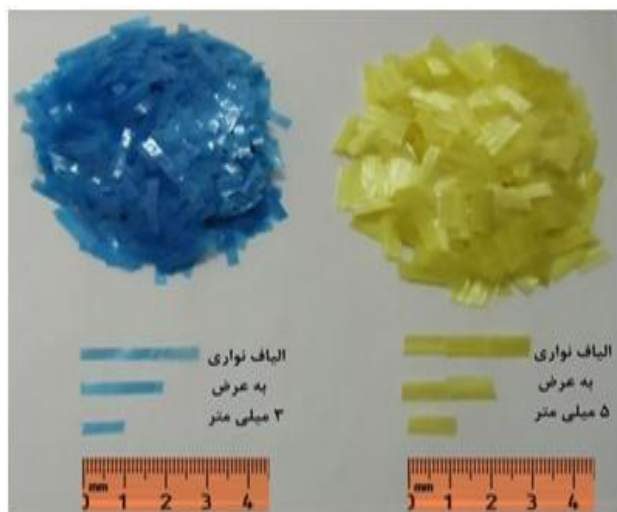
تهیه شده در جدول ۱ می آید. نتایج آزمایش ها نشان می دهد این خاک رس با خمیریایی بالا (CH) مطابق سیستم طبقه بندی یونیفاید است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک استفاده شده

مقدار	خصوصیات
۲٫۷۵	وزن مخصوص
	نتایج دانه بندی
۰	شن (%)
۲۱	ماسه (%)
۳۲	سیلت (%)
۴۷	رس (%)
	حدود اتبرگ
۷۶	حد روانی (%)
۲۳٫۸	حد خمیری (%)
۵۲٫۲	شاخص خمیری (%)
CH	طبقه بندی خاک
	نتایج تراکم
۲۰٫۵	رطوبت بهینه (%)
۱۶٫۱	بیشینه وزن واحد حجم خشک $\text{kN/m}^3$
۲۲٫۹	درصد تورم (%)

#### الیاف مصنوعی استفاده شده

در این کار مطالعاتی از دو نوع الیاف پلی پروپیلین با عرض های ۳ و ۵ میلی متر استفاده شد. تصاویر دو نوع الیاف استفاده شده در شکل ۱ می آید. این الیاف از نوع پلیمر است که در برابر اسیدها و بازها مقاومت بسیار بالایی دارد. ویژگی های الیاف استفاده شده در جدول ۲ می آید.



شکل ۱. الیاف استفاده شده در این تحقیق

برشی را افزایش می دهد. همچنین تحقیقاتی انجام شده که نشان می دهد اگر ژئوسنتتیک های پلیمری در جهت های گوناگون در خاک های ماسه ای قرار داده شوند، میزان مقاومت و سفتی خاک را بهبود می دهند (Lowton et al., 1993).

تحقیقاتی که تأثیر الیاف را بر خاک های رسی ارزیابی کرده اند بسیار محدودند. Nataraj and Freitag (1986) و McMains (1997) تأثیر الیاف را بر ویژگی های خاک های رسی مطالعه کردند. آن ها به این نتیجه رسیدند که افزودن الیاف مقاومت و شکل پذیری خاک رسی را بهبود می بخشد. محققانی مشاهده کردند که الیاف ضریب هدایت هیدرولیکی، مقاومت کششی نهایی، و شاخص نرمی خمشی خاک رسی را افزایش می دهد (Maher and Ho, 1994). Al-Akhras et al. (2008) اثر دو نوع الیاف طبیعی و مصنوعی را، که با درصدها و نسبت طول به عرض گوناگون با خاک مخلوط شدند، بررسی کردند و کاهش پتانسیل تورمی و فشار تورمی را در اثر افزودن الیاف نتیجه گرفتند. بررسی منابع نشان می دهد به سازی خاک های متورم شونده با افزودن الیاف طبیعی و مصنوعی به صورت تصادفی چندان بررسی نشده است. همچنین تا کنون تأثیر عرض الیاف مصنوعی در میزان خصوصیات تورمی خاک های متورم شونده بررسی نشده است. بنابراین در این تحقیق به سازی یک خاک متورم شونده با افزودن درصدها و طول های گوناگون از دو نوع الیاف مصنوعی به شکل نواری با عرض های ۳ و ۵ میلی متر و همچنین بررسی تأثیر این الیاف بر ویژگی های تورمی خاک رسی مد نظر بوده است.

