

استفاده از مدل رگرسیونی در بررسی تأثیر الیاف مصنوعی بر مقاومت فشاری و کششی نهایی مخلوط خاک

سیمان

مژده لاهوری^۱، محمود بابالار^۲، علی رئیسی استبرق^۳، صادق رنجبری^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۳. دانشیار دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۴. کارشناس ارشد دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۱۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۱۱/۱۰)

چکیده

در این تحقیق مسلح سازی تصادفی خاک و خاک-سیمان با درصد‌های وزنی مختلف الیاف، سیمان و طول‌های مختلف الیاف مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های آزمایشگاهی با استفاده از روش تراکم استاتیکی تهیه گردیدند. آزمایش مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها در زمان عمل‌آوری مختلف انجام گردید. همچنین یک مدل رگرسیونی چند متغیره بر اساس داده‌های حاصل از آزمایش‌ها برای پیش‌بینی مقاومت‌های فشاری و کششی ارائه شده و روابط تحلیل حساسیت جهت بررسی اثر هر کدام از متغیرها تدوین گردید. نتایج نشان داد که مسلح سازی خاک و خاک-سیمان موجب افزایش مقاومت فشاری و کششی می‌گردد و این افزایش تابعی از درصد وزنی الیاف، طول الیاف، درصد وزنی سیمان و زمان عمل‌آوری است لیکن طول الیاف تا یک مقدار مشخصی موجب افزایش مقاومت می‌گردد و پس از آن تأثیر ناچیزی را در افزایش مقاومت دارا می‌باشد. مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و مدل سازی شده دلالت بر همبستگی قابل قبولی بین آن‌ها دارد.

واژه‌های کلیدی: مسلح سازی خاک، خاک-سیمان-الیاف، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدل رگرسیونی، تحلیل حساسیت

مقدمه

افزودن سیمان به خاک‌های ریزدانه (سیلت یا رس) موجب بهبود خواص آن‌ها می‌گردد و محصول تولیدشده تحت عنوان خاک-سیمان نامیده می‌شود. این محصول متجاوز از صدسال است که در پروژه‌های مختلف عمرانی (پوشش کانال‌های آبیاری، جاده‌سازی و ...) مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای بهسازی خاک‌های رسی به درصد نسبتاً زیادی سیمان (بیشتر از ۱۰ درصد وزنی) نسبت به خاک‌های سیلتی مورد نیاز است. درصد زیاد سیمان موجب می‌گردد که هزینه بهسازی افزایش یابد و روش مذکور اقتصادی نباشد. از طرفی افزایش درصد سیمان باعث حرارت زیاد در عمل هیدراسیون سیمان می‌شود که نتیجه آن پیدایش ترک‌های کششی مختلف در خاک-سیمان و کاهش مقاومت آن می‌باشد. بنابراین با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی و نیز به منظور جلوگیری از پیدایش ترک‌های کششی مسلح سازی تصادفی آن ضروری می‌باشد (Estabragh et al., 2011; Attom et al., 2009)

محققینی مانند park (2009) و Consoli et al. (2010) و

Izawa et al., (2009) از آزمایش‌های خود روی خاک سیمان تشکیل یافته از خاک ماسه‌ای در حالت معمولی و مسلح شده با

خاک‌های رسی دارای مقاومت کم و تراکم‌پذیری زیادی می‌باشند. به طوری که استفاده از آن‌ها در پروژه‌های عمرانی با مشکلاتی روبرو است. بهسازی این خاک‌ها جهت افزایش خواص مکانیکی آن‌ها همواره مورد توجه محققین بوده است. بهسازی خاک‌ها معمولاً از روش‌های شیمیایی یا مکانیکی صورت می‌پذیرد. در روش شیمیایی ماده شیمیایی مورد نظر مانند آهک، سیمان و خاکستر بادی با درصد معین به خاک‌ها افزوده می‌گردد. ایجاد واکنش شیمیایی بین این مواد افزودنی و خاک موجب بهسازی آن می‌گردد. بهسازی مکانیکی شامل افزودن موادی مانند الیاف مصنوعی یا طبیعی به صورت تصادفی یا تنظیم شده به خاک می‌گردد (Sobhan et al., 2002). در این روش هیچ‌گونه واکنش شیمیایی بین خاک و مواد افزودنی صورت نمی‌پذیرد. ولیکن وجود آن‌ها در خاک باعث افزایش مقاومت می‌گردد (Divya et al., 2014) (Maher et al., 1990).

شیمیایی آن در جدول‌های شماره (۱ و ۲) آورده شده است. بر اساس نتایج حاصل از دانه‌بندی و حدود اتر برگ خاک مطابق طبقه‌بندی یونیفاید، خاک از نوع رس با خاصیت خمیری پایین (CL) می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک مورد استفاده

مقدار	استاندارد	مشخصه
۲/۷	ASTM-D-۸۵۴	وزن مخصوص دانه‌های جامد (G_s)
۴/۰		شن (%)
۱۰/۰	ASTM-D-۶۹۱۳	ماسه (%)
۵۲/۰		سیلت (%)
۳۴/۰		رس
۴۹/۲		حد روانی (LL) (%)
۲۶/۱	ASTM-D-۴۳۱۸	حد خمیری (PL) (%)
۲۳/۱		شاخص خمیری (PI) (%)
۱۵		حد انقباض (SL) (%)
CL	ASTM-D-۲۴۸۷	طبقه‌بندی متحد (USCS)
۱۷/۲		درصد رطوبت بهینه (W_{opt}) (%)
۱۷/۱	ASTM-D-۶۹۸	وزن واحد حجم خشک حداکثر (γ_{dmax}) (kN/m^3)

جدول ۲- مشخصات شیمیایی خاک مورد استفاده

مقدار	مشخصه
۸/۰	pH
۱۰/۷۴	EC (ds/m)
۰/۳۳	K^+ (meq/Lit)
۲۴	Ca^{2+} (meq/Lit)
۸۳/۰	SO_4^{2-} (meq/Lit)
۱۰/۰	Mg^{2+} (meq/Lit)
۶۰/۰	Cl^- (meq/Lit)
۰/۶	CO_3^{2-} (meq/Lit)
۴/۰	HCO_3^- (meq/Lit)

ب- سیمان

سیمان استفاده‌شده در این تحقیق سیمان پرتلند معمولی (تیپ ۲) می‌باشد که وزن مخصوص ذرات جامد آن ۳/۱۵ می‌باشد. جدول شماره (۳) خواص فیزیکی و مکانیکی سیمان مورد استفاده را نشان می‌دهد.

