

بررسی آزمایشگاهی و آماری بهسازی یک خاک متورم شونده با استفاده از الیاف مصنوعی و افزودنی‌های شیمیایی

مهدی خطیبی^{۱*}، امین سلطانی^۲، علی رئیسی استبرق^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی - دانشگاه تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی - دانشگاه تهران

۳- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی - دانشگاه تهران

mehdi.khatibi@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۷/۳۰

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۱/۱۸

چکیده- در این پژوهش یک برنامه آزمایشگاهی برای بهسازی و کاهش پتانسیل تورمی یک خاک متورم شونده رسی به روش مکانیکی (مسلح سازی) و شیمیایی در نظر گرفته شد. در روش مکانیکی از دو نوع الیاف مصنوعی از نوع میله‌ای و نواری و به ترتیب از جنس پلی اتیلن و پلی پروپیلن با درصدهای وزنی و طول‌های گوناگون استفاده شد. همچنین بهسازی خاک به روش شیمیایی با استفاده از آهک و سیمان با درصدهای وزنی و زمان‌های عمل‌آوری متفاوت صورت پذیرفت. علاوه بر آن نتایج آزمایشگاهی مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت و مدل‌های رگرسیونی چندگانه مناسب برای پیش‌بینی و تعیین منحنی تورم آزاد، درصد تورم آزاد نهایی و فشار تورمی و بررسی ارتباط و همبستگی بین پارامترهای مؤثر در پدیده تورم به صورت تابعی از درصد وزنی الیاف، نسبت طول به قطر یا عرض الیاف، درصد وزنی آهک یا سیمان و زمان عمل‌آوری با دقت مطلوب پیشنهاد شد. نتایج به دست آمده نشان داد که بهسازی خاک با استفاده از الیاف مصنوعی و افزودنی‌های شیمیایی موجب کاهش قابل توجه در پتانسیل تورمی خاک متورم شونده می‌شود، به طوری که سیمان، آهک، الیاف نواری و میله‌ای به ترتیب بیشترین تأثیر در کاهش پتانسیل تورمی را دارد.

واژگان کلیدی: خاک متورم شونده، بهسازی خاک، تورم آزاد، فشار تورمی، مدل‌های رگرسیونی.

۱- مقدمه

آن‌ها می‌شود. Jones and Holtz [۱] خسارات مالی سالانه ناشی از خاک‌های متورم شونده در ایالات متحده آمریکا را در حدود دو برابر بیشتر از خسارات مالی سالانه ناشی از حوادث طبیعی از جمله سیل، زلزله، طوفان و گردباد گزارش شده است. یکی از روش‌های کاهش پتانسیل تورمی خاک‌های

خاک‌های متورم شونده از جمله خاک‌های مشکل‌آفرین در پروژه‌های عمرانی محسوب می‌شود. تغییر حجم ناشی از تغییر رطوبت در آن‌ها همواره موجب بروز خسارات فراوانی به سازه‌ها و بناهای (کانال‌های آبیاری و زهکشی، دیوارهای حائل، بزرگراه‌ها و تونل‌ها) ساخته شده بر روی

عمل آوری متفاوت استفاده شد و میزان تورم آزاد و فشار تورمی برای نمونه‌های مسلح شده تصادفی بهسازی شده تعیین شد. علاوه بر آن معادلات رگرسیونی چندگانه برای تعیین منحنی تورم آزاد، میزان تورم آزاد نهایی و فشار تورمی با در نظر گرفتن پارامترهای تأثیرگذار در پدیده تورم با دقت بالا و خطای قابل قبول استخراج شد. همچنین درصد اهمیت پارامترهای تأثیرگذار در میزان تورم آزاد نهایی و فشار تورمی برای نمونه‌های بهسازی شده گوناگون تعیین شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد مورد استفاده

الف- خاک

مخلوطی از ۸۰٪ خاک موجود (با خاصیت خمیریایی پایین) با ۲۰٪ بنتونیت تهیه و به عنوان خاک اصلی انتخاب شد، که این خاک بر اساس طبقه بندی McKean [۱۳] دارای خاصیت تورمی بالا بوده و مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱) مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک مورد استفاده

مقدار	استاندارد	مشخصه
۲.۷۳	ASTM-D-854	وزن مخصوص دانه‌های جامد (G_s)
۲۱	ASTM-D-422	ماسه (%)
۷۹		رس و سیلت (%)
۷۶	ASTM-D-4318	حد روانی (LL) (%)
۲۴		حد خمیری (PL) (%)
۵۲		نشانه خمیری (PI) (%)
۱۴	ASTM-D-427	حد انقباض (SL) (%)
۲۲.۹	ASTM-D-4546	درصد تورم آزاد (S) (%)
CH	ASTM-D-2487	طبقه بندی متحد (USCS)
۲۰.۵	ASTM-D-698	درصد رطوبت بهینه (ω_{opt}) (%)
۱۶.۲		وزن واحد حجم خشک حداکثر (γ_{dmax}) (kN/m^3)

متورم شونده بهسازی آن‌ها است که بیشتر به دو طریق شیمیایی و مکانیکی صورت می‌پذیرد. روش‌های شیمیایی شامل افزودن موادی مانند آهک، سیمان یا خاکستر بادی به خاک متورم شونده است. این افزودنی‌ها موجب وقوع یکسری واکنش شیمیایی در خاک شده که منجر به کاهش پتانسیل تورمی آن می‌شود (Al-Rawas و همکاران [۲]، Sezer و همکاران [۳]، Dash and Hussain [۴] و Estabragh و همکاران [۵]). روش‌های مکانیکی متعددی نیز برای بهسازی این خاک‌ها پیشنهاد شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به مسلح‌سازی تصادفی خاک با الیاف اشاره نمود. پژوهش‌های گسترده‌ای در ارتباط با اثر مسلح‌سازی تصادفی خاک‌های غیرچسبنده و چسبنده با الیاف بر خواص مقاومتی آن‌ها صورت گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به Kumar و همکاران [۶]، Tang و همکاران [۷] و Attom و همکاران [۸] اشاره نمود. این پژوهشگران چنین نتیجه گرفتند که درصد وزنی و طول الیاف در افزایش مقاومت خاک‌های مسلح شده مؤثر است. بررسی منابع موجود نشان می‌دهد در خصوص اثر مسلح‌سازی تصادفی خاک برای کاهش پتانسیل تورمی آن پژوهش‌های گسترده‌ای صورت نگرفته و تنها می‌توان به کارهای پژوهشی Ayyar و همکاران [۹]، Al-Akhras و همکاران [۱۰]، Viswanadham و همکاران [۱۱] و Cai و همکاران [۱۲] اشاره نمود. در تحقیق حاضر یک برنامه آزمایشگاهی برای بهسازی یک خاک متورم شونده به روش مکانیکی و شیمیایی برای کاهش پتانسیل تورمی آن در نظر گرفته شد. در روش مکانیکی، مسلح‌سازی تصادفی با استفاده از دو نوع الیاف از نوع میله‌ای و نواری و به ترتیب از جنس پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن با درصدهای وزنی و طول‌های گوناگون انجام شد. همچنین برای بهسازی خاک به روش شیمیایی از آهک و سیمان با درصدهای وزنی و زمان‌های