#### مواد و روش ها

##### خاک استفاده شده

هدف این تحقیق آزمایش های تورمی بر یک نمونه خاک با قابلیت تورم پذیری بالا، مطابق طبقه بندی McKeen (1992)، بود. خاک موجود یک نوع خاک رسی با نام کائولینیت بود که آزمایش های شناسایی صورت گرفته بر آن نشان داد خمیریایی پایین و خواص تورمی متوسطی دارد. بنابراین برای تهیه خاک با خصوصیات تورمی بیشتر برای انجام دادن آزمایش ها خاک مورد نظر با درصدهای گوناگون بنتونیت مخلوط شد. روی مخلوط های مورد نظر آزمایش های شناسایی، مطابق استاندارد ASTM D4546، صورت پذیرفت و در نهایت مخلوطی شامل ۸۰ درصد کائولینیت و ۲۰ درصد بنتونیت مطابق طبقه بندی McKeen (1992)، به عنوان خاکی با قابلیت تورم پذیری بالا، انتخاب شد. نتایج خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک

جدول ۲. ویژگی‌های الیاف استفاده‌شده در این تحقیق

ویژگی‌های الیاف	نواری (۳ میلی‌متر)	نواری (۵ میلی‌متر)
نوع الیاف	منفرد	منفرد
ضخامت (mm)	۰٫۰۱	۰٫۰۳
وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )	۰٫۴۵	۰٫۵۱
عرض (mm)	۳	۵
مقاومت کششی (MPa)	۱۳۰۸	۲۹۴۰
مقاومت در برابر اسید و باز	بالا	بالا
جذب آب	صفر	صفر
ضریب کشسانی	۷۰۰۰	۵۰۰۰

### تهیه نمونه‌ها

آزمایش تراکم استاندارد بر نمونه‌های خاک متورم‌شونده و خاک مسلح‌شده با درصدها و طول‌های گوناگون الیاف انجام شده و منحنی تراکم برای آن‌ها رسم شده است. به منظور تهیه نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش از منحنی تراکم استاندارد استفاده شد. بدین ترتیب که روی شاخه خشک هر یک از این منحنی‌ها (۴ درصد کمتر از درصد رطوبت بهینه حاصل از آزمایش تراکم) نقطه‌ای انتخاب و با شرایط رطوبتی و وزن واحد حجم خشک متناظر با آن نقاط نمونه‌ها تهیه شد. برای این منظور خاک‌های مورد نیاز با رطوبت مورد نظر تهیه شد و به مدت ۲۴ ساعت در کیسه‌های پلاستیکی نگهداری شد. این عمل به منظور توزیع یکنواخت رطوبت در سرتاسر توده خاک صورت گرفت. به منظور تراکم‌ساختن نمونه‌ها از شیوه تراکم استاتیکی و برای رسیدن به این هدف از قالب ساخته‌شده برای این آزمایش استفاده شد. این قالب سه قسمت دارد. در قسمت میانی آن رینگ (حلقه‌ای) قرار می‌گیرد و ابعاد آن معادل رینگ (حلقه) دستگاه تحکیم (قطر ۷٫۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۲ سانتی‌متر) است. به منظور تهیه نمونه‌های یکنواخت، خاک در سه لایه در قالب مخصوص به روش تراکم استاتیکی تراکم شد. بار وارده بر هر لایه با استفاده از وزن واحد حجم خشک مطلوب، که از منحنی تراکم به دست آمده، با روش سعی و خطا تعیین و سپس نمونه تهیه شد. از آنجا که منحنی تراکمی مخلوط‌های گوناگون یکسان نبودند، بار وارده به منظور ساخت نمونه در تراکم استاتیکی برای مخلوط‌های گوناگون تفاوت دارد. بدین ترتیب که هر لایه در دستگاه تک‌محوری با سرعت بارگذاری ۱٫۵ میلی‌متر بر دقیقه تراکم و همه نمونه‌ها به روش مذکور تهیه شد.

### آزمایش تعیین پتانسیل تورمی و فشار تورمی نمونه‌ها

نمونه‌های متراکم تهیه‌شده به دستگاه تحکیم انتقال یافت تا پتانسیل تغییر حجم آن‌ها تعیین شود. بدین ترتیب که نمونه‌های خاک، پس از قرارگیری در محفظه دستگاه تحکیم، در معرض آب قرار گرفت و در اثر جذب رطوبت متورم شد و آزمایش‌های تورم و فشار تورمی روی نمونه‌های مورد نظر، مطابق استاندارد ASTM-D4546، انجام پذیرفت. تغییر شکل محوری نمونه با زمان تا رسیدن به بیشینه تورم با گیج (دستگاه اندازه‌گیر) تغییر شکل با دقت ۰٫۰۱ میلی‌متر ثبت شد. سپس با استفاده از رابطه ۱ درصد تورم برای هر نمونه در زمان‌های مختلف محاسبه شد. تورم آزاد بیشینه تغییر شکل حاصل‌شده در نمونه است که طی عمل جذب آب در نمونه ایجاد می‌شود.

$$S(\%) = \left( \frac{\Delta H}{H} \right) \times 100 \quad (\text{رابطه ۱})$$

S درصد تورم آزاد،  $\Delta H$  تغییر شکل محوری ایجادشده، و H ارتفاع اولیه نمونه است.

