

## بررسی مشخصه‌های مکانیکی خاک تثبیت شده با آهک و الیاف

محمد حسین نوری قیداری<sup>۱</sup>، محمد اسدی<sup>۲</sup>، سلیمان گروسی<sup>۳</sup>

۱ - محمد حسین نوری قیداری، Noori\_Mohammad@yahoo.com

۲ - محمد اسدی، Mohammadasadi\_1360@yahoo.com

۳ - سلیمان گروسی، Saed garousi@yahoo.com

### چکیده

تسلیح خاک با الیاف‌های مجزا تکنیک نسبتاً جدیدی در پروژه‌های ژئوتکنیک می‌باشد. در این تحقیق اثرات افزودن رشته‌ها و تریشه‌های الیاف در بهبود رفتار و خواص مکانیکی نوعی خاک رس (CL) تثبیت شده با آهک از دیدگاه آزمایشگاهی مورد مطالعه و ارزیابی قرار داده شده است. هدف اصلی این پژوهش نیز جذب و بازیافت تریشه‌های پلیمری-الیافی و استفاده از آنها در تسلیح خاک به منظور بهبود بخشیدن به خواص مهندسی آن می‌باشد. مراحل تحقیق به این صورت است که نمونه‌های از رس در آزمایشگاه با تریشه‌های کوتاه و نازک الیاف با درصدهای وزنی ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ درصد با درصدهای ۰، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد وزنی آهک تحت آزمایش‌های آزمایشگاهی از جمله تراکم و مقاومت فشاری قرار گرفته است. این الیاف‌ها جزء ضایعات کارخانه نختایر می‌باشد، که دارای مقاومت کششی زیاد و ماندگاری بسیار طولانی در خاک هستند. همچنین آزمایش‌ها فوق در زمان‌های ۱، ۷ و ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفته است. پس از تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشات، مشاهده گردید که حضور الیاف به همراه آهک در خاک موجب افزایش پارامترهای مقاومتی و شکل‌پذیری خاک شده، و گذشت زمان موجب بهبود مشخصات مکانیکی خاک شده است.

**کلید واژه‌ها:** تثبیت خاک، الیاف، خاک رس، مقاومت فشاری، آهک.

### مقدمه

بهبودی و بهبود خواص مکانیکی خاک با استفاده از مواد و مصالحی که موجب تقویت مشخصه‌های آن می‌گردد، از دیر باز مورد توجه بشر بوده است. منشاء این اندیشه را می‌توان در نمونه‌ها و الگوهای طبیعی نیز جستجو نمود [۱]. از دیدگاه مهندسی ژئوتکنیک روش‌های تقویت و بهبود خاک‌های ضعیف را می‌توان در سه گروه روش‌های مکانیکی (نظیر تراکم و زهکشی)، روش‌های شیمیایی (نظیر تثبیت خاک) و روش‌های فیزیکی (تسلیح خاک) دسته‌بندی نمود. در این میان خاک‌های رسی بدلیل ضعف مقاومت همواره در پروژه‌ها مسئله‌ساز بودند، بنابراین بهبود مشخصات مکانیکی این نوع خاک و یافتن روش بهینه می‌تواند از لحاظ اقتصادی نیز سودمند باشد. بدیهی است که در این تحقیق از الیاف ضایعاتی برای بهبود شکل‌پذیری نمونه‌ها استفاده شده است.

امروزه محققین در تلاشند که از مواد ضایعاتی برای کاهش هزینه عملیات اجرای پروژه استفاده کنند، در این میان استفاده از موادی از جمله خاکستر بادی، تریشه‌های تایر و الیاف گیاهی و مصنوعی را می‌توان نام برد. کومار و همکارانش (Kumar et al., 1999) بر اساس نتایج مطالعات آزمایشگاهی بر روی ماسه لای‌دار و خاکستر مسلح‌شده با توزیع تصادفی الیاف پلی‌استر اعلام کردند؛ که مواد افزوده شده در خاک باعث افزایش مقدار CBR، مقاومت و شکل‌پذیری نمونه‌ها می‌شوند. همچنین در این تحقیق با افزایش الیاف تأثیری بر روی منحنی تراکم مشاهده نشد. نتایج مشابه نیز توسط ماهر و هو (Maher and Ho, 1994)، ناتاراج و مک‌مانیس (Nataraj and McManis, 1997) گزارش شد.