ج- الیاف

الیاف مورد استفاده در این تحقیق از نوع پلی‌استر است که در برابر اسیدها و بازها مقاوم می‌باشند و خواص آن‌ها در جدول

الیاف مصنوعی نتیجه‌گیری نمودند که افزودن الیاف موجب افزایش مقاومت خاک می‌گردد. مطالعات در خصوص خاک سیمان متشکل از خاک چسبنده محدود می‌باشد و می‌توان به کارهای تحقیقاتی Khattaka and Alrashidi (2006) و Tang *et al.* (2007) و Estabragh *et al.* (2012) (اشاره نمود. آن‌ها نیز با انجام آزمایش‌های مختلف گزارش نمودند که افزودن الیاف نه تنها موجب افزایش مقاومت مخلوط می‌گردد بلکه از پیدایش ترک‌های کششی هم جلوگیری می‌کند. معمولاً افزودن سیمان به خاک منجر به افزایش مقاومت مخلوط می‌گردد که مکانیزم آن ناشی از عمل هیدراتاسیون سیمان می‌باشد. طی عمل هیدراتاسیون پلاستیسیته خاک کاهش می‌یابد و عمل سیمانی شدن انجام می‌شود که منجر به افزایش مقاومت می‌گردد. (Croft 1967). وقتی الیاف به خاک سیمان افزوده می‌شود سطوح الیاف به محصولات ناشی از هیدراتاسیون می‌چسبند و نیز این محصولات مانند یک شبکه الیاف را احاطه می‌کنند به طوری که از حرکت آن جلوگیری می‌نمایند و چون مقاومت کششی الیاف بالاست لذا موجب افزایش مقاومت خاک سیمان می‌شوند. بررسی منابع موجود نشان می‌دهد که در مسلح سازی تصادفی خاک و خاک-سیمان بیشتر اثر درصد وزنی الیاف مورد بررسی قرار گرفته است و کمتر به بررسی اثر طول الیاف پرداخته‌اند (Estabragh *et al.*, 2012). همچنین در خصوص مسلح سازی تصادفی خاک سیمان هم اکثراً مطالعات در رابطه با خاک‌های ماسه‌ای صورت گرفته که می‌توان به تحقیقات Consoli *et al.* (2010) و Park (2009) اشاره کرد.

بنابراین هدف از این تحقیق بررسی اثر طول و درصد وزنی الیاف در مسلح سازی تصادفی خاک-سیمان و همچنین ارائه مدل رگرسیونی به منظور پیش‌بینی مقاومت خاک می‌باشد. این بررسی با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی با درصد مشخص وزنی و طول الیاف و نیز درصدهای مختلف سیمان در زمان عمل‌آوری گوناگون صورت می‌پذیرد. به طوری که نتایج با یکدیگر مقایسه و نیز مدل رگرسیونی مناسب جهت برآورد مقاومت خاک-سیمان مسلح شده به صورت تابعی از طول و درصد وزنی الیاف و نیز درصد سیمان و زمان عمل‌آوری آن ارائه گردیده و نتایج حاصل از آزمایش‌ها مدل پیشنهادی مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

الف- خاک

خاک مورد استفاده در این تحقیق یک خاک رسی تهیه‌شده از اطراف شهر قزوین می‌باشد. مشخصات فیزیکی، مکانیکی و

بارگذاری با سرعت $1/5 \text{ mm/min}$ در سه لایه انجام شد. بار وارده به هر لایه طوری تنظیم گردید که وزن واحد حجم ایجادشده برابر مقدار ماکزیمم حاصل از منحنی تراکم مربوطه گردیده و مطابق با استاندارد ASTM-D-1633 انجام شده است. آزمایش‌های مربوطه در زمان عمل‌آوری مختلف روی آن‌ها صورت پذیرفت. نمونه‌های تهیه شده در آزمایشگاه به ترتیب دارای قطر و ارتفاع ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بودند. نمونه‌های خاک سیمان غیرمسلح و مسلح شده در یک اتاقک مخصوص در درجه حرارت و رطوبت نسبی مطابق استاندارد ASTM-D-1632 برای زمان‌های عمل‌آوری ۲۸، ۱۴، ۷، ۳ روزه نگهداری شدند.



شکل ۱- قالب ویژه تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی

ب) آزمایش‌ها:

آزمایش‌های تک‌محوری و مقاومت کششی مطابق استاندارد ASTM-D-1633 و ASTM-C-496 روی نمونه‌های تهیه شده انجام گردید. جهت انجام آزمایش‌های فوق یک ماشین بارگذاری جهت اعمال بار مورد استفاده قرار گرفت. مقدار بار اعمال شده و تغییر شکل ایجادشده در نمونه به‌طور مرتب و پیوسته ثبت گردید تا اینکه گسیختگی در نمونه حاصل گردد.

نتایج و بحث

مقاومت فشاری

شکل (۲) منحنی تنش کرنش برای خاک طبیعی، خاک مسلح شده تصادفی با الیاف، خاک سیمان و خاک سیمان مسلح شده با الیاف در درصدهای ۰/۵٪ و ۱٪ با طول ۱۰ میلی‌متر را در زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه نشان می‌دهد. همان‌طوری که در این شکل ملاحظه می‌گردد گسیختگی خاک معمولی در تنش 281 kPa و کرنش ۳٪ روی می‌دهد لیکن افزودن ۱٪ الیاف به آن موجب افزایش تنش نقطه گسیختگی به 402 kPa در کرنش ۳/۵٪ می‌گردد که نشان‌دهنده آن است که افزودن الیاف به خاک معمولی نه تنها موجب افزایش مقاومت می‌گردد بلکه کرنش مربوط به نقطه گسیختگی هم افزایش می‌یابد. منحنی تنش کرنش برای خاک-سیمان غیرمسلح مندرج در شکل نشان می‌دهد که افزودن سیمان به خاک موجب افزایش

(۴) آورده شده است. الیاف موجود به طول‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ میلی‌متر تقسیم گردید و سپس با درصد وزنی ۰/۵ و ۱/۱ مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۳- مشخصات فیزیکی سیمان مورد استفاده

مقدار	مشخصه
۲۹/۲	غلظت نرمال (٪)
۱۰۸/۰	زمان گیرش اولیه (min)
۱۸۰/۰	زمان گیرش نهایی (min)
۲۳۰۰۰/۰	مقاومت فشاری ۷ روزه (kPa)
۳۴۰۰۰/۰	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kPa)
۱۵۵۰	مقاومت کششی ۷ روزه (Kpa)
۲۴۰۰	مقاومت کششی ۲۸ روزه (kPa)
۳۱۰۰	مقاومت خمشی ۷ روزه (kPa)
۴۲۲۰	مقاومت خمشی ۲۸ روزه (kPa)