ب- الیاف مصنوعی

۷.۷۲، ۱.۲ (ds/m)، ۱.۷ (meq/Lit) و ۹.۴ (meq/Lit) اندازه‌گیری شد.

الیاف مصنوعی مورد استفاده از نوع میله‌ای و نواری و به ترتیب از جنس پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن و با درصدهای وزنی ۰/۵، ۱ و ۱/۵٪ و با طول‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر انتخاب، و مشخصات فیزیکی و مکانیکی این دو نوع الیاف در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲) مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف مصنوعی مورد استفاده

مشخصه	پلی‌اتیلن	پلی‌پروپیلن
نوع الیاف	میله‌ای منفرد	نواری منفرد
وزن مخصوص	۰.۹۵	۰.۵۲
قطر (D) یا عرض (W) (mm)	۰.۳	۳
ضخامت (mm)	۰.۳	۰.۰۱
جذب آب	صفر	صفر
مقاومت در برابر اسید و باز	عالی	عالی
مقاومت کششی (MPa)	۴۰۰	۱۳۰۰
مدول الاستیسیته (MPa)	۳۰۰۰	۷۰۰۰

پ- آهک

آهک مورد استفاده از نوع هیدراته و با درصدهای وزنی ۵، ۸ و ۱۰٪ انتخاب، و همچنین مقادیر اسیدیته (pH) و وزن مخصوص آهک نیز به ترتیب برابر ۱۲/۹ و ۲/۳۵ اندازه‌گیری شد.

ت- سیمان

سیمان مورد استفاده از نوع پرتلند تیپ ۱ و با درصدهای وزنی ۵، ۸ و ۱۰٪ انتخاب شد. همچنین غلظت نرمال، زمان گیرش اولیه و نهایی سیمان به ترتیب برابر ۲۴/۴، ۹۵ min و ۱۴۵ min اندازه‌گیری شد.

ث- آب

آب مورد استفاده از نوع شرب بوده و مقادیر اسیدیته (pH)، هدایت الکتریکی (EC)، غلظت یون کلر (Cl) و غلظت یون‌های کلسیم و منیزیم (Ca^{2+} - Mg^{2+}) آن به ترتیب برابر

۲-۲- روش انجام آزمایش

برای تهیه نمونه‌های آزمایشی ابتدا آزمایش تراکم استاندارد روی مخلوط‌های خاک-الیاف، خاک-آهک و خاک-سیمان انجام و منحنی استاندارد تراکم برای آن‌ها تعیین شد. سپس با انتخاب نقطه‌ای روی شاخه خشک منحنی استاندارد تراکم (درصد رطوبت آن ۵٪ کمتر از شرایط بهینه) اقدام به ساخت نمونه‌ها به روش استاتیکی شد. نمونه‌ها در یک قالب مخصوص تحت سرعت بارگذاری ثابت ۱/۵ mm/min در یک دستگاه بارگذاری ویژه در سه لایه تهیه شد. فشار وارد شده به هر لایه یکسان و طوری محاسبه شد که وزن واحد حجم خشک و درصد رطوبت نمونه ساخته شده معادل نقطه انتخابی روی شاخه خشک منحنی استاندارد تراکم مربوطه شد. نمونه‌های تهیه شده از این روش دارای ابعادی معادل قالب دستگاه تحکیم مورد استفاده (ارتفاع ۲ سانتی‌متر و قطر ۷/۵ سانتی‌متر) است. نگهداری نمونه‌های خاک-آهک مطابق با روش Cai و همکاران [۱۳]، نمونه‌ها درون کیسه‌های پلاستیکی سربسته در دمای ۲۰^oC نگهداری و پس از ۳ و ۷ روز مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین برای نگهداری نمونه‌های خاک-سیمان نیز به طور مشابه عمل شد. آزمایش تورم آزاد و فشار تورمی مطابق با استاندارد ASTM-D-4546 در دستگاه تحکیم بر روی نمونه‌های گوناگون تهیه شده صورت پذیرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمایشگاهی

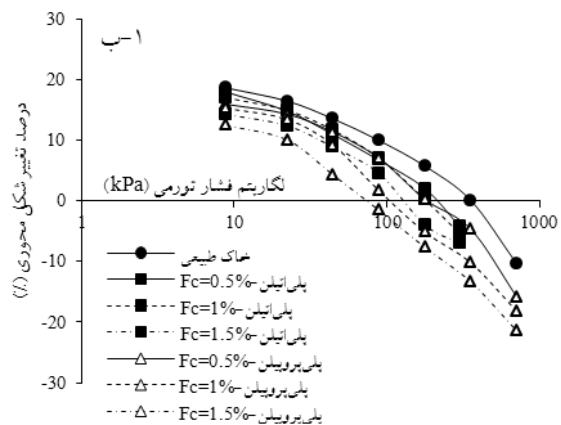
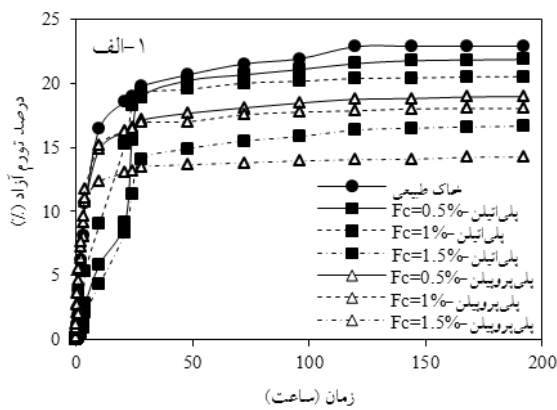
الف- الیاف مصنوعی