<sup>۱</sup> عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی زنجان

<sup>۲</sup> مدرس دانشگاه آزاد اسلامی زنجان

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی زنجان

همچنین تانگ و همکاران (Tang et al., 2007) با انجام آزمایش‌های برش مستقیم و تک‌محوری بر روی رس مسلح شده با الیاف (تا ۲۵ درصد وزنی خاک خشک) و تثبیت شده با سیمان (تا ۸ درصد وزنی خاک خشک) دریافتند که الیاف‌ها مقاومت برشی و مقاومت فشاری رس تثبیت شده با سیمان را افزایش می‌دهد. همچنین وجود الیاف از شکنندگی حاصل از سیمانته شدن نمونه‌ها و سختی آنها را کاهش می‌دهد. سانتونی و همکاران، گروگان و جانسون (Santoni, et al, 2002; Grogan an Johnson 1993) گزارش کردند که الیاف‌های تسلیح کننده باعث افزایش تعداد رفت و آمد لازم برای گسیختگی جاده می‌شود.

## مصالح به‌کار برده شده در تحقیق

### خاک

در این تحقیق از خاک رس استفاده شده است، خاک مورد نظر از محل یکی از قرضه‌های پروژه سد تهم (واقع در ۲۵ کیلومتری شهر زنجان) تهیه شده است. طبق طبقه‌بندی یونیفاید خاک مورد نظر در رده خاکهای رس با حد خمیری کم (CL) قرار می‌گیرد. جدول (۱) مشخصات خاک مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات خاک مورد استفاده در این تحقیق

حد روانی (%)	۳۵/۳۰
حد خمیری (%)	۱۸/۰۲
نشانه خمیری	۱۷/۲۸
چگالی ویژه	۲/۶۲
دانسیته خشک حداکثر ( $\text{kN/m}^3$ )	۱۶/۸۳
رطوبت بهینه (%)	۲۲/۷۹
رنگ	قهوه‌ای

### آهک

آهک مصرفی در این پروژه، آهک صنعتی است که از نوع شکفته و در کیسه‌های ۵۰ کیلوگرمی تهیه و عرضه می‌شود. در این تحقیق آهک را در درصدهای وزنی ۰، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد خاک خشک با خاک مخلوط گردیده و مورد آزمایش قرار گرفتند.

### المان تسلیح

المان تسلیح کننده خاک در تحقیقات اولیه این پژوهش شامل چند نوع مختلف الیاف می‌شد، که از ضایعات شرکت نخ‌تایر صبا تهیه شده است. پس از بررسی‌های اولیه روی این الیاف‌ها، الیاف BTY در طول‌های ۲ سانتی‌متر برای انجام این پروژه در نظر گرفته شد، این الیاف در درصدهای وزنی ۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد خاک خشک با خاک مخلوط گردیده و مورد آزمایش قرار گرفتند.

### آزمایش تراکم بر روی مخلوط خاک و الیاف

جهت به‌دست آوردن رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر نمونه‌های خاک ترکیب شده با درصدهای مختلف الیاف و آهک، آزمایش تراکم براساس استاندارد شماره ASTM D 698-78 انجام گردید و مشاهده گردید با افزودن الیاف و آهک به خاک، دانسیته خشک ماکزیمم خاک کاهش و درصد رطوبت بهینه‌ی آن افزایش یافته است، به گونه‌ای که دانسیته خشک ماکزیمم و رطوبت بهینه‌ی برای مخلوط خاک با ۵ درصد آهک به ترتیب برابر با  $(\text{kN/m}^3)$  ۱۶/۴ و ۲۳/۹۴ درصد می‌رسد.

### آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده

براساس این آزمایش، می‌توان مقاومت نهائی (حداکثر) نمونه‌های استوانه‌ای از خاک‌های ریزدانه را تعیین نمود. همچنین در تعیین مقاومت درجای خاک نیز از این روش استفاده می‌شود، یکی از مزایای آزمایش فشاری محدود نشده این است که تنش‌ها و کرنش‌ها به شکل یکنواخت در نمونه ایجاد می‌شود. همچنین سطح شکست در ضعیف‌ترین قسمت نمونه اتفاق می‌افتد. در تحقیق حاضر آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده، طبق استاندارد شماره ASTM D 2166-87 انجام گردید.