جدول ۴- مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف مصنوعی مورد استفاده

مقدار	مشخصه
منفرد	نوع الیاف
۰/۹۳	وزن واحد حجم (gr/cm^3)
۰/۲	قطر (mm)
۳۸۰	مقاومت کششی (Mpa)
۱۳۵-۱۵۰	محدوده ذوب ($^{\circ}\text{C}$)
بالا	مقاومت در برابر اسید
۰/۰	جذب آب

روش تهیه نمونه و آزمایش

الف) تهیه نمونه:

نمونه‌های آزمایشگاهی مورد نیاز شامل نمونه‌ای از خاک طبیعی مسلح شده، خاک-سیمان و خاک-سیمان مسلح شده می‌باشد. جهت این امر آزمایش تراکم استاندارد روی خاک طبیعی معمولی و مسلح شده و نیز خاک-سیمان غیرمسلح و مسلح شده انجام گرفت و منحنی تراکم استاندارد برای آن‌ها تهیه شد. نمونه‌های آزمایشگاهی بر اساس رطوبت ایتیمم و وزن واحد حجم ماکزیمم منحنی تراکم مربوطه تهیه شدند. اختلاط خاک با مواد مذکور (الیاف، سیمان) صورت پذیرفت و رطوبت آن‌ها به رطوبت ایتیمم رسانده شد و سپس با استفاده از یک قالب مخصوص (شکل شماره ۱) از روش تراکم استاتیکی اقدام به تهیه نمونه گردید. تراکم استاتیکی به وسیله یک دستگاه

می‌گردد، اما این افزایش در مقایسه با درصد وزنی الیاف فراوان نیست. محققینی از جمله (Maher et al. 1994) نتایج مشابهی را گزارش نموده‌اند و افزایش در طول الیاف در یک درصد وزنی ثابت را سبب عدم‌تغییر و حتی کاهش میزان مقاومت دانستند. به‌طور کلی می‌توان گفت افزایش در درصد وزنی الیاف مورد استفاده سبب افزایش تعداد الیاف در نمونه گشته و با افزایش تماس و اصطکاک بین الیاف و ذرات خاک مقاومت افزایش می‌یابد که این موضوع با نتایج ارائه‌شده توسط (Estabragh et al. 2012) نیز همخوانی دارد. افزودن الیاف به مخلوط خاک سیمان سبب می‌شود سطح الیاف به هیدراتاسیون سیمان و ذرات خاک بچسبند، به طوری که شبکه‌ای از کریستال در اطراف الیاف ایجاد می‌گردد. فرایند فوق از حرکت الیاف جلوگیری کرده و شبکه مستحکمی از خاک-سیمان-الیاف را ایجاد می‌نماید که کارایی انتقال بار به الیاف را افزایش داده و در نتیجه مقاومت آن افزایش می‌یابد. این تحلیل با نتایج تحقیقات (Tang et al. 2007) نیز همخوانی دارد. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود افزایش طول الیاف در درصد ثابت آن تا ۱۰ میلی‌متر موجب افزایش مقاومت فشاری می‌گردد لیکن از آن به بعد افزایش طول الیاف تأثیر چندانی در افزایش مقاومت ندارد. اما در طول ثابت از الیاف افزایش درصد وزنی موجب افزایش مقاومت می‌گردد. در شکل (۵) مقاومت کششی و تغییر طول ملاحظه می‌گردد که در درصد ثابت از الیاف افزایش طول موجب افزایش مقاومت کششی می‌گردد و همچنین در طول ثابت افزایش درصد وزنی نیز موجب افزایش مقاومت می‌گردد. به‌طور کلی افزایش در میزان درصد وزنی الیاف در طول ثابت به‌منزله افزایش اصطکاک بین ذرات خاک و افزایش مقاومت است، بنابراین در یک درصد وزنی مشخص از الیاف افزایش طول سبب کاهش تعداد الیاف بکار رفته و کاهش اصطکاک بین ذرات و الیاف می‌گردد که نتیجه آن عدم‌تغییر و یا بعضاً کاهش میزان مقاومت می‌باشد.

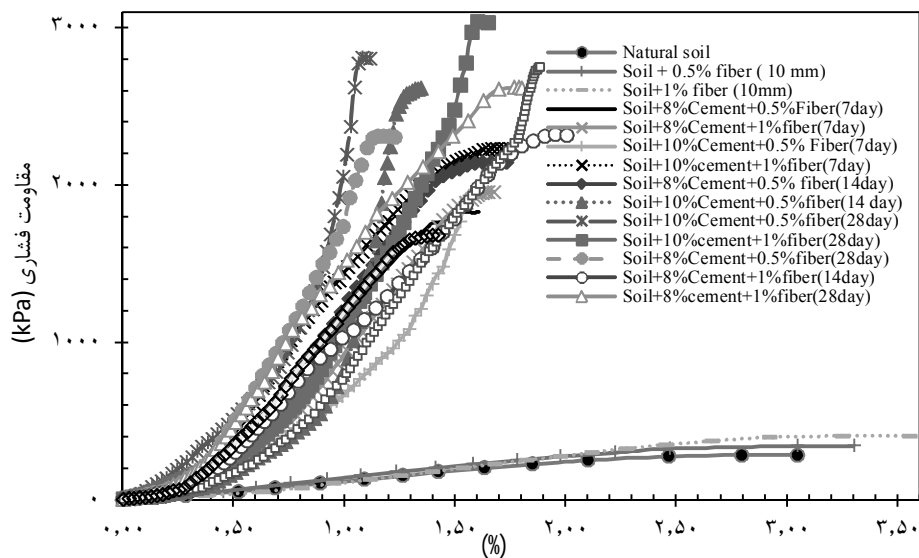
مقاومت کششی

شکل (۵) نشان‌دهنده مقاومت کششی خاک مسلح شده با درصد‌های وزنی و طول‌های مختلف الیاف و خاک-سیمان مسلح شده به الیاف با درصد‌های وزنی مختلف الیاف در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشخص است افزودن الیاف سبب افزایش مقاومت کششی خاک و مخلوط خاک سیمان شد. همچنین در یک طول مشخص از الیاف افزایش درصد وزنی الیاف سبب افزایش فراوان مقاومت کششی نهایی خاک شد. همچنین با توجه به این شکل افزودن

