

## ارزیابی خصوصیات مکانیکی خاک ماسه سیمانی مسلح به الیاف پلی پروپیلن

نیما رنجبر مالی دره، گروه عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، مرکزی، ایران  
عیسی شوش پاشا، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، مازندران، ایران  
سید محمد میرحسینی، گروه عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، مرکزی، ایران  
مهدی دهستانی\*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، مازندران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: dehestani@nit.ac.ir

دریافت: ۹۷/۰۶/۱۰ - پذیرش: ۹۷/۰۱۱/۰۵

صفحه ۲۷۳-۲۶۳

### چکیده

خاک‌های ساحلی ماسه بادی بخش اعظمی از خاک‌های شمال کشور را تشکیل می‌دهند. این خاک‌ها به دلیل سست بودن و نداشتن خصوصیات مقاومتی مناسب برای اجرای راه‌ها، مشکلاتی را به همراه خواهند داشت. ماسه بادی در حالت محدود نشده، به دلیل نداشتن چسبندگی و دانه‌بندی یکنواخت با پدیده شسته شدن در زمان‌هایی که در مسیر جریان آب قرار می‌گیرند، مواجه می‌شوند. برای حل مشکل این نوع خاک‌ها، روش‌های مختلفی نظیر مسلح کردن آن‌ها با مواد مختلف استفاده می‌شود. در این پژوهش، به بررسی تاثیر افزودن درصد‌های مختلفی از الیاف پلی پروپیلن به ماسه غیرسیمانی و سیمانی بر مشخصات مکانیکی خاک ماسه‌ای ساحل بابلسر با انجام آزمایش‌های برش مستقیم و سه محوری پرداخته شد. مطابق نتایج به دست آمده، افزودن این الیاف سبب بهبود زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، مقاومت بیشینه، کرنش گسیختگی و مقاومت پسماند ماسه می‌شود. مقایسه نتایج آزمایش‌های برش مستقیم و سه محوری نشان داد که به واسطه جهت‌یابی مناسب‌تر الیاف نسبت به جهت کرنش‌های کششی اصلی در آزمایش‌های سه محوری، نسبت به آزمایش‌های برش مستقیم، کارایی و تأثیر آن‌ها بر رفتار مقاومتی خاک در نمونه‌های سه محوری بسیار چشم‌گیرتر است.

واژه‌های کلیدی: آزمایش برش مستقیم، آزمایش سه محوری، الیاف پلی پروپیلن، ماسه سیمانی، ماسه غیرسیمانی

### ۱- مقدمه

احداث شده بر روی آن لایه‌ها باشد [Hadad and Shafabakhsh, 2007 (in persian)]. در سال‌های اخیر، یکی از مهم‌ترین مشکلات، احداث سازه بر روی خاک‌های سست یا مسئله‌دار است. استفاده از روش تثبیت برای بهسازی زمین در پروژه‌های عمرانی سابقه‌ای نزدیک

ارزیابی و کنترل خواص مکانیکی قشرهای زمین و لایه‌های زیرسازی و روسازی در شبکه‌های حمل و نقل از جمله نیازهای اساسی در روند طرح، اجرا و همچنین نگهداری و بهسازی این نوع سیستم‌هاست. ارزیابی صحیح و منطبق با واقعیت از شرایط زیرسطحی زمین و قشرهای زیرسازی و روسازی می‌تواند تضمین‌کننده پایداری و دوام سازه‌های

جهت مقاومسازی بستر راهها است. افزودن سیمان علاوه بر افزایش مقاومت خاک، تردی آن را نیز افزایش می‌دهد. استفاده از الیاف توام با سیمان می‌تواند یکی از روش‌های مقابله با این معضل باشد. یکی از پرمصرف‌ترین انواع پلیمرها، پلی پروپیلن است که دارای رفتار شیمیایی پایدار و مقاوم در برابر خوردگی است و به دلیل خواص منحصر به فرد موارد مصرف فراوانی از جمله مسلح کردن خاک دارد [Jiang, Cai and Liu, 2010].