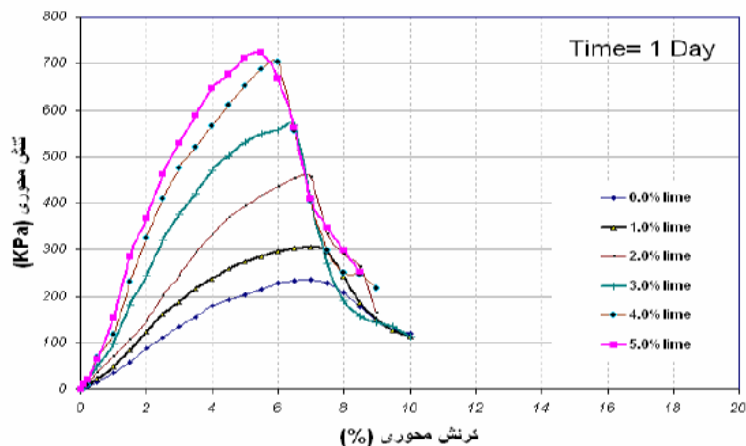
### نحوه‌ی آماده کردن نمونه

برای ساخت نمونه‌های در نظر گرفته شده در این تحقیق از یک قالب سه‌تیکه‌ی استوانه‌ای به قطر ۵۰ و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. برای تهیه و ساخت هر نمونه، مقدار خاک، آهک و الیاف لازم بر اساس مشخصات هندسی قالب، درصد وزنی الیاف و آهک و دانسیته

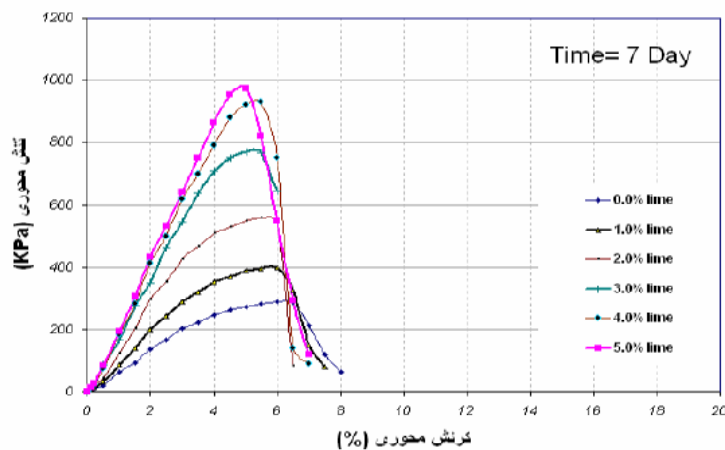
نمونه بدست آمده از آزمایش تراکم استاندارد محاسبه و با دقت بالا آماده می‌کنیم. سپس با توجه به درصد رطوبت بهینه هر یک از نمونه‌ها، مقدار آب لازم برای نمونه سازی را محاسبه و آماده می‌کنیم. برای اختلاط بهتر نمونه‌ها ابتدا خاک را با آهک به صورت خشک مخلوط کرده و سپس آن را با حدود نصف آب مورد نیاز مخلوط کرده سپس الیافها را کم کم به آن اضافه می‌کنیم و در ادامه باقی آب را به آن اضافه می‌کنیم، سپس آن را به صورت کامل مخلوط می‌کنیم. برای حفظ رطوبت و همگن تر شدن نمونه‌ها، آنها را داخل کیسه‌های نایلونی به مدت ۲۴ ساعت در محیطی نسبتاً تاریک قرار می‌دهیم، سپس مخلوط مورد نظر را به چهار قسمت مساوی تقسیم کرده و داخل قالب آزمایش تک-محوری با تعداد ضربات مشخص که از روش تراکم کاهش یافته بدست آوردیم متراکم می‌کنیم تا نمونه مورد نظر حاصل شود. نمونه را از قالب سه‌تیکه به آرامی بیرون آورده و زیر دستگاه تک‌محوری قرار داده و با سرعت  $1\text{mm/min}$  بارگذاری می‌کنیم و این عمل تا بعد از گسیختگی نمونه نیز ادامه یافته است.