شکل (۱) نمونه‌ای از نتایج آزمایشگاهی تعیین درصد تورم آزاد و فشار تورمی برای نمونه‌های تهیه شده با

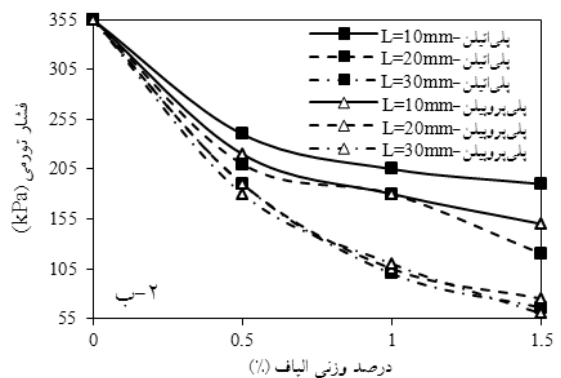
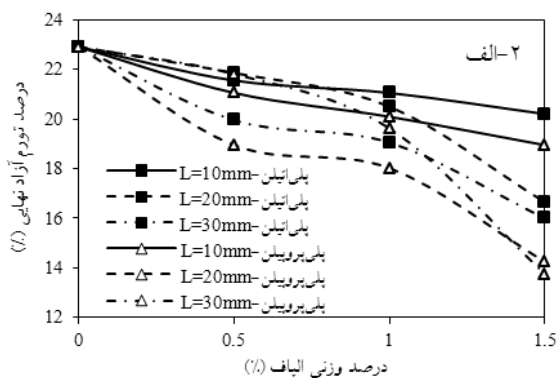
نیز موجب کاهش تورم می‌شود. میزان کاهش تورم آزاد و فشار تورمی تابعی از درصد وزنی و طول الیاف مورد استفاده است. علاوه بر آن با توجه به نتایج استفاده از الیاف نواری در کاهش پتانسیل تورمی خاک تأثیرگذارتر از الیاف میله‌ای است.

کاهش در پتانسیل تورمی خاک در اثر افزودن الیاف را می‌توان چنین تفسیر کرد که وقوع تورم در یک خاک مسلح شده موجب قوسی شکل شدن الیاف و ایجاد نیروی کششی مقاوم در آن‌ها می‌شود. مؤلفه قائم نیروی یاد شده عاملی برای مقابله با نیروی ناشی از پدیده تورم است به طوری که افزایش نیروی مقاوم کششی موجب کاهش پتانسیل تورمی خاک می‌شود.

درصد‌های وزنی و طولی گوناگون دو نوع الیاف میله‌ای و نواری را نشان می‌دهد. شکل‌های (۱-الف) و (۱-ب) به ترتیب نشان دهنده منحنی‌های تورم آزاد و فشار تورمی برای نمونه خاک طبیعی و نمونه‌های مسلح شده با الیاف به ازای یک طول مشخص (۲۰ mm) است. مجموعه نتایج به دست آمده از آزمایش تورم آزاد و فشار تورمی و مقایسه آن‌ها به ترتیب در شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب) قابل مشاهده است. نتایج نشان داد که افزودن الیاف به خاک موجب کاهش پتانسیل تورمی آن می‌شود، به طوری که به ازای یک درصد وزنی مشخص با افزایش طول الیاف میزان تورم آزاد و فشار تورمی کاهش می‌یابند. همچنین در یک طول مشخص، افزایش درصد وزنی الیاف

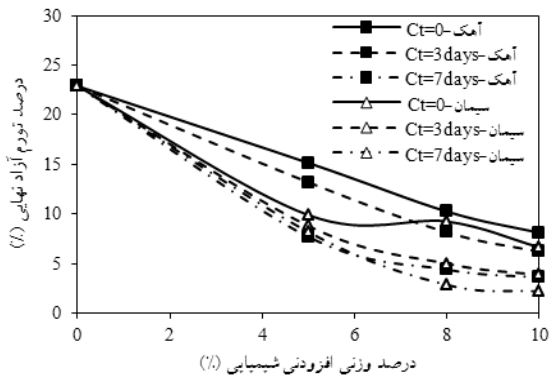


شکل (۱) منحنی تورم آزاد (الف) و فشار تورمی (ب) برای نمونه‌های مسلح شده تصادفی با الیاف مصنوعی به ازای ۲۰ میلی‌متر طول الیاف



شکل (۲) مقایسه میزان تورم آزاد نهایی (الف) و میزان فشار تورمی (ب) برای نمونه‌های مسلح شده تصادفی با الیاف مصنوعی

بهره‌گیری از تحلیل رگرسیونی و مدل‌سازی ریاضی به بررسی ارتباط بین متغیرهای مؤثر در خاک‌های مسلح شده تصادفی با الیاف پرداخته‌اند.



شکل (۳) مقایسه میزان تورم آزاد نهایی برای نمونه‌های مختلف بهسازی شده با آهک و سیمان

در این پژوهش برای پیش‌بینی و تعیین منحنی تورم آزاد برای خاک طبیعی و خاک بهسازی شده با الیاف مصنوعی و افزودنی‌های شیمیایی از یک مدل رگرسیونی چندگانه غیرخطی استفاده شد. معادله پیشنهادی مورد استفاده برای پیش‌بینی و تعیین منحنی تورم آزاد از نوع تابع هموگرافیک انتخاب شد. شکل عمومی معادله پیشنهادی به شرح زیر است:

$$S(\%) = \frac{a \times t}{b + t} \quad (1)$$

که در آن S متغیر وابسته (میزان تورم آزاد بر حسب درصد)، t متغیر مستقل (زمان تورم بر حسب ساعت) و a و b ضرایب رگرسیون (ضرایب معادله تورم) است.

ضرایب رگرسیون (a و b) خود تابعی از ویژگی‌های فیزیکی الیاف و ماده شیمیایی در نظر گرفته شد، به گونه‌ای که برای تعیین آن‌ها از مدل‌های رگرسیونی چندگانه مجزا استفاده شد. چند جمله‌ای‌های مورد استفاده برای تعیین ضرایب رگرسیون (a و b) دو متغیره و از نوع درجه دو انتخاب و شکل عمومی آن‌ها به شرح زیر است:

افزایش در میزان نیروی مقاوم کششی را می‌توان در ارتباط با سطح تماس بین الیاف و ذرات خاک دانست به طوری که در یک طول مشخص الیاف، افزایش درصد وزنی الیاف مورد استفاده موجب افزایش سطح تماس الیاف با ذرات خاک و در نتیجه کاهش پتانسیل تورمی خاک می‌شود. همچنین الیاف نواری به دلیل سطح جانبی بزرگتر و در نتیجه سطح تماس بیشتر با ذرات خاک در کاهش پتانسیل تورمی مؤثرتر است.