پس از رسیدن نمونه‌ها به حداکثر تورم، به کمک روش بارگذاری، فشار تورمی تعیین شد. فشار تورمی عبارت است از فشاری که به خاک متورم‌شونده وارد می‌شود تا به ارتفاع اولیه خود برگردد. فشار تورمی با رابطه ۲ تعیین می‌شود.

$$S_p = \frac{F}{A} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$S_p$  فشار تورمی خاک بر حسب کیلوپاسکال، F مقدار بار اعمال‌شده (kN)، و A سطح مقطع نمونه ( $m^2$ ) است که با مساحت رینگ (حلقه) نمونه دستگاه تحکیم برابر است.

### یافته‌ها و بحث

#### اثر دو الیاف نواری بر تراکم خاک

شکل‌های ۲ و ۳ نتایج آزمایش تراکم روی نمونه‌های خاک مخلوط‌شده با درصدها و طول‌های گوناگون الیاف نواری به عرض ۳ و ۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد.

شکل‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهد که افزودن مقادیر گوناگون الیاف به خاک موجب کاهش بیشینه وزن واحد حجم خشک و همچنین کاهش رطوبت بهینه آن می‌شود. با افزایش درصد الیاف برای هر طول، مقدار بیشینه وزن واحد حجم خشک خاک و درصد رطوبت بهینه کاهش می‌یابد. علت این تغییرات را می‌توان جایگزین کردن ذرات جامد خاک با درصدی از الیاف، که وزن مخصوص خیلی کمتری نسبت به خاک دارند، دانست. وزن مخصوص خاک ۲٫۷۵ و وزن مخصوص الیاف نواری به عرض ۳

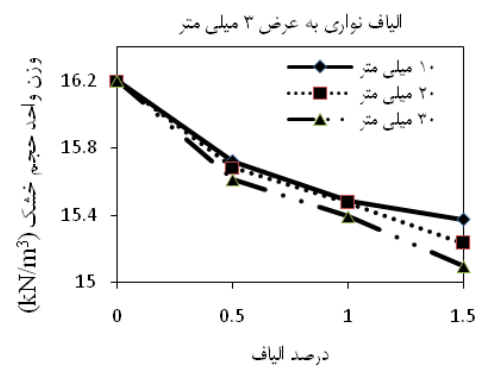
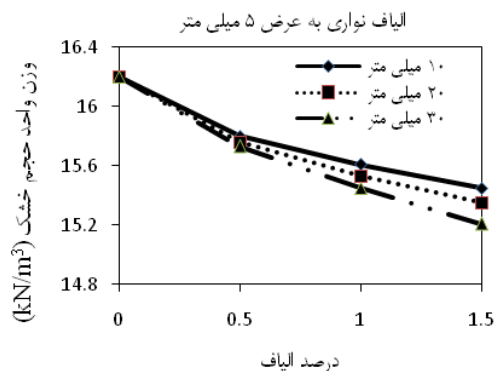
با توجه به اینکه الیاف نواری به عرض ۵ میلی‌متر حجم بیشتری از خاک را اشغال می‌کند و باید بیشینه وزن واحد حجم خشک مخلوط خاک با الیاف نواری به عرض ۵ میلی‌متر کمتر از مخلوط خاک با الیاف نواری به عرض ۳ میلی‌متر باشد، نتایج آزمایش‌ها نشان داد مخلوط خاک با الیاف نواری به عرض ۵ میلی‌متر بیشینه وزن واحد حجم خشک بیشتری دارد. این موضوع می‌تواند به این دلیل باشد که در حین آزمایش این الیاف تا خورده‌اند و تشکیل گلوله‌هایی از خاک را داده‌اند و ذرات خاک بیشتری به هم چسبیده‌اند که موجب افزایش بیشینه وزن واحد حجم خشک مخلوط خاک-الیاف شده است.

الیاف نواری به عرض ۳ میلی‌متر وقتی در خاک قرار می‌گیرد نسبت به الیاف نواری که عرض ۵ میلی‌متر دارد حجم کمتری از خاک را اشغال می‌کند و با جایگزین کردن مقادیر کمتری از خاک رطوبت بهینه بیشتری نسبت به دو الیاف دیگر دارد.