### بررسی نمودارهای تنش- کرنش آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده

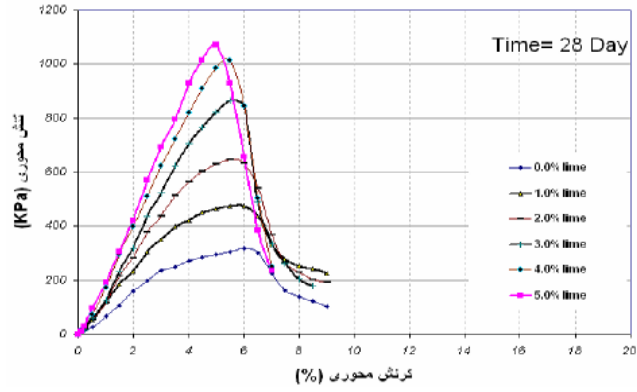
در این قسمت برای بررسی تاثیر آهک، نتایج نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های ترکیب شده با درصدهای وزنی آهک و الیاف در مقایسه با خاک طبیعی در اثر گذشت زمان نشان داده شده است.



شکل ۱: نمودارهای تنش-کرنش ۱ روزه برای خاک و خاک تثبیت شده با درصدهای وزنی آهک

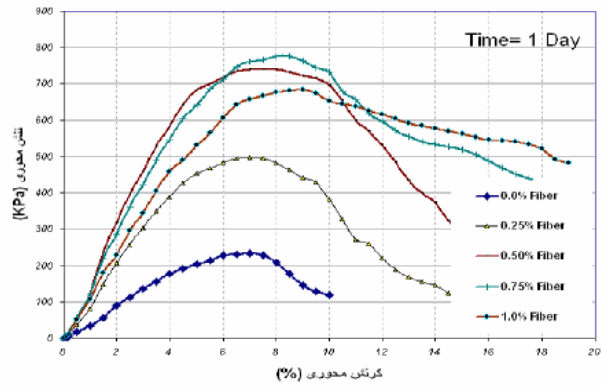


شکل ۲: نمودارهای تنش-کرنش ۷ روزه برای خاک و خاک تثبیت شده با درصدهای وزنی آهک

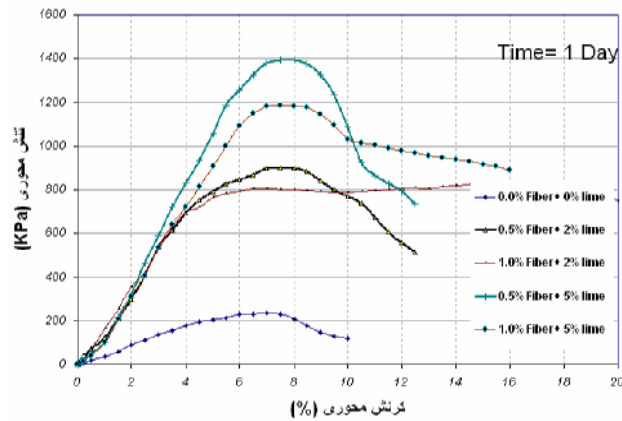


شکل ۳: نمودارهای تنش- کرنش ۲۸ روزه برای خاک و خاک تثبیت شده با درصدهای وزنی آهک

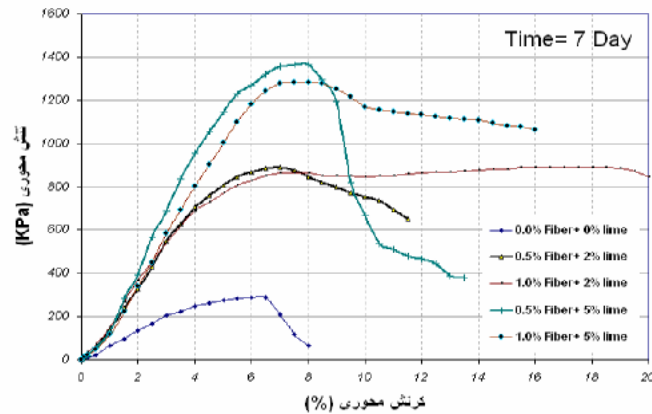
نمودارهای فوق نمایانگر این واقعیت هستند؛ که رفتار خاک به میزان زیادی تحت تأثیر حضور آهک قرار گرفته، و با افزودن درصدهای وزنی آهک به خاک مقاومت حداکثر افزایش یافته و کرنش در لحظه گسیختگی آن کاهش یافته و همچنین شیب منحنی‌های تنش - تغییرمکان بعد از مقاومت ماکزیمم، افزایش می‌یابد. به عبارتی نمونه‌ها تردتر می‌شوند، که برای افزایش شکل‌پذیری این نمونه‌ها درصدهای وزنی الیاف نیز به ترکیبات فوق افزوده گردید که در شکل‌های زیر نتایج نشان داده شده است.