نتایج بررسی کمی مقاومت برشی بین سطحی خاک‌های مسلح با الیاف پلی پروپیلن با انجام آزمایش بیرون کشیدن نشان داد که مقاومت بین سطحی بیشینه و پسماند الیاف و خاک با افزایش چگالی خشک خاک افزایش و با افزایش درصد رطوبت کاهش می‌یابد. وجود سیمان به طرز چشمگیری مقاومت برشی بین سطحی الیاف و خاک را افزایش می‌دهد. همچنین مقاومت بین سطحی بیشینه و پسماند با افزایش درصد سیمان و مدت زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد [Tang, Shi and Zhao, 2010].

بررسی تأثیر الیاف پلی پروپیلن با توزیع تصادفی بر رفتار مقاومتی یک خاک خوب دانه‌بندی شده نشان داد که نمونه‌های مسلح رفتار انعطاف‌پذیرتری نسبت به نمونه‌های غیرمسلح از خود نشان می‌دهند [Zaimoglu, 2010]. بررسی مقاومت خمشی خاک ماسه سیمانی مسلح به الیاف پلی پروپیلن نشان داد که استفاده از این الیاف در مخلوط خاک به‌طور قابل توجهی سبب بهبود رفتار خمشی و مد گسیختگی آن (شکل پذیری) بعد از نقطه پیک می‌شود که از عوامل اساسی و بسیار مهم برای مصالح روسازی راه است [Jamsawang, Voottipruex and Horpibulsuk, 2014]. استفاده از الیاف به صورت تصادفی و با توزیع گسسته در خاک با استفاده از دو نوع الیاف طبیعی و مصنوعی نشان داد که مقاومت خاک مسلح به الیاف، با افزایش نسبت ابعاد، مقدار الیاف، مدول الیاف و سطح اصطکاک بین خاک و الیاف افزایش می‌یابد. همچنین مزایای فنی استفاده از الیاف در تسلیح خاک عبارتند از: جلوگیری از تشکیل ترک‌های کششی، افزایش هدایت هیدرولیکی و مقاومت در برابر روانگرایی، مهار گرایش تورم خاک‌های متورم شونده و کاهش شکنندگی خاک [Hejazi et al., 2012].

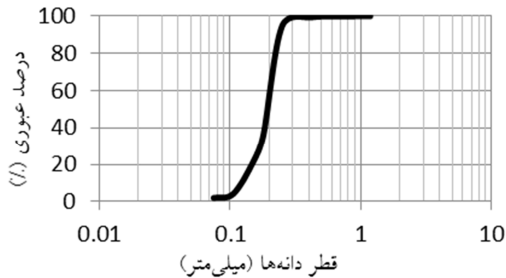
به ۱۰۰ سال دارد. این روش در بیشتر موارد در پروژه‌های راهسازی به‌منظور اصلاح خاک‌های نرم و کم مقاومت، بهبود مشخصات فنی خاک‌ها و مصالح شنی، ایجاد لایه‌های اساس و زیراساس با قابلیت باربری زیاد، بازسازی روسازی‌های فرسوده با استفاده از مصالح موجود و کاهش گرد و خاک و یا کاهش رطوبت مورد استفاده قرار گرفته است. برای انتخاب نوع ماده تثبیت‌کننده، انجام آزمایش‌ها و بررسی‌های دقیق خاک منطقه مورد نظر ضروری است، به طوریکه انتخاب نادرست روش تثبیت، نتایج نامناسب و افزایش هزینه‌های بلندمدت روسازی را در پی دارد (طباطبایی، ۱۳۸۰).

مقاومت در برابر نیروی کششی از ضعف‌های مهم خاک به شمار می‌رود. روش‌های بسیاری از جمله مسلح کردن برای بهسازی خاک به کار می‌رود. وجود الیاف مسلح‌کننده در توده خاک موجب افزایش مقاومت برشی مخلوط می‌شود [Akbulut, Arasan and Kalkan, 2007]. از مزایای استفاده از الیاف با توزیع تصادفی، اختلاط آسان با خاک و محدود نمودن تشکیل صفحات ضعیف ایجاد شده به موازات تقویت‌کننده‌ها است [Tang et al., 2007]. در دهه‌های اخیر، پژوهش‌های زیادی در زمینه مسلح نمودن خاک انجام شده است [Sridhar, 2017; Ates, 2016; Chen et al., 2015; Changizi and Haddad, 2015; Shao et al., 2014; Sivakumar Babu, and Raja Jaladurgam, 2014;].