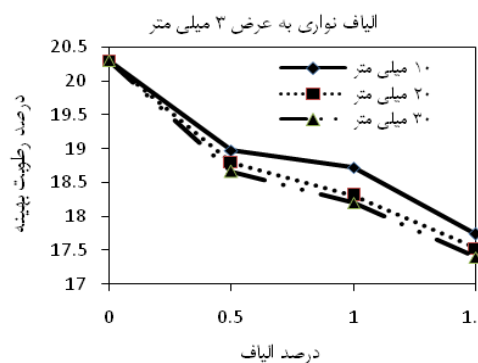
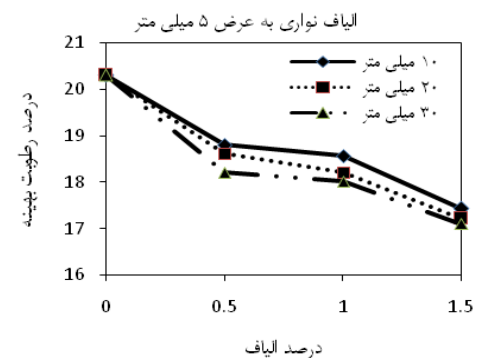
در درصد مشخصی از الیاف، با افزایش طول، کاهش بیشینه وزن واحد حجم خشک و درصد رطوبت بهینه مشاهده می‌شود. علت این تغییرات را می‌توان چنین بیان کرد که قراردادن الیاف با طول بزرگ‌تر حجم بیشتری از خاک را نسبت به طول کمتر اشغال می‌کند. بنابراین ذرات جامد خاک بیشتری جایگزین الیاف می‌شود و چون الیاف جاذب آب نیستند از مقدار رطوبت بهینه کاسته می‌شود.

**نتایج آزمایش‌های تعیین درصد پتانسیل تورمی و فشار تورمی**  
با آزمایش پتانسیل تورمی و فشار تورمی نمونه خاک متورم‌شونده مورد آزمایش و همچنین نمونه‌های خاک با درصد‌های گوناگون اختلاط الیاف، پتانسیل تورم‌پذیری آن‌ها بررسی شد. همان‌طور که شکل‌های ۴ الف و ۴ ب نشان می‌دهد، خاک طبیعی آزمایش‌شده پتانسیل تورمی ۲۲/۹ درصد و فشار تورمی ۳۵۵ کیلوپاسکال دارد. شکل‌های ۴ الف و ۵ ب و ۶ الف و ۶ ب، به ترتیب، پتانسیل تورمی و فشار تورمی مخلوط خاک با الیاف نواری به عرض ۳ میلی‌متر با طول ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر را در درصد‌های گوناگون نشان می‌دهد. در ۱ درصد الیاف و طول ۲۰ میلی‌متر درصد تورم و فشار تورمی برای الیاف با عرض ۳ میلی‌متر ۱۸/۹ درصد و ۱۲۷ کیلوپاسکال و برای الیاف نواری با عرض ۵ میلی‌متر ۱۸/۰۲ درصد و ۱۰۵ کیلوپاسکال است. این نتایج اثر الیاف را بر کاهش ویژگی‌های تورمی مخلوط خاک-الیاف نشان می‌دهد.

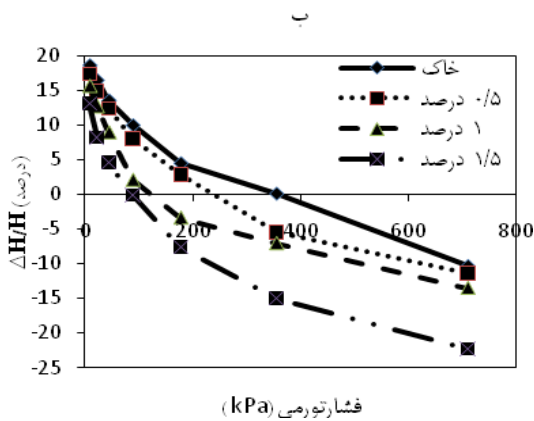
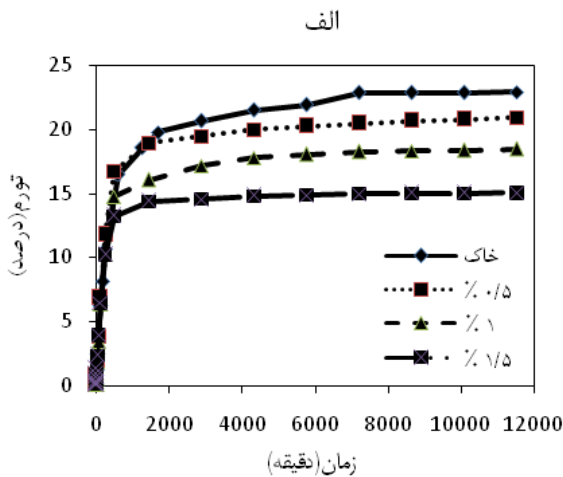
میلی‌متر ۰/۴۵ و وزن مخصوص الیاف نواری به عرض ۵ میلی‌متر ۰/۵۱ است. از سوی دیگر الیاف استفاده‌شده خاصیت جذب آب ندارند و جایگزین ذرات خاکی شده‌اند که خاصیت جذب آب دارند. بنابراین، موجب کاهش درصد رطوبت بهینه می‌شوند.