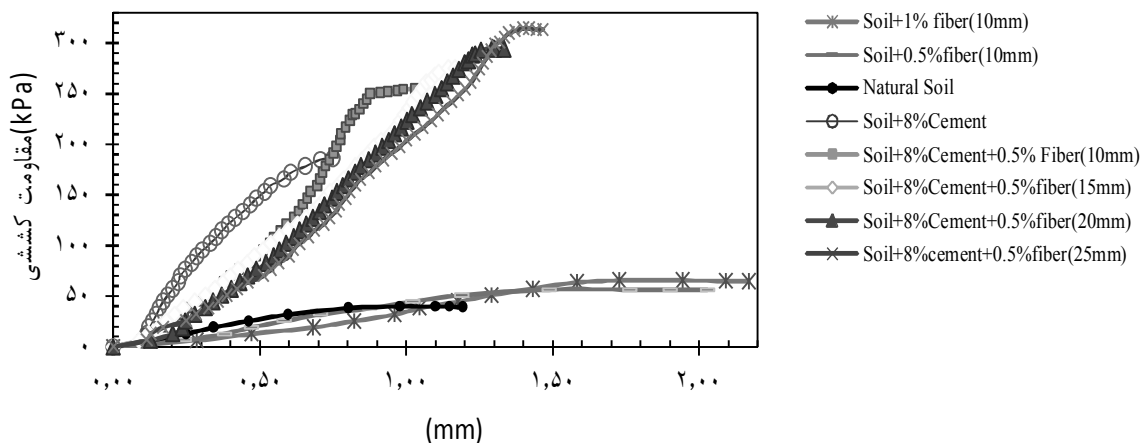
مقاومت نسبت به خاک طبیعی می‌شود لیکن گسیختگی در کرنش کمتری نسبت به خاک طبیعی صورت می‌پذیرد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود شیب اولیه منحنی تنش کرنش خاک سیمان نسبت به خاک نیز افزوده می‌شود، به عبارتی افزودن سیمان به نمونه در نمونه ایجاد خاصیت شکنندگی می‌کند که تابعی از درصد سیمان و زمان عمل‌آوری می‌باشد. افزودن الیاف به خاک سیمان منجر به این می‌گردد که اولاً مقاومت نسبت به مقاومت خاک سیمان افزایش یافته و از طرفی خاصیت شکنندگی کاهش می‌یابد. به طوری که برای نمونه‌های خاک سیمان با ۰.۸٪ سیمان در زمان عمل‌آوری ۷ روزه مقاومت نقطه گسیختگی برابر با ۱۶۷۷ kPa در کرنش ۱/۴ درصد و برای نمونه‌های با همان درصد سیمان و زمان عمل‌آوری مشابه و ۰.۱٪ الیاف مقاومت نقطه گسیختگی برابر ۱۹۵۳ kPa در کرنش ۱/۱۶۷٪ می‌باشد. شکل (۳) منحنی‌های مقاومت کششی در مقابل قطر الیاف در نمونه‌های خاک، خاک مسلح و خاک سیمان و خاک-سیمان مسلح شده با الیاف به طول ۱۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد. همان‌طوری که در این شکل مشاهده می‌گردد افزودن الیاف به خاک و خاک سیمان موجب افزایش مقاومت کششی نمونه‌ها می‌گردد. به طوری که خاک طبیعی دارای مقاومت کششی ۳۹ kPa در تغییر طول ۱/۱۹ میلی‌متر و خاک به همراه ۰.۱٪ الیاف دارای مقاومت ۶۴ kPa و تغییر طول ۲/۱۶ میلی‌متر می‌باشد. همچنین مقاومت کششی و تغییر طول نمونه‌های خاک و ۰.۸٪ سیمان در اثر افزودن ۰.۵٪ الیاف به طول ۱۰ میلی‌متر از ۱۸۵ kPa در تغییر طول ۰/۷ میلی‌متر به ۲۶۳ و تغییر طول ۱ میلی‌متر تغییر می‌یابد. این نتایج با نتایج تحقیقات (Gray and Al-Rafeai, 1986) مطابقت دارند. شکل (۴) نشان‌دهنده مقاومت فشاری نهایی خاک طبیعی مسلح شده با درصد‌های وزنی و طول‌های گوناگون الیاف و همچنین مقاومت فشاری نهایی خاک-سیمان و خاک-سیمان مسلح شده با الیاف مصنوعی به ازای زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه و درصد سیمان ۸ و ۱۰ درصد می‌باشد. طبق نتایج حاصل از این شکل افزودن سیمان به خاک باعث افزایش مقاومت فشاری آن می‌گردد، علت افزایش مقاومت فشاری نهایی خاک با افزایش سیمان را می‌توان ناشی از پدیده سمنته شدن ذرات خاک در اثر پدیده هیدراتاسیون دانست. با توجه به شکل (۴) افزودن الیاف مصنوعی به نمونه‌ها سبب افزایش مقاومت می‌گردد، به طوری که در یک طول مشخص از الیاف با افزایش درصد وزنی الیاف، افزایش فراوانی در میزان مقاومت فشاری نهایی حاصل می‌گردد. این در حالی است که افزایش طول الیاف به ازای یک درصد وزنی مشخص هرچند سبب افزایش میزان مقاومت خاک

کششی نمونه خاک مسلح شده شد. در طول ثابت الیاف نیز افزایش مقدار الیاف منجر به افزایش تعداد بیشتر الیاف در خاک - سیمان می‌شود که این موضوع افزایش سطح تماس الیاف و ذرات خاک - سیمان را به دنبال دارد، بنابراین زمانی که نمونه‌ای با درصد بیشتر الیاف تحت بار وارده قرار می‌گیرد مقاومت کششی آن افزایش می‌یابد. این نتایج با یافته‌های محققین دیگری مانند (Tang et al, 2010) که تأثیر سیمان و فیبرهای Polypropylene را بر مقاومت خاک مورد بررسی قرار دادند و (Michalowski, 2003) که از فیبرهای مصنوعی در بهسازی یک خاک ماسه‌ای استفاده کردند مطابقت دارد. آن‌ها نیز از تحقیقات خود دریافتند که افزایش طول الیاف در یک درصد وزنی ثابت سبب افزایش فراوانی در مقاومت کششی نهایی خاک می‌گردد.