خاک‌های مسلح با الیاف برای ترمیم شیب‌های گسیخته شده در جاهایی که شکل نامنظم وصله‌های خاک وجود دارد، مناسب است. استفاده از الیاف به عنوان عنصر تسلیح، یک روش موثر برای بهبود کیفیت و پایداری زیراساس در راهسازی است [Mirzababaei et al., 2012]. تحقیقات انجام شده در زمینه استفاده از الیاف در خاک‌های ماسه‌ای نشان داد که افزایش میزان الیاف در مخلوط، سبب بهبود رفتار مکانیکی و خواص مهندسی آن می‌شود [Malidarreh et al., 2017; Abedi Kohpaei, Soltaninan and Gheisary, 2015 (in persian); Ajdarpour, Nikoodel, Mohammadi, 2016 (in persian)].

پایداری بستر، به دلیل قرار گرفتن لایه‌های روسازی مانند قشرهای زیراساس و اساس بر روی آن، عامل مهمی در سرویس‌دهی و طول عمر روسازی است. [Kavussi and Saebi, 2017 (in persian)].

چگالی ۲/۷۴ استفاده شد. منحنی دانه بندی ماسه مورد استفاده در این پژوهش مطابق آزمایش دانه بندی با الک بر اساس ASTM-D422 در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. منحنی دانه بندی ماسه بابلسر

## ۲-۲- سیمان

در این پژوهش از سیمان پرتلند تیپ ۳ کارخانه سیمان نکا با مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب ۴۱۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع و زمان گیرش اولیه و نهایی به ترتیب ۱۴۰ و ۲۸۰ دقیقه استفاده شد.

## ۲-۳- الیاف پلی پروپیلن

شکل ظاهری و ویژگی های فیزیکی و مکانیکی الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده در این پژوهش به ترتیب مطابق شکل ۲ و جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۲. الیاف پلی پروپیلن

مطالعه ارزیابی عملکرد ترکیب الیاف پلی پروپیلن با طولها و مقادیر مختلف با توزیع تصادفی، ماسه و خاکستر بادی به عنوان مصالح بزرگراه، با استفاده از آزمایش ظرفیت باربری کالیفرنیا و زاویه شکست داخلی ماسه نشان داد که ظرفیت باربری کالیفرنیا به مقدار قابل توجهی افزایش یافت. همچنین مشاهده شد که با افزایش درصد خاکستر بادی مخلوط شده در خاک، مقدار بهینه رطوبت افزایش و حداکثر چگالی خشک کاهش یافت [Chore et al., 2012].

استفاده از نانو رس در تثبیت بستر خاکی ریزدانه نشان داد که مقاومت برشی، چسبندگی و تراکم پذیری خاک افزایش و زاویه شکست و نسبت تخلخل نهایی کاهش یافته و در نهایت مشکلات ناشی از فرسایش بستر کاهش می یابد [Bahari and Shahnazari, 2016 (in persian)].

بررسی آزمایشگاهی تاثیر افزودن درصدهای مختلف الیاف نارگیل به خاک رسی، با استفاده از آزمایش های مقاومت فشاری محصور نشده و نسبت باربری کالیفرنیا در شرایط حداکثر چگالی خشک و درصد رطوبت بهینه، نشان داد که افزودن این الیاف، به دلیل تاثیر آنها در تغییر رفتار خاک از ترد به نرم، سبب افزایش نسبت باربری کالیفرنیا و کاهش هزینه های ساخت شده و در نهایت باعث اقتصادی شدن ساخت بزرگراهها می شود [Singh and Mittal, 2014].