شکل ۲. تأثیر طول و درصد الیاف بر میزان وزن واحد حجم خشک خاک



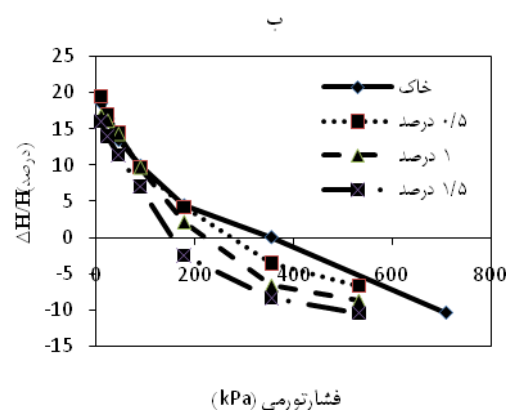
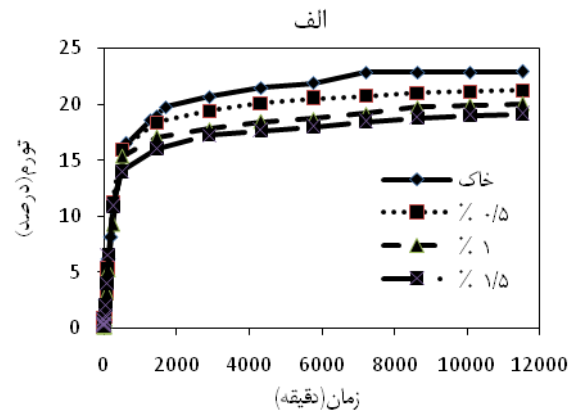
شکل ۳. تأثیر طول و مقدار الیاف بر درصد رطوبت بهینه



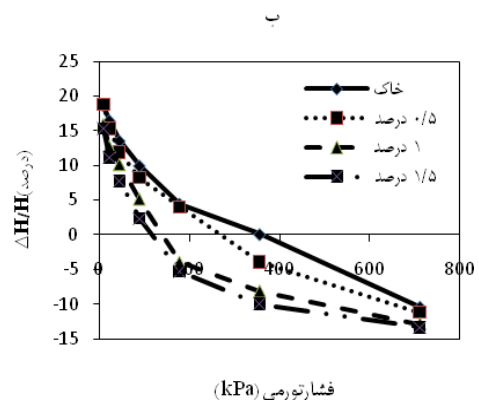
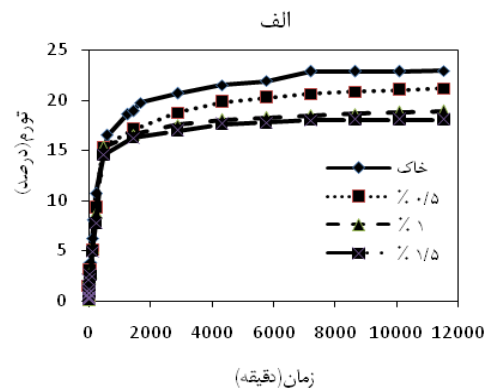
شکل ۴. تأثیر مقدار الیاف بر پتانسیل تورمی و فشار تورمی الیاف نواری به عرض ۳ میلی‌متر با طول ۱۰ میلی‌متر

شکل‌های ۴ و ۵ و ۶ نشان می‌دهد میزان پتانسیل تورمی برای مخلوط خاک- الیاف نواری به عرض ۳ میلی‌متر در هر ۳ طول ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر و با درصدهای ۰٫۵ و ۱ و ۱٫۵ کاهش می‌یابد و بیشترین تأثیر در مقدار ۱٫۵ درصد از الیاف با طول ۳۰ میلی‌متر مشاهده می‌شود؛ طوری که میزان تورم به ۱۵٫۰۴ درصد می‌رسد. به عبارت دیگر حدود ۳۴٫۳ درصد از پتانسیل تورمی آن کاسته می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش درصد الیاف فشار تورمی کاهش می‌یابد. کمترین میزان فشار تورمی مربوط به نمونه حاوی ۱٫۵ درصد از الیاف با طول ۳۰ میلی‌متر است که فشار تورمی از ۳۵۵ کیلوپاسکال به ۸۷ کیلوپاسکال رسیده و موجب کاهش ۷۵٫۵ درصدی فشار تورمی خاک شده است.