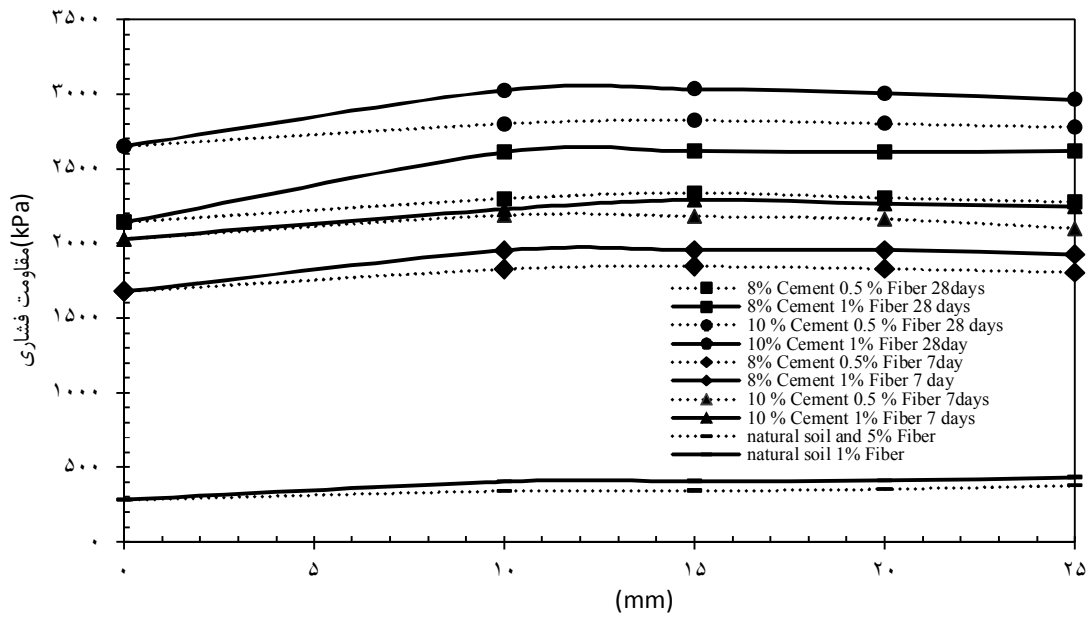
سیمان به خاک سبب افزایش مقاومت کششی آن گردید. علت رخ دادن این پدیده آن است که محصولات حاصل از هیدراسیون سیمان که موجب سخت شدن خاک گشته‌اند دارای مقاومت کششی بیشتری نسبت به ذرات خاک هستند. بنابراین مقاومت کششی خاک - سیمان مسلح شده از خاک مسلح بدون سیمان بیشتر است. افزایش مقاومت کششی خاک سیمان در اثر مسلح سازی با الیاف را می‌توان ناشی از این پدیده دانست که پیوند و اصطکاک بیشتر میان الیاف و مواد سخت شده (سمنته شدن) منجر به افزایش مقاومت کششی می‌شود و هنگامی که ترک‌های کششی به سبب بارگذاری بر روی نمونه‌های مسلح شده تشکیل می‌شود، الیاف با ایجاد اتصال پل مانند (قوسی شکل) از تشکیل ترک‌ها و شکست نمونه جلوگیری می‌کنند (Tang et al 2007). در واقع اصطکاک بین الیاف و ذرات خاک منجر به انتقال بار بین آن‌ها و افزایش مقاومت



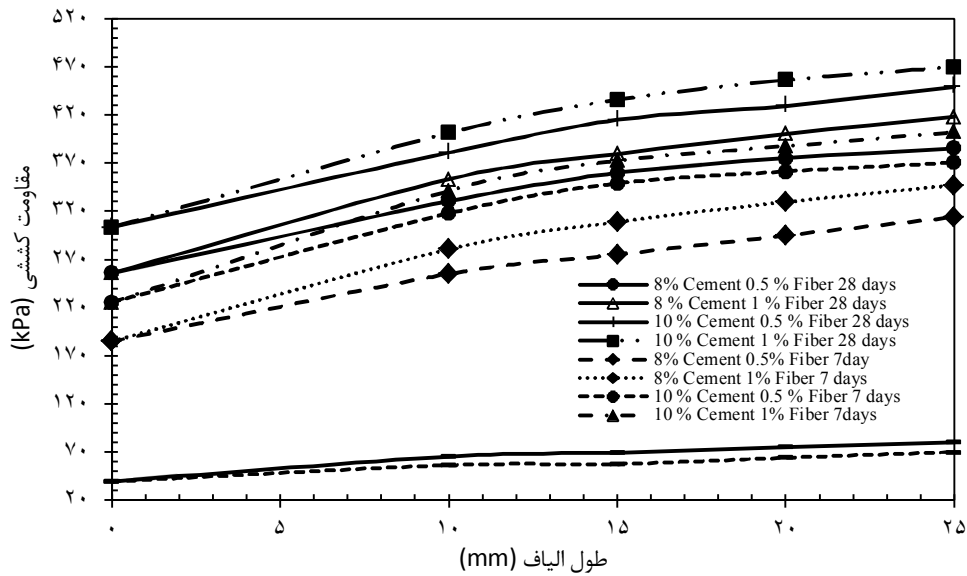
شکل ۲- منحنی تنش کرنش خاک معمولی و مسلح شده و خاک - سیمان مسلح شده با درصد‌های وزنی مختلف الیاف به طول ۱۰ میلی‌متر در زمان‌های عمل‌آوری ۱۴، ۲۸ روزه



شکل ۳- مقاومت کششی - تغییر قطر خاک و خاک - سیمان مسلح شده با الیاف و ۸٪ سیمان در زمان‌های عمل‌آوری ۷ روزه



شکل ۴- مقاومت فشاری خاک - سیمان مسلح شده با درصدها و طول‌های مختلف الیاف و درصدهای ۸ و ۱۰ درصد سیمان در زمان‌های عمل‌آوری ۷ روزه و ۲۸ روزه



شکل ۵- مقاومت کششی خاک معمولی و خاک - سیمان مسلح شده با درصدها و طول‌های مختلف الیاف و درصدهای ۸ و ۱۰ درصد سیمان در زمان‌های عمل‌آوری ۷ روزه و ۲۸ روزه

2015) با استفاده از داده‌های مشاهداتی خود به توسعه مدل رگرسیونی جهت پیش‌بینی فشار تورمی خاک پرداختند. (Babalara *et al.* 2015) مقاومت فشاری یک خاک رسی بهسازی شده به‌وسیله سیمان و رزین را با استفاده از مدل رگرسیونی پیش‌بینی کردند. در تحقیق حاضر به‌منظور مدل‌سازی مقاومت فشاری نهایی و مقاومت کششی نهایی در خاک طبیعی و همچنین مخلوط خاک - سیمان مسلح شده با الیاف از دو مدل رگرسیونی چندگانه غیرخطی استفاده شده است. پس از بررسی معادلات مختلف و مقایسه میزان دقت آن‌ها در مدل‌سازی

تحلیل رگرسیونی

مقاومت فشاری

تحلیل رگرسیونی یک تکنیک آماری به‌منظور مدل‌سازی و برآورد ارتباط بین متغیرهای تأثیرگذار روی یک پدیده می‌باشد که در زمینه‌های مختلفی از جمله مهندسی، فیزیک، اقتصاد و ... بکار گرفته شده است. (Sivakumar babu and Vasudevan, 2008) و (Ranjan *et al.*, 1995) با بهره‌گیری از تحلیل رگرسیونی متغیرهای مؤثر در خاک‌های مسلح شده با الیاف را مورد بررسی قرار دادند. محققینی مانند (Khatibi *et al.*