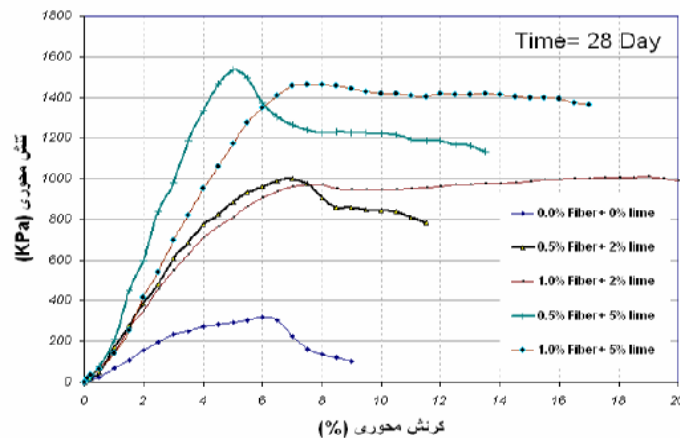
شکل ۴: نمودارهای تنش- کرنش ۱ روزه برای خاک و خاک مسلح شده با درصدهای وزنی الیاف



شکل ۵: نمودارهای تنش- کرنش ۱ روزه برای خاک و خاک تثبیت شده با درصدهای وزنی آهک و الیاف



شکل ۶: نمودارهای تنش- کرنش ۷ روزه برای خاک و خاک تثبیت شده با درصد های وزنی آهک و الیاف



شکل ۷: نمودارهای تنش- کرنش ۲۸ روزه برای خاک و خاک تثبیت شده با درصد های وزنی آهک و الیاف

### بررسی نحوه ی گسیختگی نمونه های آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده

نحوه ی تأثیر رشته های الیاف در امتداد سطوح گسیختگی در هنگام بارگذاری برای نمونه های آزمایش تک محوری را می توان به صورت زیر تشریح نمود.

۱- با اعمال تنش محوری، نمونه ها در امتداد قائم کاهش ارتفاع و در امتداد افق افزایش قطر می دهند. با افزایش قطر نمونه، رشته های الیاف نیز که در بین ذرات خاک درگیر هستند در امتداد افق افزایش طول داده و تنش های کششی در آنها بسیج می شود، عکس العمل این تنش ها موجب فشردگی ذرات در امتداد افق می گردد. در نتیجه آن تنش لازم برای جابجائی و لغزش ذرات نسبت به یکدیگر، مقاومت ماکزیمم و کرنش پذیری محیط افزایش می یابد.

۲- با ادامه افزایش تنش محوری گسیختگی از نقاط ضعیف تر شروع شده و به تدریج گسترش می یابد. در این حالت الیاف هایی که در این سطح قرار دارند نیز بیشترین تغییر طول را داده و کشیده می شوند. مولفه های عکس العمل این کشش، از یک طرف موجب فشردگی بیشتر بین دانه های خاک در ناحیه برشی می گردد و از طرف دیگر موجب شکل پذیری بهتر نمونه ها در نتیجه گسترش بیشتر عرض ناحیه برشی می گردد. در این میان الیاف هایی که دارای خاصیت کشسانی بالا باشند، تأثیر زیادی بر روی مشخصات مکانیکی خاک خواهند داشت.