افزودن الیاف نخل خرما با ثابت نگه داشتن درصد سیمان در تثبیت خاک ساحلی جزیره قشم برای بستر روسازی، سبب کاهش حداکثر چگالی خشک و افزایش رطوبت بهینه، مقاومت های فشاری و کششی و ارتقاء قابل توجه مقادیر ظرفیت باربری کالیفرنیا خاک شد [Kavussi and Saebi, 2017 (in persian)].

در این تحقیق به بررسی تاثیر مسلح نمودن ماسه بابلسر با استفاده از درصدهای مختلف الیاف پلی پروپیلن و سیمان بر خواص مکانیکی آن پرداخته شد.

## ۲- مصالح

### ۲-۱- ماسه

در این پژوهش از خاک ماسه ای ساحل بابلسر با وزن مخصوص خشک حداکثر ۱/۷۴ گرم بر سانتی متر مکعب، وزن مخصوص خشک حداقل ۱/۴۸ گرم بر سانتی متر مکعب و

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی الیاف پلی پروپیلن

وزن مخصوص	۰/۹۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب
قطر	۲۳ میکرون
طول	۱۵ میلی‌متر
مقاومت کششی	۴۰۰ مگاپاسکال
مقاومت در برابر اسیدها و قلیاها	بالا



شکل ۳. نمونه ماسه سیمانی مسلح با الیاف پلی پروپیلن برای:  
الف- آزمایش برش مستقیم و ب- آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده

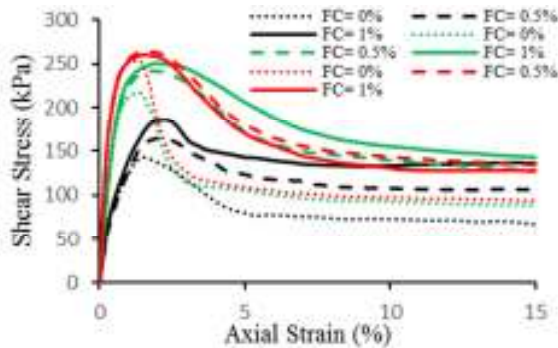
### ۳- روش‌ها

پارامترهای مقاومتی نمونه‌های آماده شده، با استفاده از آزمایش‌های برش مستقیم در سه فشار عمودی ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال بر اساس ASTM-D3080 و آزمایش‌های سه محوری نیز در سه فشار دورگیر ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال مطابق ASTM D4746-88 & D2850-87 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد ۳۸\*۷۶ میلی‌متر (قطر قاعده: ۳۸ میلی‌متر و ارتفاع: ۷۶ میلی‌متر) انجام شد.

### ۵- نتایج و بحث

#### ۱-۵- منحنی‌های تنش- کرنش آزمایش برش مستقیم

شکل ۴ منحنی تنش-کرنش محوری ماسه سیمانی مسلح به الیاف پلی پروپیلن و سیمان در فشار عمودی ۱۰۰ کیلوپاسکال در آزمایش برش مستقیم را نشان می‌دهد.

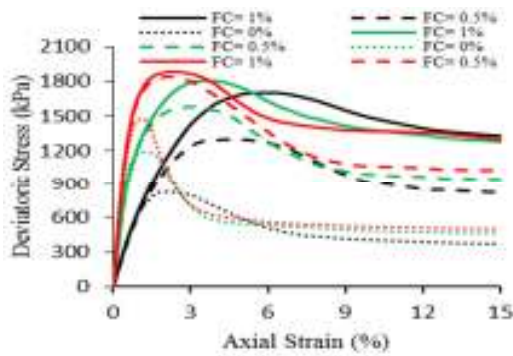


● ۳ درصد سیمان ● ۵ درصد سیمان ● ۷ درصد سیمان

شکل ۴. منحنی تنش-کرنش محوری در فشار عمودی ۱۰۰ کیلوپاسکال در آزمایش برش مستقیم برای ماسه سیمانی مسلح با درصد‌های مختلف الیاف پلی پروپیلن و درصد‌های مختلف سیمان.