آزمایشگاهی (kPa)، X_m مقاومت داده پیش‌بینی شده (kPa) و n تعداد داده‌ها می‌باشد. به دلیل اینکه خطای جذر میانگین مربعات دارای واحد می‌باشد به منظور ارزیابی بهتر مدل ارائه شده از خطای جذر میانگین مربعات نرمال که عددی بی‌بعد است طبق رابطه (۳) استفاده شده است. در این رابطه $RMSE_N$ خطای جذر میانگین مربعات نرمال شده (٪)، $RMSE$ خطای جذر میانگین مربعات، X_{MAX} داده حداکثر برداشت شده و X_{MIN} داده حداقل مشاهده شده می‌باشد. شکل شماره (۶) نشان‌دهنده همبستگی مقاومت فشاری نهایی مشاهده شده و پیش‌بینی شده می‌باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_e - X_m)^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

خطای جذر میانگین مربعات نرمال محاسبه شده طبق رابطه (۳) برای داده‌های مدل‌سازی شده مقاومت فشاری نسبت به داده‌های آزمایشگاهی برابر ۳/۵۹٪ می‌باشد که بیانگر صحت مدل ارائه شده است. همچنین مطابق شکل (۶) ضریب همبستگی بین مقاومت فشاری پیش‌بینی شده و مشاهده شده برابر ۰/۹۸ می‌باشد که نشان‌دهنده همبستگی بالایی میان آن‌ها است.

$$RMSE_N = \frac{RMSE}{X_{MAX} - X_{MIN}} \times 100 \quad (\text{رابطه ۳})$$

مقاومت کششی

به منظور مدل‌سازی مقاومت کششی برای نمونه‌های خاک و خاک - سیمان مسلح شده با الیاف از معادله پیشنهادی مطابق با رابطه (۱) استفاده شده است. در این رابطه f نشان‌دهنده مقاومت کششی (kPa) متغیر وابسته و همچنین w, u, y, x که نشان‌دهنده متغیرهای مستقل هستند به ترتیب از راست نشان‌دهنده درصد سیمان، زمان عمل‌آوری، درصد الیاف و طول الیاف (mm) می‌باشند. ضرایب رگرسیونی معادله ۱ به منظور پیش‌بینی مقاومت کششی در جدول شماره (۶) آورده شده است. به منظور صحت سنجی معادله مورد نظر از ضریب همبستگی R^2 و خطای جذر میانگین مربعات نرمال شده مطابق رابطه (۳) استفاده شده است. نتایج حاصل نشان داد مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی مقاومت کششی مطابق شکل (۷) دارای ضریب همبستگی ۰/۹۷ درصد و خطای نرمال ۴/۳۸ می‌باشد و از دقت و صحت مطلوبی برخوردار است.

با قرار دادن ضرایب جدول‌های (۵) و (۶) در رابطه (۱) معادله رگرسیون نهایی طبق روابط ۴ و ۵ به ترتیب برای مقاومت نهایی فشاری و مقاومت نهایی کششی مخلوط خاک - سیمان مسلح شده با الیاف به دست آمد.

مقاومت فشاری و کششی خاک نهایتاً معادله پیشنهادی از نوع تابع هموگرافیک انتخاب گردید. پس از مقایسه نتایج حاصل از معادله با داده‌های مشاهده‌ای مشخص شد این معادله از دقت و صحت مطلوبی برخوردار است. صورت کلی معادله پیشنهادی مطابق رابطه (۱) می‌باشد. در این رابطه f متغیر وابسته (مقاومت کششی نهایی یا مقاومت فشاری نهایی)، w, u, y, x متغیرهای مستقل (به ترتیب از راست درصد سیمان، زمان عمل‌آوری سیمان، درصد الیاف و طول الیاف) و همچنین y_1, \dots, y_{12} ضرایب ثابت معادله مقاومت و y_0 عرض از مبدأ معادله می‌باشند.

$$f = y_0 + \left(\frac{y_1 x}{y_2 + x}\right) + y_3 x + \left(\frac{y_4 y}{y_5 + y}\right) + y_6 y + \left(\frac{y_7 u}{y_8 + u}\right) + y_9 u + \left(\frac{y_{10} w}{y_{11} + w}\right) + y_{12} w \quad (\text{رابطه ۱})$$

بر اساس ۶۳ داده آزمایشگاهی مشاهده شده برای الیاف مصنوعی با درصدها و طول‌های متفاوت و همچنین درصدهای متفاوت سیمان و زمان‌های عمل‌آوری متفاوت ضرایب رگرسیون (y_0, \dots, y_{12}) مطابق رابطه (۱) به منظور مدل‌سازی مقاومت فشاری و کششی محاسبه گردید. ضرایب استخراج شده به منظور مدل‌سازی مقاومت فشاری خاک مورد نظر مطابق جدول (۵) می‌باشد.

جدول ۵- ضرایب معادله رگرسیون برای مدل‌سازی مقاومت فشاری

ضریب	مقدار
y_0	۱۵۶/۴۵۸۳
y_1	۴/۱۸۳ * ۱۰ ^{۰۹}
y_2	۵/۴۷۴ * ۱۰ ^{۰۹}
y_3	۱۷۳/۴۱۱۱
y_4	۸۳۷۵/۰۴۱
y_5	۵۳۱۸۶/۲۵
y_6	۲۵/۹۸۲۵
y_7	-۴/۰۹ * ۱۰ ^{۰۹}
y_8	-۴/۴ * ۱۰ ^{۰۹}
y_9	۳۴۰/۴۰۰۸
y_{10}	۵/۴۷۴۹
y_{11}	-۰/۹۰۲۸
y_{12}	۳/۱۴۹۴

به منظور بررسی صحت و دقت مدل رگرسیونی پیشنهادی برای مقاومت فشاری ضریب همبستگی R^2 و همچنین خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) محاسبه شد. خطای جذر میانگین از رابطه شماره (۲) محاسبه شد که در آن $RMSE$ خطای جذر میانگین مربعات (kPa)، X_e مقاومت داده

جدول ۶- ضرایب معادله رگرسیون برای مدل سازی

مقاومت کششی	
مقدار	ضریب
Y ₀	-۳۴/۶۸۵۱
Y ₁	-۲۷/۶۰۱۴
Y ₂	-۲/۲۸۰۸
Y ₃	۱۳/۹۶۶۶
Y ₄	۱/۰۵۴۱
Y ₅	۰/۴۸۳۲
Y ₆	-۰/۰۶۲۹
Y ₇	۱/۰۴*۱۰ ^۸
Y ₈	۳/۴۹*۱۰ ^۸
Y ₉	۴۴/۶۲۲۸
Y ₁₀	۱/۲۵۲۸
Y ₁₁	۰/۵۸۵۳
Y ₁₂	۱/۰۱۲۸