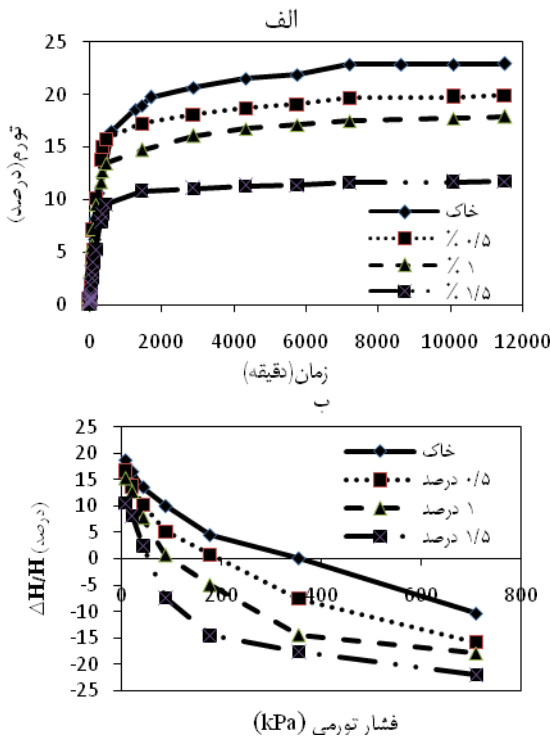
شکل‌های ۷ الف و ۷ ب و ۸ الف و ۸ ب و ۹ الف و ۹ ب، به ترتیب، پتانسیل تورمی و فشار تورمی مخلوط خاک با الیاف نواری به عرض ۵ میلی‌متر با طول ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر را در درصدهای گوناگون نشان می‌دهد.



شکل ۵. تأثیر مقدار الیاف بر پتانسیل تورمی و فشار تورمی الیاف نواری به عرض ۳ میلی‌متر با طول ۲۰ میلی‌متر



شکل ۶. تأثیر مقدار الیاف بر پتانسیل تورمی و فشار تورمی الیاف نواری به عرض ۳ میلی‌متر با طول ۳۰ میلی‌متر



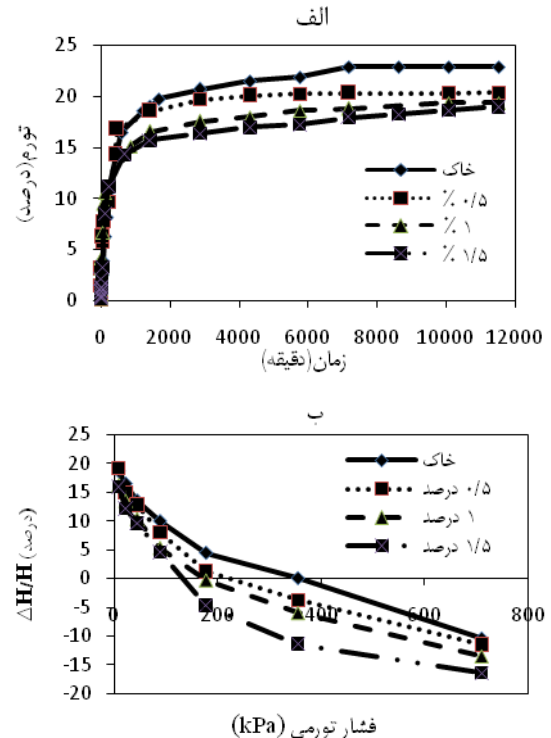
شکل ۹. تأثیر مقدار الیاف بر پتانسیل تورمی و فشار تورمی الیاف نواری به عرض ۵ میلی‌متر با طول ۳۰ میلی‌متر

نتایج آزمایش‌های پتانسیل تورمی و فشار تورمی برای الیاف نواری به عرض ۵ میلی‌متر در شکل ۷ و ۸ و ۹ می‌آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان پتانسیل تورمی و فشار تورمی در درصد‌های ۰/۵ و ۱ و ۱/۵، در نمونه حاوی الیاف با طول ۳۰ میلی‌متر، کاهش بیشتری دارد و کمترین میزان از آن نمونه حاوی ۱/۵ درصد الیاف با طول ۳۰ میلی‌متر است؛ به گونه‌ای که میزان پتانسیل تورمی برای خاک حاوی ۲۰ درصد بنتونیت و ۸۰ درصد کائولینیت برابر ۲۲/۹ درصد است؛ ولی استفاده از الیاف با ویژگی‌های یادشده سبب کاهش این مقدار به ۱۱/۷۵ درصد و به عبارتی کاهش ۴۸/۷ درصدی تورمی خاک می‌شود.