#### ۴- آماده سازی، ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

در این پژوهش برای تهیه نمونه‌ها، ابتدا سیمان با نسبت‌های وزنی ۳، ۵ و ۷ درصد با آب مخلوط و سپس الیاف پلی پروپیلن با درصد‌های ۰/۵ و ۱ به آن‌ها اضافه و با میکسر همزده شد تا به صورت کاملاً همگن درآید. پس از تهیه مخلوط مصالح، نمونه‌های برش مستقیم و سه محوری آماده و هر نمونه جداگانه درون دو عدد کیسه پلاستیکی قرار داده شد تا رطوبت آن در مدت عمل‌آوری حفظ شود. نمونه‌ها پس از هفت روز عمل‌آوری به مدت ۲۴ ساعت در گرم‌خانه با دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند تا خشک شوند. سپس آزمایش‌های برش مستقیم و سه محوری بر روی آن‌ها انجام شد. شکل ۳ نمونه‌های آماده شده برای آزمایش‌های برش مستقیم و سه محوری را نشان می‌دهد.



● ۳ درصد سیمان ● ۵ درصد سیمان ● ۷ درصد سیمان

شکل ۵. منحنی تنش- کرنش محوری در فشار عمودی ۱۰۰ کیلوپاسکال در آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده برای ماسه سیمانی مسلح با درصدهای مختلف الیاف پلی پروپیلن و درصدهای مختلف سیمان.

همانطور که از شکل ۵ مشاهده می‌شود، مشابه نتایج آزمایش‌های برش مستقیم، افزودن الیاف باعث افزایش مقاومت بیشینه و کرنش گسیختگی نمونه‌ها می‌شود. با تجزیه و تحلیل نتایج مربوط به دو دسته آزمایش برش مستقیم و سه‌محوری و مقایسه آن‌ها می‌توان مشاهده نمود که تاثیر حضور الیاف در آزمایش‌های سه‌محوری بسیار بیش‌تر از آزمایش‌های برش مستقیم است. آرایش و جهت‌یابی الیاف و زاویه آن‌ها نسبت به جهت کرنش‌های کششی اصلی دلیل این پدیده است. در آزمایش‌های سه‌محوری نیز مشابه نتایج آزمایش برش مستقیم، با افزایش درصد سیمان، تاثیر الیاف بر مقاومت خاک سیمانی کم‌تر شده است. اما باید توجه نمود که در آزمایش‌های سه محوری، به دلیل کارایی و بازده بیش‌تر الیاف در توده خاک، میزان کم شدن تاثیر الیاف در درصدهای بالاتر سیمان، به اندازه آزمایش برش مستقیم نیست و در ۷ درصد سیمان، همچنان الیاف تاثیر چشمگیری بر مقاومت بیشینه و پسماند خاک دارند.