(رابطه ۴) مقاومت فشاری نهایی

$$f = 156.4583 + \left(\frac{4.18 \times 10^9 x}{5.47 \times 10^9 + x}\right) + 173.4111 x + \left(\frac{8375.04 y}{53186.24 + y}\right) + 25.98 y + \left(\frac{25.98 u}{-4.4 \times 10^9 + u}\right) + 340.4008 u + \left(\frac{5.4749 w}{-0.9028 + w}\right) + 3.1494 w$$

(رابطه ۵) مقاومت کششی نهایی

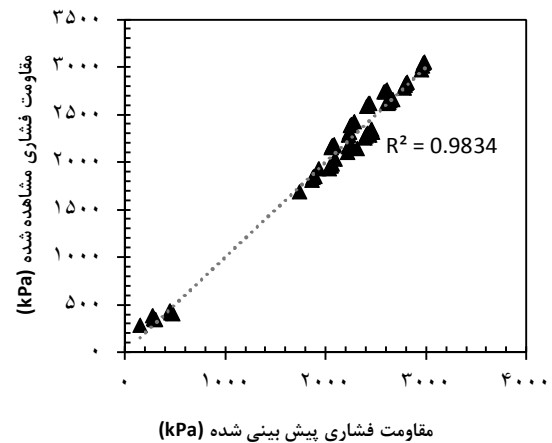
$$f = -34.6851 + \left(\frac{-27.6014 x}{-2.2808 + x}\right) + 13.96 x + \left(\frac{1.054 y}{48.32 + y}\right) - 0.0629 y + \left(\frac{1.04 \times 10^8 u}{3.49 \times 10^8 + u}\right) + 44.62 u + \left(\frac{1.252 w}{0.5853 + w}\right) + 1.012 w$$

تحلیل حساسیت

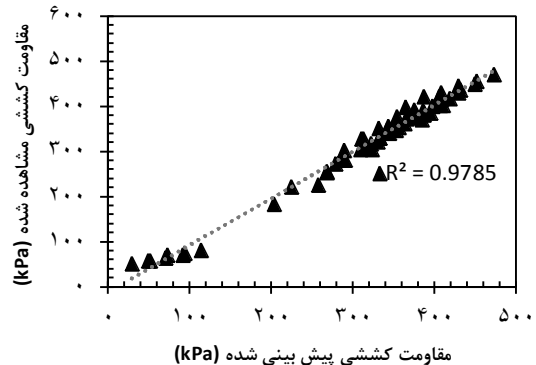
در مدل سازی و مطالعات آماری همیشه یکی از مهم ترین موارد مورد بررسی توسط محققان یافتن میزان تأثیر هر یک از متغیرهای مستقل روی متغیر وابسته است، این موضوع برای پدیده های متأثر از چند متغیر مستقل از اهمیت بیشتری برخوردار است. تاکنون محققان مختلفی از جمله (Ranjan *et al*, 1995) و (Sivakumar Babu and Vasudevan, 2008) با ارائه روش های آماری مختلف به تحلیل حساسیت مدل های رگرسیونی خود در خاک های مسلح شده تصادفی پرداخته اند. در این تحقیق جهت اجرای تحلیل حساسیت بر روی مدل های رگرسیونی از رابطه (۶) استفاده شده است.

$$S_{X_i} (\%) = \frac{\left| \frac{\partial W}{\partial X_j} \frac{\sigma_{X_i}}{\sigma_w} \right|}{\sum_{j=1}^N \left| \frac{\partial W}{\partial X_j} \frac{\sigma_{X_j}}{\sigma_w} \right|} \times 100; \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (\text{رابطه } 6)$$

در این رابطه S_{X_i} میزان حساسیت متغیر وابسته نسبت به متغیر مستقل (X_i) ، w معادله رگرسیونی مورد بررسی (رابطه های ۴ و ۵)، $\left| \frac{\partial W}{\partial X_j} \right|$ قدر مطلق مشتق جزئی متغیر وابسته نسبت به متغیر مستقل X_i به ازای تمام داده های شرکت داده شده در مدل سازی، $\frac{\sigma_{X_i}}{\sigma_w}$ نسبت انحراف معیار متغیر مستقل نسبت به متغیر وابسته، N تعداد متغیرهای مستقل برای مدل سازی می باشد. میزان حساسیت برای هر یک از متغیرهای مستقل روابط (۴) و (۵) که بر اساس رابطه (۱۰) محاسبه شده است در نمودارهای میله ای شکل های (۸) و (۹) نشان داده شده است. لذا با توجه به اینکه طبق شکل های (۸) و (۹) این عامل برای متغیرهای مستقل مدل های رگرسیونی مقاومت فشاری و کششی (درصد سیمان، زمان عمل آوری سیمان، درصد الیاف و طول الیاف) مثبت به دست آمده است، مقاومت های فشاری و



شکل ۶- مقاومت فشاری نهایی پیش بینی شده در مقابل مقاومت فشاری نهایی مشاهده شده برای خاک - سیمان مسلح شده با درصد های وزنی و طول های مختلف الیاف



شکل ۷- مقاومت کششی نهایی پیش بینی شده در مقابل مقاومت کششی نهایی مشاهده شده برای خاک - سیمان مسلح شده با درصد های وزنی و طول های مختلف الیاف

مقاومت فشاری ناچیز است. همچنین بررسی شکل (۹) نشان می‌دهد متغیرهای مستقلی که بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت کششی دارند به ترتیب درصد سیمان و سپس درصد وزنی الیاف می‌باشد. بررسی این شکل نشان می‌دهد زمان عمل‌آوری تأثیر ناچیزی در افزایش مقاوم کششی نمونه‌ها دارد.

نتیجه‌گیری کلی

در این کار تحقیقاتی اثر مسلح سازی تصادفی سیمان بر خواص مکانیکی خاک و خاک-سیمان (مقاومت فشاری و کششی) در درصد‌های وزنی مختلف الیاف و طول‌های متنوع از طریق آزمایشگاهی و تحلیل آماری مورد مطالعه قرار گرفت که بر اساس آن موارد زیر را می‌توان استنتاج کرد.