ب- آهک و سیمان

مجموعه نتایج آزمایشگاهی تعیین درصد تورم آزاد و مقایسه آن‌ها برای نمونه‌های بهسازی شده با آهک و سیمان در شکل (۳) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که به ازای یک زمان عمل‌آوری مشخص افزایش در مقدار ماده تثبیت کننده سبب کاهش پتانسیل تورمی خاک می‌شود. همچنین در یک درصد وزنی مشخص، با افزایش زمان عمل‌آوری تورم کاهش می‌یابد. همچنین استفاده از سیمان در کاهش پتانسیل تورمی تأثیرگذارتر از آهک است.

عوامل متعددی در خصوص سازوکار اثر آهک و سیمان بر خواص خاک‌های رسی وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به تبادل یونی و فولکوله شدن ساختمان خاک اشاره نمود. در مرحله تبادل یونی خاصیت خمیریایی خاک کاهش و در مرحله فولکولاسیون نیز یکسری واکنش شیمیایی بین آهک یا سیمان و رس به وجود می‌آید که طی آن ذرات ریز خاک به یکدیگر چسبیده و ذرات درشت‌تری را به وجود می‌آورند که به موجب آن سطح ویژه ذرات کاهش و در نتیجه قدرت جذب آب به وسیله ذرات و قدرت تورمی خاک کاهش می‌یابد.

۳-۲- تحلیل آماری

۳-۲-۱- منحنی تورم آزاد

پژوهشگران مختلف از جمله و Ranjan همکاران [۱۴] با

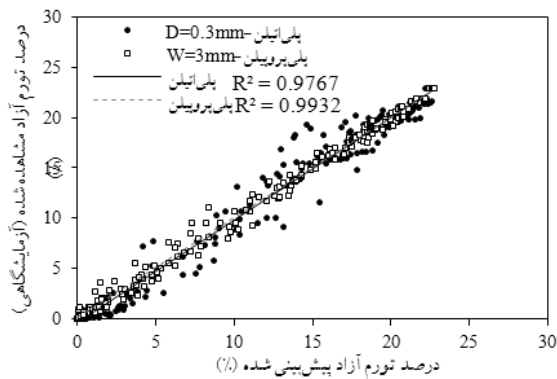
(mm) و L طول الیاف مورد استفاده (mm) است.

برای بررسی صحت و دقت مدل‌های رگرسیونی پیشنهادی لازم است تا ضریب تعیین (R^2) و خطای جذر میانگین مربعات نرمال ($RMSE_N$) محاسبه و مورد ارزیابی قرار گیرند. برای محاسبه خطای جذر میانگین مربعات نرمال از رابطه (۸) به شرح زیر استفاده شد:

$$RMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{io} - X_{im})^2}{n}}}{X_{MAXO} - X_{MINO}} \quad (8)$$

که در آن $RMSE_N$ خطای جذر میانگین مربعات نرمال (%)، $RMSE$ خطای جذر میانگین مربعات، X_{io} داده مشاهده شده (آزمایشگاهی)، X_{im} داده پیش‌بینی شده (مدل)، n تعداد داده‌ها، X_{MAXO} داده بیشینه مشاهده شده و X_{MINO} داده حداقل مشاهده شده می‌باشد.

شکل (۴) میزان درصد تورم مشاهده شده و پیش‌بینی شده برای الیاف پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن را در مقابل یکدیگر نشان می‌دهد.



شکل (۴) درصد تورم آزاد مشاهده شده در مقابل پیش‌بینی شده برای نمونه‌های مسلح شده با الیاف نواری و میله‌ای

ضریب تعیین (R^2) برای الیاف پلی‌اتیلن ۰/۹۷۶ و برای الیاف پلی‌پروپیلن ۰/۹۹۳ می‌باشد که نشان دهنده همبستگی بالا بین مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده می‌باشد. همچنین مقدار خطای جذر میانگین مربعات نرمال

$$a = |\alpha_0 + \alpha_1 X_1^2 + \alpha_2 X_2^2 + \alpha_3 X_1 + \alpha_4 X_2 + \alpha_5 X_1 X_2| \quad (2)$$

$$b = |\beta_0 + \beta_1 X_1^2 + \beta_2 X_2^2 + \beta_3 X_1 + \beta_4 X_2 + \beta_5 X_1 X_2| \quad (3)$$

که در آن‌ها X_1 درصد وزنی الیاف یا افزودنی شیمیایی مورد استفاده (%) و X_2 نسبت طول به قطر (عرض برای الیاف نواری) الیاف مورد استفاده یا زمان عمل‌آوری نمونه بهسازی شده با افزودنی شیمیایی است.

الف- الیاف مصنوعی

براساس ۲۰۹ داده آزمایشگاهی مشاهده شده برای الیاف میله‌ای پلی‌اتیلن و ۲۲۳ مورد برای الیاف نواری پلی‌پروپیلن ضرایب رگرسیون (a و b) مطابق با معادله (۱) محاسبه شد. سپس با استفاده از ضرایب رگرسیون حاصل مطابق با معادلات (۲) و (۳) اقدام به توسعه مدل‌های چندگانه دو متغیره و از نوع درجه دو برای ضرایب رگرسیونی (a و b) گردید. نهایتاً معادلات (۴) و (۵) برای الیاف پلی‌اتیلن و (۶) و (۷) برای الیاف پلی‌پروپیلن برای تعیین ضرایب معادله تورم به شرح زیر استخراج شد:

$$a = \left| -0.00040625 - 0.021F_c^2 - 2.4799\left(\frac{L}{D}\right)^2 + 0.0751F_c - 0.066\left(\frac{L}{D}\right) + 23.0811F_c\left(\frac{L}{D}\right) \right| \quad (4)$$

$$b = \left| -0.0031269 + 0.0692F_c^2 - 37.2391\left(\frac{L}{D}\right)^2 + 0.5835F_c + 17.4691\left(\frac{L}{D}\right) + 4.873F_c\left(\frac{L}{D}\right) \right| \quad (5)$$

$$a = \left| 0.1991 - 0.9515F_c^2 + 9.4812\left(\frac{L}{W}\right)^2 - 2.02F_c - 3.9894\left(\frac{L}{W}\right) + 23.4208F_c\left(\frac{L}{W}\right) \right| \quad (6)$$

$$b = \left| 0.0963 - 0.69F_c^2 + 0.8011\left(\frac{L}{W}\right)^2 - 0.7738F_c + 1.8616\left(\frac{L}{W}\right) 5.3625F_c\left(\frac{L}{W}\right) \right| \quad (7)$$