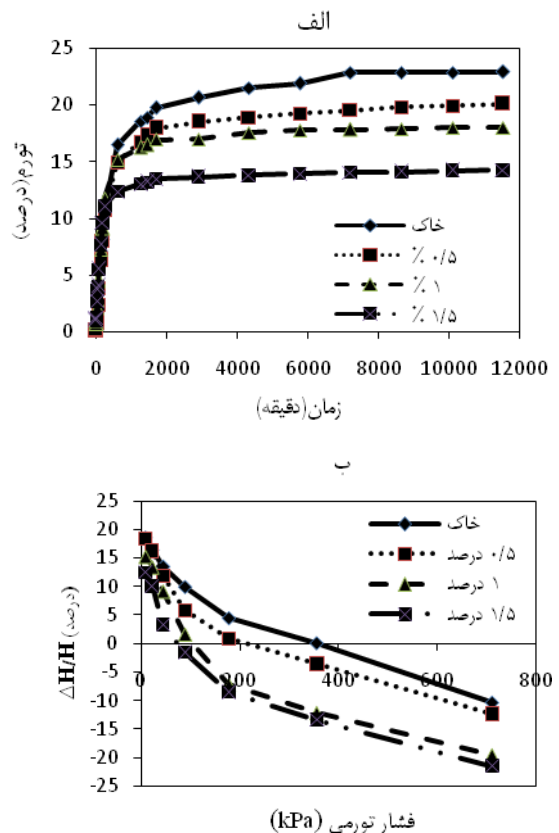
#### مقایسه پتانسیل تورمی و فشار تورمی ناشی از کاربرد دو الیاف نواری

در شکل ۱۰ الف و ۱۰ ب میزان پتانسیل تورمی و فشار تورمی ناشی از کاربرد هر دو الیاف نواری در ۰/۵ درصد افزودن الیاف می‌آید.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر ۳ طول ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر الیاف نواری به عرض ۵ میلی‌متر تأثیر بیشتری در کاهش پتانسیل تورمی و فشار تورمی نمونه دارد. این میزان کاهش در طول ۳۰ میلی‌متر بیشتر است؛ طوری که در طول



شکل ۷. تأثیر مقدار الیاف بر پتانسیل تورمی و فشار تورمی الیاف نواری به عرض ۵ میلی‌متر با طول ۱۰ میلی‌متر



شکل ۸. تأثیر مقدار الیاف بر پتانسیل تورمی و فشار تورمی الیاف نواری به عرض ۵ میلی‌متر با طول ۲۰ میلی‌متر

طول الیاف هم همین حالت پیش می‌آید؛ طوری که در یک درصد ثابت الیاف با افزایش طول موجبات جانمایی مقدار بیشتری از الیاف به جای خاک فراهم می‌آید که باز هم موجب کاهش تورم می‌شود. همچنین با افزودن الیاف تماس بین الیاف و ذرات خاک و در نتیجه پیوستگی بیشتر ذرات خاک حاصل می‌شود که در هنگام بروز تورم باعث به‌وجود آمدن نیروی کششی مقاوم در الیاف می‌شود و مؤلفه عمودی این نیروی کششی از تورم خاک جلوگیری می‌کند. هر چه الیاف بیشتر باشد میزان نیروی کششی بیشتر می‌شود و از تورم می‌کاهد. در مقایسه دو الیاف نواری، چون سطح جانبی الیاف نواری به عرض ۵ میلی‌متر بیشتر است، میزان تماس آن با خاک بیشتر است و نیروی کششی مقاوم بیشتری به هنگام تورم ایجاد می‌کند. در نتیجه کاهش تورم بیشتری حاصل می‌شود.

#### نتیجه‌گیری

- مسلح کردن تصادفی خاک با الیاف را می‌توان روشی برای به‌سازی خاک متورم‌شونده به‌شمار آورد.
- افزودن الیاف موجب کاهش پتانسیل تورمی و فشار تورمی خاک می‌شود. این کاهش ویژگی‌های تورمی تابعی از درصد وزنی و طول الیاف است.
- کاهش ویژگی‌های تورمی یک خاک تابعی از عرض الیاف است؛ طوری که با ثابت‌بودن طول و درصد الیاف افزایش عرض موجب کاهش بیشتر تورم می‌شود.