الف) افزودن الیاف موجب افزایش مقاومت فشاری و کششی خاک و خاک - سیمان می‌شود که این افزایش تابعی از درصد وزنی الیاف، طول الیاف، درصد وزنی سیمان و زمان عمل‌آوری است لیکن افزایش طول الیاف در افزایش مقاومت نمونه‌ها چندان مؤثر نیست.

ب) مدل رگرسیونی چند متغیره که تابعی از درصد سیمان، درصد وزنی الیاف، طول الیاف و زمان عمل‌آوری است برای شرایط مختلف ارائه گردید. نتایج نشان داد مقادیر محاسبه شده توسط معادلات مذکور با مقادیر اندازه‌گیری شده مطابقت دارد و از همبستگی قابل قبولی برخوردار است.

ج) تحلیل حساسیت مدل رگرسیونی نشان داد در میان متغیرهای مستقل درصد سیمان، زمان عمل‌آوری و درصد وزنی الیاف به ترتیب از اهمیت بیشتری در افزایش میزان مقاومت فشاری برخوردار هستند لیکن تأثیر درصد سیمان و درصد وزنی الیاف در افزایش مقاومت کششی از سایر متغیرهای مستقل بیشتر است.

REFERENCES

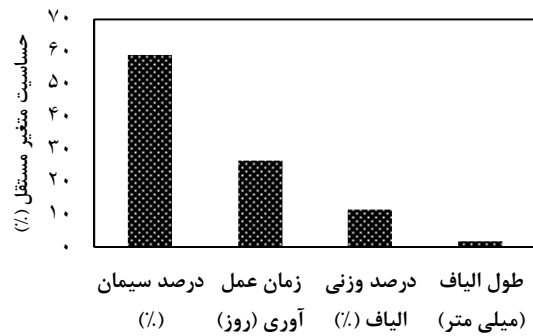
Attom, M.F., Al-Akhras, N.M. and Malkawi, A.L.H. (2009). Effect of fibers on mechanical properties of clay soil. *Geotechnical Engineering*, 162 (5), 277-283.

Babalar, M., Estabragh, A.R., Beytollahpour, I., (2015). Regression model for predicting the compressive strength of treated soil-cement with resin. *Iranian Journal of soil and water research*. In press.

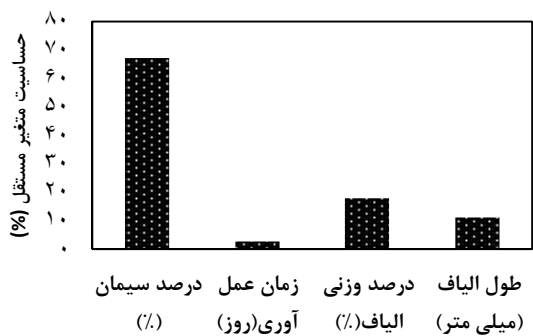
Consoli, N.C., Bassani, M.A.A., (2010). Effect of fiber-reinforcement on the strength of cemented soils. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(2), 344-351.

Croft, J.B. (1967). The influence of soil mineralogical composition of cement stabilization. *Geotechnique*, 17 (2), 119-135.

Divya, p., Viswanadham, B., and Gourc, J. (2014). Evaluation of tensile strength-strain



شکل ۸- میزان حساسیت متغیرهای مستقل در تعیین مقاومت فشاری نهایی خاک-سیمان و خاک سیمان مسلح شده



شکل ۹- میزان حساسیت متغیرهای مستقل در تعیین مقاومت کششی نهایی خاک-سیمان و خاک سیمان مسلح شده

کششی با افزایش هر یک از متغیرهای مستقل (درصد سیمان، زمان عمل‌آوری سیمان، درصد الیاف و طول الیاف) افزایش خواهند یافت. همچنین همان‌طور که در شکل‌های (۸ و ۹) مشاهده می‌شود این آهنگ افزایش برای هر یک از متغیرهای مستقل متفاوت است به‌طوری‌که تحلیل حساسیت مدل رگرسیونی مقاومت فشاری نشان می‌دهد درصد سیمان، زمان عمل‌آوری و سپس درصد الیاف بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت فشاری دارند و تأثیر افزایش طول الیاف در افزایش

characteristics of fiber-reinforced soil through laboratory tests. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 26 (1), 14-23.

Estabragh, A.R., Bordbar, A.T., and Javadi, A.A. (2011) Mechanical behavior of clay soil reinforced with Nylon fibers. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29, 899-908.

Estabragh, A.R., Namdar, P., and Javadi, A.A. (2012), Behavior of cement-stabilized clay reinforced with nylon fiber. *Geosynthetics International*. 19 (1), 85-92.

Gray, D. and Al-Rafeai, T.O. (1986). Behavior of fabric versus fiber reinforced sand. *Journal of Geotechnical Engineering*. 112(8), 804-820.

Izawa, J., Ito, H., Saito, T., Uneo, M., and Kuwano, J. (2009). Development of rational seismic design

- method for geogrid-reinforced soil wall combined with fiber-mixed soil-cement and its applications. *Geosynthetics International*. 16(4), 286-300.
- Khatibi, M., Soltani, A., and Estabragh, A.R. (2015) Experimental and statistical analysis of a fiber reinforced swelling soil characteristics using chemical additives. *Modarec civil Engineering Journal*. 15(2), 137-147
- Khattaka, M.J., Alrashidi, M., (2006), Durability and mechanistic characteristics of fiber reinforced soil-cement mixtures. *The international Journal of pavement Engineering*. 7 (1), 53-62.
- Maher, M.H. and Gray, D.H. (1990). Static response of sand 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*. 120(8), 1381-1393.
- Michalowski, R. and Cermak, J. (2003). Triaxial compression of sand reinforced with fibers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Eng.* 129 (2), 125-136.
- Park, S.S., (2009) Effect of fiber reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fiber reinforced cemented sand. *Geotextiles and Geomembranes*. 27 (2), 162-166.
- Ranjan, G., Vasan, R. M., Charan, H. D. (1995). Probabilistic analysis of randomly distributed fiber-reinforced soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(6), 419-428.
- Sobhan, Kh., Mashnad, M., (2002). Tensile strength and Toughness of soil-cement-fly-ash composite reinforced with recycled high-density polyethylene stripes. *Journal of materials in civil engineering*, 14(4), 177-184.
- Sivakumar Babu, G.L., Vasudevan, A.K., (2008). Seepage velocity and piping resistance of coir fiber mixed soils. *Journal of irrigation and drainage Engineering, ASCE*. 134 (4), 485-492.
- Tang, C., (2007). Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clay soil. *Geotextiles and Geomembranes*. 25(3), 194-202.
- Tang, C.S., Shi, B., and Zhao, L.Z. (2010). Interfacial shear strength of fiber reinforced soil, *Geotextiles and Geomembranes*, 28, 54-62.