که در آن‌ها F_c درصد وزنی الیاف مورد استفاده (%)، D قطر الیاف پلی‌اتیلن (mm)، W عرض (پهنای) الیاف پلی‌پروپیلن

همچنین مقدار خطای جذر میانگین مربعات نرمال $(RMSE_N)$ برای الیاف پلی اتیلن و پلی پروپیلن به ترتیب برابر $15/15\%$ و $2/2\%$ محاسبه گردید که بیانگر دقت و صحت مطلوب و قابل قبول مدل ارائه شده می باشد. برای تعیین درصد اهمیت متغیرهای ورودی (درصد وزنی و نسبت طول به قطر (عرض) الیاف) در تعیین میزان تورم آزاد نهایی به مقایسه و تحلیل عناصر ماتریس همبستگی بر اساس خروجی های حاصل از مدل (رابطه ۹) می پردازیم. جدول (۳) ماتریس همبستگی متغیرهای مؤثر در تعیین درصد تورم آزاد نهایی برای الیاف پلی اتیلن و پلی پروپیلن را نشان می دهد.

جدول (۳) ماتریس همبستگی متغیرهای مؤثر در تعیین درصد تورم آزاد نهایی برای الیاف میله ای پلی اتیلن و نواری پلی پروپیلن

الیاف میله ای پلی اتیلن (D=0.3mm)			
	F_C	L/D	S_F
F_C	1	-	-
L/D	0.375	1	-
S_F	-0.8926	-0.48507	1
الیاف نواری پلی پروپیلن (W=3mm)			
	F_C	L/W	S_F
F_C	1	-	-
L/W	0.375	1	-
S_F	-0.81939	-0.51033	1

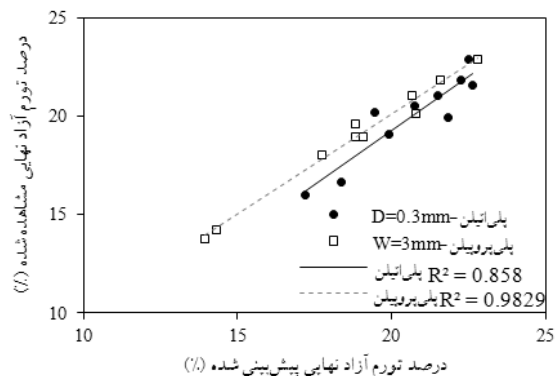
با بررسی جدول (۳) در می یابیم که همبستگی S_F (درصد تورم آزاد نهایی) با F_C (درصد وزنی الیاف) و L/D یا L/W (نسبت طول به قطر یا عرض الیاف) همواره برای هر دو نوع الیاف منفی می باشد، این موضوع بیانگر آن است که روند تغییرات S_F با افزایش F_C و L/D یا L/W نزولی می باشد. بعلاوه مشاهده می شود که مقدار همبستگی S_F با F_C به لحاظ عددی بیشتر می باشد که نشان دهنده آن است که افزایش درصد وزنی الیاف در کاهش میزان پتانسیل تورمی خاک مسلح شده نسبت به ابعاد الیاف مؤثرتر می باشد. بر اساس اعداد موجود در جدول (۳) می توان با

$(RMSE_N)$ برای الیاف پلی اتیلن برابر $5/85\%$ و برای الیاف پلی پروپیلن برابر $2/81\%$ محاسبه گردید که بیانگر میزان خطای کم و قابل قبول برای مدل های ارائه شده می باشد. برای تخمین میزان تورم آزاد نهایی بر اساس رابطه پیشنهادی (۱) تنها کافی است پس از محاسبه ضرایب معادله تورم (a و b) مقدار زمان تورم نهایی در رابطه (۱) قرار گیرد. زمان تورم نهایی برای کلیه نمونه های آزمایشی مسلح شده با الیاف معادل ۱۹۲ ساعت اندازه گیری گردید. در نتیجه جهت تعیین میزان تورم آزاد نهایی می توان از رابطه (۹) به شرح زیر استفاده کرد:

$$S_F(\%) = \frac{a \times 192}{b + 192} \quad (9)$$

که در آن S_F میزان تورم آزاد نهایی (%). و a و b ضرایب معادله تورم می باشند که بر اساس معادلات (۴) الی (۷) محاسبه می گردند.

شکل (۵) نتایج مشاهده شده و پیش بینی شده برای میزان تورم آزاد نهایی را برای الیاف پلی اتیلن و پلی پروپیلن در مقابل یکدیگر نشان می دهد.



شکل (۵) درصد تورم آزاد نهایی مشاهده شده در مقابل پیش بینی شده برای نمونه های مسلح شده با الیاف نواری و میله ای

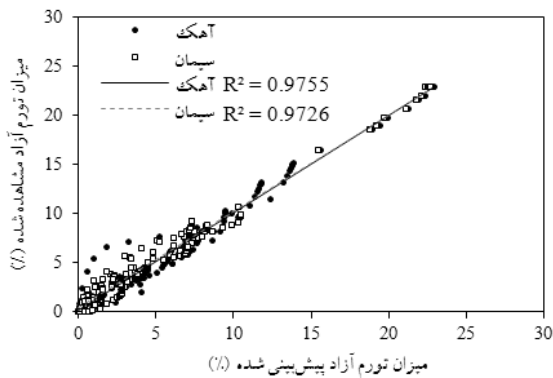
ضریب تعیین (R^2) برای الیاف پلی اتیلن برابر $858/0$ و برای الیاف پلی پروپیلن برابر $9829/0$ می باشد که بیانگر همبستگی قابل قبول بین داده های مشاهده شده و پیش بینی شده است.

$$a = |23.2848 + 0.1856C_C^2 + 0.0779C_t^2 - 3.4805C_C - 0.6408C_t - 0.0679C_C C_t| \quad (13)$$

$$b = |5.06 + 0.0825C_C^2 + 0.0154C_t^2 - 1.3168C_C - 0.1839C_t + 0.0155C_C C_t| \quad (14)$$

که در آن‌ها L_C درصد وزنی آهک مورد استفاده (%).، C_t زمان عمل‌آوری نمونه‌های آزمایشی (آنی، ۳ و ۷ روزه) و C_C درصد وزنی سیمان استفاده شده (%). می‌باشد.