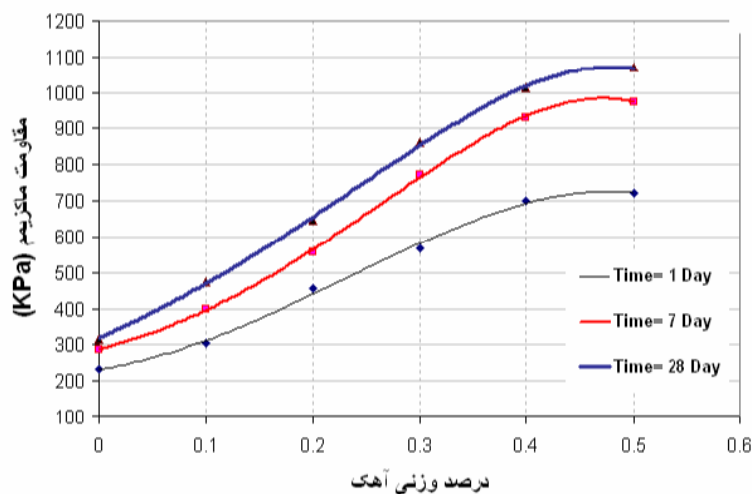
۳- با افزایش بیشتر تنش های محوری، نیروهای کششی بسیج شده در رشته های الیاف نیز بیشتر می گردد و بر حسب اینکه رشته های الیاف به حد جاری شدن برسند و یا این که در بین ذرات خاک به لغزش بیافتند، یکی از دو حالت زیر پیش خواهد آمد.

الف) چنانچه رشته های الیاف به حد جاری شدن برسند همزمان با تغییر شکل پلاستیک الیاف عرض ناحیه برشی افزایش می یابد و این افزایش تا پارگی آنها ادامه می یابد. از آنجا که تغییر شکل پلاستیک و حد جاری شدن الیاف مستقل از تنش اعمالی بین ذرات خاک است در این شرایط افزایش مقاومت و شکل پذیری محیط در اثر حضور الیاف را می توان با افزایش میزان چسبندگی و تعریف چسبندگی معادل خاک توجیه نمود.

ب) اگر سطح تنش های اعمالی در حدی باشد که رشته های الیاف در بین ذرات خاک به لغزش بیفتند، در این حالت بخشی از ذرات خاک که در طرفین ناحیه برشی (در همسایگی سطح برش) در تماس با رشته های الیاف می باشند نیز به لغزش افتاده و در نتیجه، در این شرایط عرض ناحیه برشی نیز افزایش می یابد.

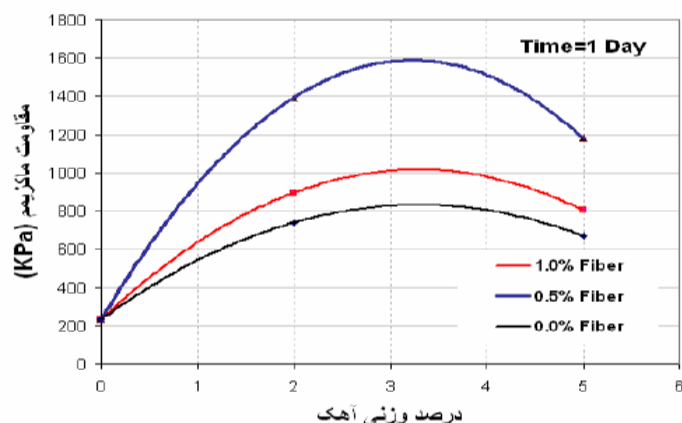
### بررسی حداکثر مقاومت نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده

در شکل (۸) تغییرات حداکثر مقاومت فشاری را بر حسب درصد افزایش آهک برای نمونه‌های مورد نظر در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد.

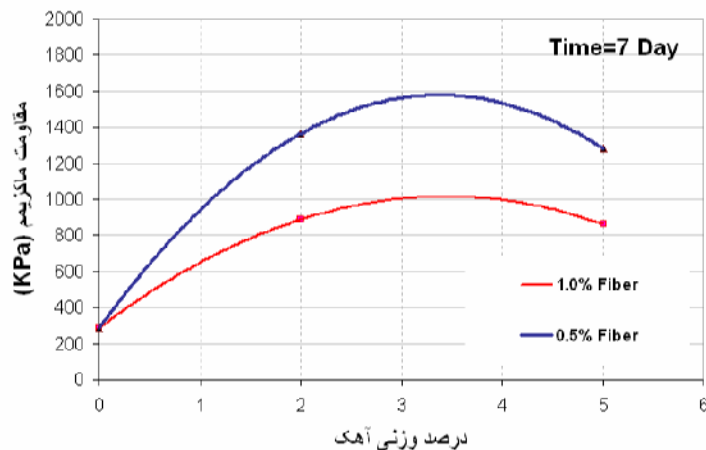


شکل ۸: نمودار حداکثر مقاومت برای خاک و خاک تثبیت شده با درصدهای وزنی آهک با گذشت زمان