#### فهرست علائم

- S: درصد تورم آزاد،  
 $\Delta H$ : تغییر شکل محوری ایجادشده،  
 $H_0$ : ارتفاع اولیه نمونه،  
 $\Delta H/H$ : تغییر شکل محوری خاک،  
 $S_p$ : فشار تورمی خاک،  
 $F$ : مقدار بار اعمال‌شده،  
 $A$ : سطح مقطع نمونه

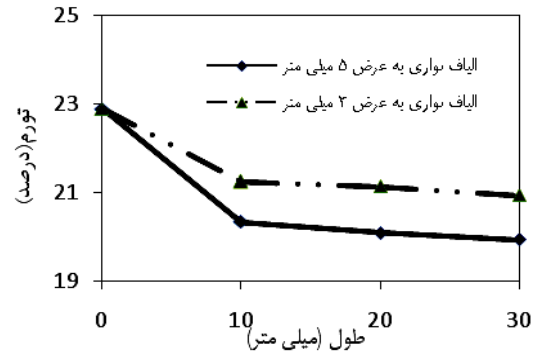
#### REFERENCES

Al-Akhras, N. M., Attom, M. F., Al-Akhras, K. M., and Malkawi, A. I. H. (2008). "Influence of fibers on swelling properties of clayey soil". *Geosynthetics International*, 15(4), 304-309.

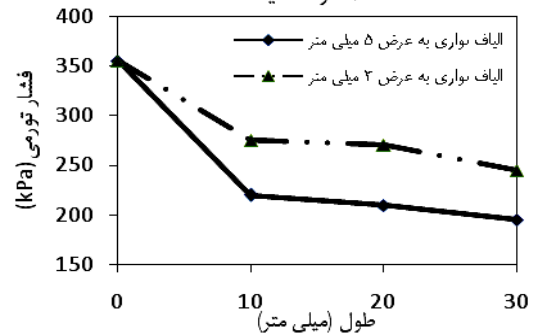
Al-Rawas, A. A., Hago, A. W., and Al-Sarmi, H. (2005). "Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman". *Building and Environment*, 40, 681-687.

۳۰ میلی‌متر در افزودن ۰/۵ درصد الیاف پتانسیل تورمی الیاف نواری به عرض ۳ و ۵ میلی‌متر به ترتیب ۲۰/۹۵ و ۱۹/۹۵ درصد است و در ۱ و ۱/۵ درصد الیاف نیز همین روند مشاهده می‌شود. الیاف نواری به عرض ۵ میلی‌متر در کاهش پتانسیل تورمی و فشار تورمی مخلوط خاک با الیاف کارآیی بهتری دارد.

۰/۵ درصد الیاف



۰/۵ درصد الیاف



شکل ۱۰. مقایسه پتانسیل تورمی و فشار تورمی با کاربرد دو نوع الیاف نواری در افزودن ۰/۵ درصد الیاف

در زمینه علت کاهش پتانسیل تورمی در اثر افزودن الیاف باید به این نکته اشاره کرد که الیاف ماده‌ای است که قابلیت جذب آب ندارد. بنابراین، در حجمی مشخص افزودن الیاف موجب جانمایی شدن درصدی از ذرات خاک با الیاف می‌شود. به همین دلیل از تورم آن مجموعه خاک کاسته می‌شود. افزایش درصد وزنی الیاف موجب جانمایی مقدار بیشتری الیاف به جای خاک می‌شود و از تورم خاک بیشتر کاسته می‌شود. با افزایش

Freitag, D. R. (1986). "Soil randomly reinforced with fibers". *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 112, No. 8, 823-826.

Gray, D. H. and Ohashi, H. (1983). "Mechanics of fiber reinforcement in sand". *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 109(3), 335-353.

- Ji-ru, Zh. and Xing, C. (2002). "Stabilization of Expansive Soil by Lime and Fly Ash", *Journal of Wuhan University of Technology*, 17(4), 73-77.
- Kumar, A., Walia, B. S., and Asheet, B. (2007). "Influence of fly ash, lime and polyester fibers on compaction and strength properties of expansive soil". *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, 19 (3), 242–248.
- Lawton, E. C., Khire, M. V., and Fox, N. S. (1993). "Reinforcement of soils by multioriented geosynthetic inclusions". *Journal of Geotechnical Engineering*, 119 (2), 257–275.
- Maher, M. and Gray, D. (1990). "Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers". *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 116 (11), 1661–1677.
- Maher, M. and Ho, Y. (1994). "Mechanical properties of kaolinite, fiber soil composite. *Journal of Geotechnical Engineering*", *ASCE*, 120(8), 1380–1392.
- McKeen, R. G. (1992), "A model for predicting expansive soil behavior", Proc. *the 7th Internatioanal Conference on expansive soils, Dallas, USA*, 1-6.
- Miller, G. and Azad, s. (2000). "Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust". *Construction and Building Materials*. 14 (2), 89-97.
- Nataraj, M. S. and McManis, K. L. (1997). "Strength and deformation properties of soils reinforced with fibrillated fibers". *Geosynthetics International*, 4 (1), 65–79.
- Nelson, J. D. and Miller, D. J. (1992). "*Expansive Soils Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*", John Wiley and Sons Inc., New York.
- Vidal, H. (1969). *The Principle of Reinforced Earth*, Highway Research Board, Washington, DC, Highway Research Record, No. 282, 1–16.