شکل (۶) درصد تورم مشاهده شده و پیش‌بینی شده برای نمونه‌های بهسازی شده با آهک و سیمان را در مقابل یکدیگر نشان می‌دهد.



شکل (۶) درصد تورم آزاد مشاهده شده در مقابل پیش‌بینی شده برای نمونه‌های بهسازی شده با آهک و سیمان

ضرایب تعیین (R^2) برای آهک و سیمان به ترتیب برابر ۰/۹۷۵ و ۰/۹۷۲ می‌باشد. همچنین مقدار خطای جذر میانگین مربعات ($RMSE_N$) نرمال برای آهک و سیمان به ترتیب ۳/۸۵ و ۳/۷۶٪ محاسبه گردید. در تحقیق حاضر نمونه‌های بهسازی شده با آهک دارای زمان تورم نهایی یکسان نبوده و در نمونه‌های ۷ روزه زمان تورم نهایی برابر ۲۴۰ ساعت و در سایر نمونه‌ها ۲۱۶ ساعت اندازه‌گیری گردید. بعلاوه زمان تورم نهایی برای نمونه‌های بهسازی شده با سیمان ۲۱۶ ساعت اندازه‌گیری گردید. با جایگذاری زمان تورم نهایی در معادله (۱) و محاسبه ضرایب معادله تورم (a و b) با توجه به معادلات (۱۱) الی (۱۴) میزان

رابطه پیشنهادی زیر درصد اهمیت هر پارامتر در تعیین میزان تورم آزاد نهایی را محاسبه کرد:

$$IMP_x = \frac{\rho_{ZX}}{\rho_{ZX} + \rho_{ZY}} \times 100 \quad (10)$$

که در آن IMP_x درصد اهمیت متغیر مستقل x (برای مثال درصد وزنی الیاف) در تخمین متغیر وابسته z (میزان تورم آزاد نهایی)، ρ_{zx} همبستگی z نسبت به x و ρ_{zy} همبستگی z نسبت به متغیر مستقل y (برای مثال نسبت قطر یا عرض الیاف به طول آن) می‌باشد.

جدول (۴) درصد اهمیت پارامترهای درصد وزنی و نسبت قطر یا عرض الیاف به طول آن را در تعیین درصد تورم آزاد نهایی نشان می‌دهد.

جدول (۴) درصد اهمیت پارامترهای مؤثر در تعیین درصد تورم آزاد نهایی برای الیاف میله‌ای پلی‌اتیلن و نواری پلی‌پروپیلن

(W=3mm) پلی‌پروپیلن		(D=0.3mm) پلی‌اتیلن	
ρ_{LW}	ρ_{Fc}	ρ_{LD}	ρ_{Fc}
-0.51033	-0.81939	-0.48507	-0.8926
IMP_{LW}	IMP_{Fc}	IMP_{LD}	IMP_{Fc}
38.37%	61.63%	35.2%	64.8%

ب- آهک و سیمان

بر اساس ۱۹۴ داده آزمایشگاهی مشاهده شده برای نمونه‌های بهسازی شده با آهک و ۱۹۱ مورد برای سیمان، ضرایب رگرسیونی (a و b) مطابق با معادله (۱) استخراج گردید. سپس با استفاده از ضرایب رگرسیون حاصل مطابق با معادلات (۲) و (۳) اقدام به توسعه مدل‌های چندگانه دو متغیره و از نوع درجه دو برای ضرایب رگرسیونی (a و b) گردید. نهایتاً معادلات (۱۱) و (۱۲) برای آهک و (۱۳) و (۱۴) برای سیمان به شرح زیر استخراج گردید:

$$a = |23.4956 + 0.0474L_C^2 - 0.0681C_t^2 - 2.1154L_C - 0.9267C_t + 0.0862L_C C_t| \quad (11)$$

$$b = |5.0593 + 0.0127L_C^2 - 0.00208C_t^2 - 0.3982L_C - 2.737C_t + 0.5899L_C C_t| \quad (12)$$

(C_t) منفی می‌باشد که بیانگر کاهش میزان تورم آزاد نهایی با افزایش درصد وزنی و زمان عمل آوری می‌باشد. با استفاده از رابطه (۱۰) درصد اهمیت پارامترهای مؤثر در تعیین میزان تورم آزاد نهایی محاسبه گردید که نتایج آن در جدول (۶) نشان داده شده است.

جدول (۶) درصد اهمیت پارامترهای مؤثر در تعیین درصد تورم آزاد نهایی برای نمونه‌های بهسازی شده با آهک و سیمان

سیمان		آهک	
ρ_{C_t}	ρ_{C_c}	ρ_{C_t}	ρ_{L_c}
-0.51033	-0.81939	-0.50492	-0.82003
IMP _{C_t}	IMP _{C_c}	IMP _{C_t}	IMP _{L_c}
39.95%	60.05%	38.10%	61.9%

۳-۲-۲- فشار تورمی

معادله رگرسیونی چندگانه با دو متغیر و از نوع درجه دو جهت پیش‌بینی فشار تورمی به صورت تابعی از درصد وزنی الیاف و نسبت طول به قطر (عرض) الیاف نمونه مسلح شده با الیاف انتخاب گردید. بر اساس داده‌های آزمایشگاهی معادله (۱۵) برای الیاف پلی‌اتیلن و معادله (۱۶) برای الیاف پلی‌پروپیلن به شرح زیر استخراج گردید:

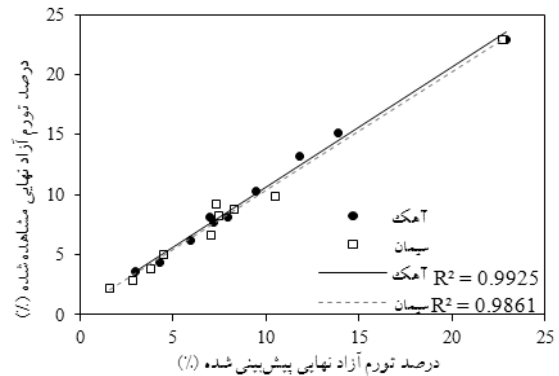
$$P = \left| 350.9114 + 57.9241F_C^2 + 0.001783\left(\frac{L}{D}\right)^2 - 148.9283F_C - 0.8089\left(\frac{L}{D}\right) - 0.8647F_C\left(\frac{L}{D}\right) \right| \quad (15)$$

$$P = \left| 357.3101 + 41.2658F_C^2 + 2.0535\left(\frac{L}{W}\right)^2 - 123.4177F_C - 28.2627\left(\frac{L}{W}\right) - 8.8861F_C\left(\frac{L}{W}\right) \right| \quad (16)$$

که در آن‌ها P فشار تورمی (kPa) می‌باشد.