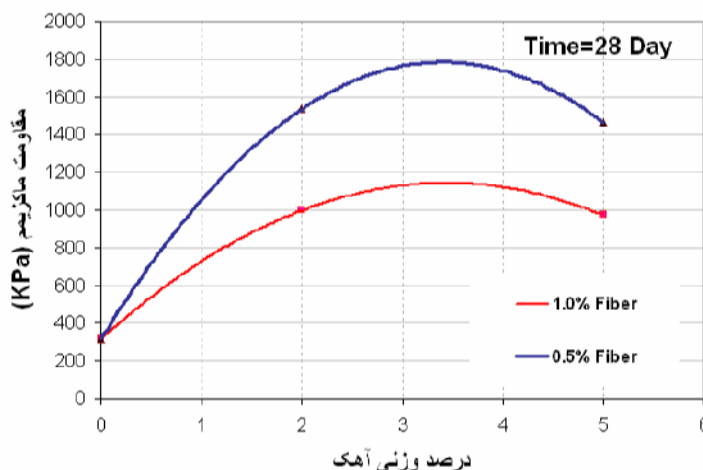
از اشکال (۴) تا (۷) می‌توان پارامترهای مقاومت خاک مسلح شده با درصدهای وزنی مختلف الیاف و آهک را با گذشت زمان تعیین نمود، که این پارامترها در ادامه بررسی شده است.



شکل ۹: نمودار حداکثر مقاومت ۱ روزه برای خاک و خاک تثبیت شده با درصدهای وزنی آهک و الیاف



شکل ۱۰: نمودار حداکثر مقاومت ۷ روزه برای خاک و خاک تثبیت شده با درصدهای وزنی آهک و الیاف



شکل ۱۱: نمودار حداکثر مقاومت ۲۸ روزه برای خاک و خاک تثبیت شده با درصدهای وزنی آهک والیاف

با توجه به نمودارهای نشان داده شده مشاهده می‌گردد که با افزایش درصد وزنی آهک مقاومت ماکزیمم نمونه‌ها افزایش یافته و میزان این افزایش با میزان درصد وزنی آهک مصرف شده رابطه مستقیم دارد، ولی نرخ تغییرات مقاومت برحسب میزان درصد وزنی آن کاهش می‌یابد. همچنین تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری نمونه‌ها جهت رسیدن به حداکثر مقاومت ۷ و ۲۸ روزه ارائه گردید. نتایج به‌دست آمده از منحنیهای آزمایشهای تک‌محوری، نشان‌دهنده عملکرد مثبت آهک و الیاف در بهبود خواص مقاومتی نمونه‌ها است.

با توجه به نتایج آزمایش‌های بدست آمده، مشاهده می‌شود که افزودن ۵ درصد وزنی آهک به خاک مورد نظر موجب می‌شود که مقاومت ۲۸ روزه خاک از ۳۱۷/۵ کیلوپاسکال به ۷۲۲ کیلوپاسکال (در حدود ۱۲۷ درصد) افزایش یابد، همچنین افزودن ۰/۵ درصد وزنی الیاف به ترکیب فوق موجب افزایش مقدار فوق به ۱۵۳۴ کیلوپاسکال (در حدود ۳۸۳ درصد افزایش) می‌شود. در صورتی که بیشترین تأثیر الیاف در ۰/۷۵ درصد وزنی الیاف BTY در طول دو سانتی‌متر بدست آمده که در این حالت مقدار مقاومت یک روزه خاک از ۲۳۷/۶ کیلوپاسکال به ۷۴۰ کیلوپاسکال (در حدود ۴۳۶ درصد) افزایش یافته و از این درصد به بعد با افزودن الیاف به خاک مقدار مقاومت فشاری خاک کاهش یافته است.

این نتیجه‌ای است که توسط بعضی از محققین دیگر نیز که در این زمینه تحقیق نموده‌اند، اعلام شده است (Bouhicha et al. (2005), Gray and Ohashi (1983), Ranjan et al. (1996), Yetimoglu, et al., 2003). همچنین در تحقیقی که یتیم‌اقلو و همکاران

با آزمایشات برش مستقیم انجام دادند، تغییراتی در افزایش مقاومت نمونه‌های مسلح شده با الیاف مشاهده نکردند.