شکل (۸) فشار تورمی مشاهده شده و پیش‌بینی شده را برای الیاف پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن در مقابل یکدیگر نشان می‌دهد. ضریب تعیین (R²) برای الیاف پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن به ترتیب برابر ۰/۹۸۴ و ۰/۹۹۳ می‌باشد.

تورم آزاد نهایی برای نمونه‌های بهسازی شده با آهک و سیمان محاسبه گردید. شکل (۷) نتایج مشاهده شده و پیش‌بینی شده برای تورم آزاد نهایی آهک و سیمان را در مقابل یکدیگر نشان می‌دهد.



شکل (۷) درصد تورم آزاد نهایی مشاهده شده در مقابل پیش‌بینی شده برای نمونه‌های بهسازی شده با آهک و سیمان

ضریب تعیین (R²) برای آهک ۰/۹۹۲ و برای سیمان ۰/۹۸۶ می‌باشد. همچنین خطای جذر میانگین مربعات نرمال (RMSE_N) برای آهک ۰/۴/۰۷ و برای سیمان ۰/۳/۶۷ محاسبه گردید. جدول (۵) ماتریس همبستگی متغیرهای مؤثر در تعیین میزان تورم آزاد نهایی برای نمونه‌های بهسازی شده با آهک و سیمان را نشان می‌دهد.

جدول (۵) ماتریس همبستگی متغیرهای مؤثر در تعیین درصد تورم آزاد نهایی برای نمونه‌های بهسازی شده با آهک و سیمان

آهک			
	L _C	C _t	S _F
L _C	1	-	-
C _t	0.858301	1	-
S _F	-0.82003	-0.50492	1
سیمان			
	C _C	C _t	S _F
L _C	1	-	-
C _t	0.858301	1	-
S _F	-0.89023	-0.59218	1

مطابق با جدول همبستگی درصد تورم آزاد نهایی (S_F) با درصد وزنی آهک یا سیمان (L_C یا C_C) و زمان عمل آوری

الیاف (F_c) و نسبت طول به قطر (عرض) الیاف (L/D) یا (L/W) منفی بوده که بیانگر کاهش فشار تورمی با افزایش درصد وزنی و نسبت طول به قطر (عرض) الیاف می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل آماری آن‌ها، نتایج زیر قابل استخراج است:

۱- مسلح سازی خاک با الیاف مصنوعی موجب کاهش تورم آزاد و فشار تورمی خاک متورم شونده می‌گردد. این کاهش تابعی از درصد وزنی و طول الیاف مورد استفاده می‌باشد. علاوه بر آن الیاف نواری در کاهش پتانسیل تورمی نسبت به الیاف میله‌ای مؤثرتر می‌باشد.

۲- بهسازی با افزودنی‌های شیمیایی موجب کاهش بسیار قابل ملاحظه در پتانسیل تورمی خاک می‌گردد. این کاهش تابعی از درصد وزنی ماده شیمیایی و زمان عمل‌آوری آن می‌باشد. علاوه بر آن سیمان در کاهش پتانسیل تورمی خاک نسبت به آهک مؤثرتر می‌باشد.

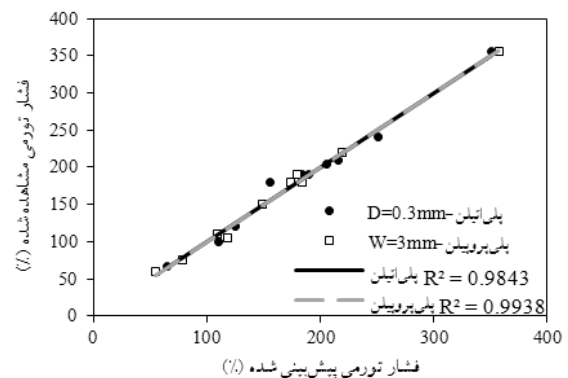
۳- مدل‌های رگرسیونی چندگانه پیشنهادی برای تعیین و پیش‌بینی منحنی تورم آزاد، میزان تورم آزاد نهایی و فشار تورمی از همبستگی بالا و دقت کافی برخوردار بوده و به کمک آن‌ها می‌توان به استخراج درصد اهمیت متغیرهای مؤثر در پدیده تورم اقدام نمود. نتایج حاصل از معادلات پیشنهادی نشان داد که کاهش در پتانسیل تورمی خاک متورم شونده بیشتر تابعی از درصد وزنی الیاف یا ماده شیمیایی می‌باشد.

۶- مراجع

[1] Jones, D. E. and Holtz, W. G., "Expansive soils-the hidden disaster", Civil Engineering ASCE, 87-89, 1973.

همچنین مقدار خطای جذر میانگین مربعات نرمال ($RMSE_N$) نیز برای الیاف پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن به ترتیب برابر $۲/۳۱\%$ و $۲/۱۷\%$ می‌باشد.

برای تعیین درصد اهمیت متغیرهای مؤثر در تعیین میزان فشار تورمی ماتریس همبستگی (جدول ۷) محاسبه و با استفاده از رابطه (۱۰) اقدام به تعیین درصد اهمیت هریک از متغیرهای مستقل گردید که در جدول (۸) قابل مشاهده است.