با توجه به نتایج بدست آمده از نمونه‌ها به‌طور کلی مخلوط خاک با آهک موجب افزایش مقاومت و کاهش شکل‌پذیری در خاک شده، ولی افزودن الیاف به همراه آهک به خاک سبب افزایش بیشتر مقاومت و شکل‌پذیری نمونه‌ها گردیده که این نتایج با گذشت زمان بیشتر مشخص می‌گردد. از جمله موارد تأثیر گذار در شکل‌پذیری نمونه‌ها ایجاد گیرداری مناسب بین ذرات خاک مورد نظر با این نوع الیاف، کشسان بودن خود الیاف، مشخصات الیاف (شامل: طول، قطر، درصد جذب آب و ...) و شرایط آزمایشگاهی را می‌توان اشاره نمود.

نتایج بدست آمده از نمودارهای و نتایج مشاهدات مربوط به رفتار نمونه‌ها در هنگام بارگذاری می‌توان نتیجه گرفت که حضور الیاف در خاک معیار گسیختگی و امتداد سطوح لغزش را تغییر داده و عرض ناحیه برش را افزایش می‌دهد. سطح گسیختگی ایجاد شده در نمونه‌های مسلح به صورت نامشخص و زاویه آنها با افق بیشتر و نمونه‌ها به‌شکل خم‌های تبدیل می‌شوند. علت این موضوع را می‌توان این‌طور توجیه نمود که با افزایش درصد وزنی الیاف تعداد رشته‌ها در واحد حجم بیشتر شده، در نتیجه درجه همگنی و ایزوتروپی محیط افزایش می‌یابد، به عبارتی محیط به یک ماده همگن و الاستیک تبدیل می‌گردد.

## نتایج کلی

نتایج کلی این پژوهش را می‌توان به‌صورت زیر جمع بندی و خلاصه نمود:

- به‌طور کلی اضافه نمودن آهک به خاک باعث افزایش مقاومت، ظرفیت باربری و کاهش نرمی خاک می‌شود.
- در یک انرژی تراکم ثابت با افزودن آهک به خاک درصد رطوبت بهینه افزایش و دانسیته خشک ماکزیمم کاهش می‌یابد.
- مقاومت خاک مخلوط در یک نوع الیاف تابع درصد وزنی و خصوصیات الیاف بوده که به ازای آنها حالت بهینه برای بهبود مقاومت فراهم می‌شود.
- افزودن الیاف به مخلوط خاک و آهک، مقاومت خاک را افزایش داده و موجب افزایش بیشتر مقاومت و شکل‌پذیری خاک می‌شود.
- در تحقیق حاضر، درصد بهینه الیاف را می‌توان در حدود ۰/۷۵ درصد وزنی و درصد بهینه آهک را می‌توان در حدود ۵ درصد وزنی خشک خاک پیشنهاد نمود.

## فهرست مراجع

(۱) شلوسر، و دلاژ، پ.، (۱۳۷۶)، پلیمرها و سازه‌های مقاوم خاک مسلح، ترجمه عباس آخوندی، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

- 2) Al-Refeai, T. O. (1991), Behavior of granular soils reinforced with discrete randomly oriented inclusions. *Journal Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 10, No. 4, pp.319-333.
- 3) Bouhicha, M., et al., (2005), Performance of composite soil reinforced with barley straw, *Construction and Building Materials*, Elsevier, 27 (2005) 617–621.
- 4) Tang C., Shi b., Gao, W., Chen F. and Caiy. (2006). Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *J. Geotex and Geomem.* 25(2007): 194-202.
- 5) Wang, Y., Frost, J. D., & Murray, J., (2000), Utilization of recycled fiber for soil stabilization, *Proceedings of the fiber society Meeting, Portugal*, pp 59-62.
- 6) Nataraj, M. S., Mcmanis, K. L. (1997), Strength and deformation properties of soils reinforced with fibrillated fibers. *Geosynthetics Int.*, Vol. 4, No. 1, pp. 65-79.
- 7) Yetimoglu T., Salbas O., (2002). A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers. *J. Geotex and Geomem.* 21(2003): 103-110.