شکل (۸) فشار تورمی مشاهده شده در مقابل فشار تورمی پیش‌بینی شده برای نمونه‌های مسلح شده با الیاف

جدول (۷) ماتریس همبستگی متغیرهای مؤثر در تعیین فشار تورمی

برای الیاف میله‌ای پلی‌اتیلن و نواری پلی‌پروپیلن

الیاف میله‌ای پلی‌اتیلن ($D=0.3mm$)

	F_c	L/D	P
F_c	1	-	-
L/D	0.375	1	-
P	-0.80984	-0.82998	1

الیاف نواری پلی‌پروپیلن ($W=3mm$)

	F_c	L/W	P
F_c	1	-	-
L/W	0.375	1	-
P	-0.86883	-0.73661	1

جدول (۸) درصد اهمیت پارامترهای مؤثر در تعیین فشار تورمی برای

الیاف میله‌ای پلی‌اتیلن و نواری پلی‌پروپیلن

پلی‌پروپیلن ($W=3mm$)		پلی‌اتیلن ($D=0.3mm$)	
$\rho_{L/W}$	ρ_{F_c}	$\rho_{L/D}$	ρ_{F_c}
-0.73661	-0.86883	-0.82998	-0.80984
$IMP_{L/W}$	IMP_{F_c}	$IMP_{L/D}$	IMP_{F_c}
45.88%	54.12%	50.6%	49.4%

مطابق با جدول همبستگی فشار تورمی (P) با درصد وزنی

- [14] Ranjan, G., Vasan, R. M., "Probabilistic analysis of randomly distributed fiber-reinforced soil", *Journal of Geotechnical Engineering*, 419-426, 1996.
- [2] 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), 681-687, 2005.
- [3] Sezer, A., Inan, G., Yilmaz., H. R. and Ramyar, K., "Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmin clay", *Building Environment* 41(2), 150-155, 2006.
- [4] Dash, S. K. and Hussain, M., "Lime stabilization of soil: Reappraisal", *Journal of Material in Civil Engineering* 24(6), 707-714, 2012.
- [5] Estabragh, A. R., Beytollahpour, I. and Javadi, A. A., "Effect of resin on strength of soil-cement mixture", *Journal of Material in Civil Engineering* 23(2), 969-976, 2011.
- [6] Kumar, A., Walia, B. S. and Bajaaj, A., "Influence of fly ash, lime and polyester fibers on compacted and strength properties of expansive soil", *Journal of Material in Civil Engineering* 19(3), 242-248, 2007.
- [7] Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F. and Cai, Y., "Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil", *Geotextiles and Geomembranes* 25(3), 194-202, 2007.
- [8] Attom, M. F., Al-Akhras, N. M. and Malkawi, A. I. H., "Effect of fibers on the mechanical properties of clayey soil", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering* 162(5), 277-282, 2009.
- [9] Ayyar, T. S. R., Krishnaswamy, N. R. and Viswanadham, B. V. S., "Geosynthetics for foundations on swelling clay", In: *Proceedings of International Workshop on Geotextiles, Bangalore, India* 23(2), 176-180, 1989.
- [10] Al-Akhras, N. M., Attom, M. F., Al-Akhras, K. M. and Malkawi, A. I. H., "Influence of fibers on swelling properties of clayey soil", *Geosynthetics International* 15(4), 304-309, 2008.
- [11] Viswanadham, B. V. S., Phanikumar, B. R. and Mukherjee, R. V., "Swelling behavior of a geofiber-reinforced expansive soil", *Geotextiles and Geomembranes* 27, 73-76, 2009.
- [12] Cai, Y., Shi, B., Ng, C. W. W. and Tang, C., "Effect of polypropylene fiber and lime admixture on engineering properties of clayey soil", *Engineering Geology* 87(3-4), 230-240, 2006.
- [13] McKeen, R. G., "A model for predicting expansive soil behavior", In: *Proceedings of the 7th International Conference on expansive soils, August, Dallas, USA*, 1-6, 1992.

((Research Note))

Experimental and statistical assessment of expansive soil treatment using artificial fiber and chemical stabilizer

M. Khatibi^{1*}, A. Soltani², A. R. Estabragh³

1- M.Sc. student of Hydraulic Structures Engineering – University of Tehran

2- M.Sc. student of Hydraulic Structures Engineering – University of Tehran

3- Associate Professor of Geotechnical Engineering – University of Tehran

mehdi.khatibi@ut.ac.ir

Abstract:

Expansive soils are found in many parts of the world particularly in arid and semi-arid regions. They are considered a worldwide problem as they cause extensive damage to civil engineering structures. As a result, a clear understanding of the behavior of such soils is required for the effective design of structures and infrastructures on these soils. Researchers have demonstrated various methods to reduce expansive soils swelling potential, with one being soil treatment.

In this paper an experimental program was developed to study the treatment of an expansive soil using mechanical and chemical techniques. Two different types of artificial fiber consisting of polyethylene (bar shaped) with a diameter of 0.3 mm and polypropylene (tape shaped) with a width of 3 mm were used in order to randomly reinforce soil samples with various fiber contents of 0.5 %, 1 % and 1.5 %; and fiber lengths of 10, 20 and 30 mm. Chemical treatment was carried on using lime and cement as soil stabilizers with various percentages of 5 %, 8 % and 10 %; for curing times of immediate, 3 and 7 days. A total of 37 (36 treated and 1 untreated) uniform and repeatable moist-compacted soil samples were prepared by static compaction at a chosen moisture content and dry density less than the optimum water content and maximum dry density from standard proctor compaction tests. Free swelling and swelling pressure tests were conducted using a one-dimensional oedometer apparatus in order to determine swelling potential of various treated soil samples. In addition multiple regression equations with 3 and 2 independent variables were developed based on experimental results. The proposed multiple regression equations present an understanding of the variation of free swelling and swelling pressure as a function of swelling time, fiber or chemical stabilizer content and fiber aspect ratio (fiber length divided to fibers diameter or width) or curing time for various values.

Experimental results and statistical analysis indicated that soil treatment with artificial fibers and chemical stabilizers can indeed reduce swelling potential in expansive soils. Reduction of free swelling and swelling pressure in samples randomly reinforced with artificial fiber was seen to be dependent on fiber content, fiber length and fiber shape, where tape shaped fibers showed more reduction in free swelling and swelling pressure thus being more effective compare to bar shaped fibers. Furthermore reduction of free swelling in samples treated with chemical stabilizers were seen to be a function of percentage of chemical stabilizer and curing time with cement showing to be more effective compare to lime. In addition chemical stabilizers proved to be more effective in reducing soils swelling potential compare to artificial fibers. The suggested regression equations can predict and estimate the free swelling curve, final free swelling and swelling pressure for various swelling time, fiber or chemical stabilizer content and fiber aspect ratio or chemical stabilizer curing time with accuracy and a high degree of agreement between experimental and predicted values. Also, the regression equations can aid the performance of a sensitivity analysis which indicates the importance of each independent variable (fiber or chemical stabilizer content, fiber aspect ratio or chemical stabilizer curing time) in estimating final free swelling and swelling pressure.

Keywords: Expansive soils, artificial fiber, chemical stabilizer, free swelling, swelling pressure, multiple regression.