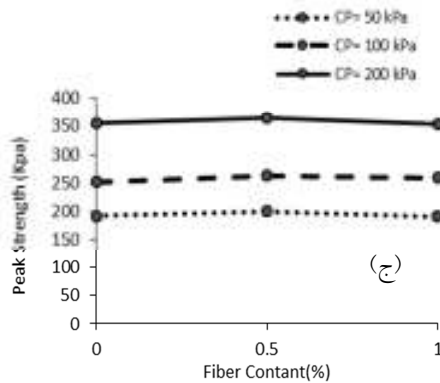
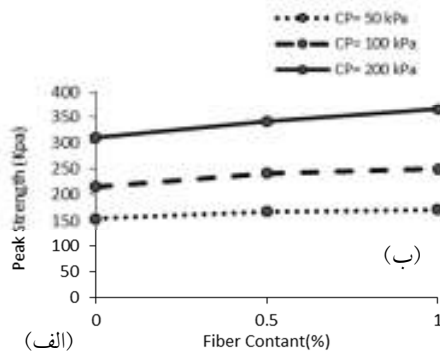
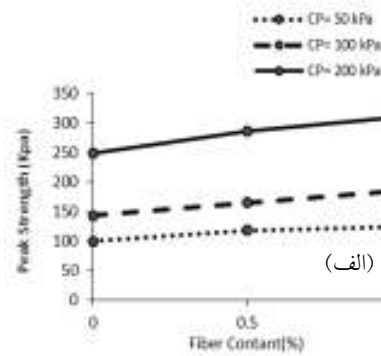
شکل ۴ برای نمونه‌های حاوی ۳ درصد سیمان، نشان می‌دهد که مسلح نمودن ماسه سیمانی با الیاف پلی پروپیلن باعث افزایش مقاومت بیشینه، مقاومت پسماند و کرنش گسیختگی نمونه و به طور کلی باعث بهبود مشخصات مکانیکی نمونه می‌شود. الیاف در نمونه‌های سیمانی تاثیر قابل توجهی بر مقاومت پسماند و کاهش میزان افت مقاومت پسماند دارد. با توجه به اینکه یکی از ضعف‌های نمونه‌های سیمانی، ترد بودن این مصالح و کاهش چشمگیر و ناگهانی مقاومت پس از مقاومت بیشینه است، نقش الیاف در بهبود این نقطه ضعف بسیار حائز اهمیت است. با توجه به منحنی‌های ارائه شده برای نمونه‌های حاوی ۵ و ۷ درصد سیمان، مشاهده می‌شود که با افزایش درصد سیمان، تاثیر الیاف بر مقاومت خاک سیمانی کم‌تر شده است. با افزایش درصد سیمان، ذرات با پیوند بسیار قوی‌تری به هم چسبیده و به سختی به لغزش می‌افتند. بنابراین مقاومت نمونه‌ها به طور چشمگیری افزایش یافته و سبب تاثیرگذاری کم‌تر الیاف می‌شود. افزودن الیاف به نمونه‌های دارای مقاومت زیاد، تاثیر چندانی در بهبود مقاومت آن‌ها ندارد. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌ها، نمونه‌های سیمانی در حضور الیاف، رفتار انعطاف‌پذیرتری از خود نشان می‌دهد.

## ۲-۵- منحنی‌های تنش-کرنش در آزمایش سه محوری

شکل ۵ منحنی تنش-کرنش محوری ماسه سیمانی مسلح به الیاف پلی پروپیلن و سیمان در فشار عمودی ۱۰۰ کیلوپاسکال در آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده را نشان می‌دهد.

### ۳-۵- مقاومت بیشینه در آزمایش برش مستقیم

شکل ۶ مقاومت بیشینه نمونه‌های سیمانی غیرمسلح و مسلح، با درصدهای مختلف سیمان بر اساس نتایج آزمایش برش مستقیم را نشان می‌دهد.

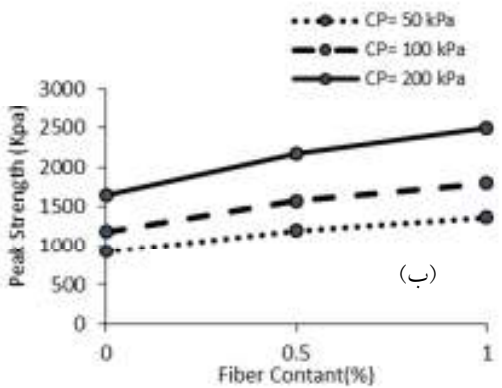
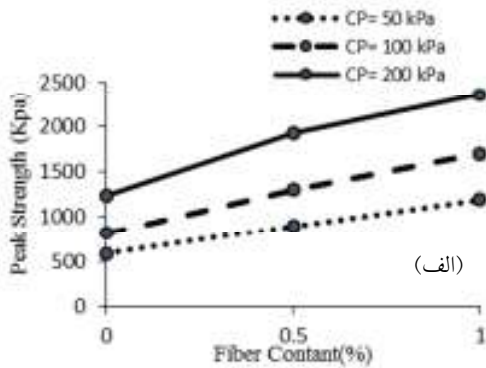


شکل ۶. مقاومت بیشینه نمونه‌های سیمانی در آزمایش برش مستقیم برحسب نسبت وزنی الیاف با: الف-۳ درصد سیمان، ب-۵ درصد سیمان، ج-۷ درصد سیمان.

با توجه به شکل ۶، در یک نسبت ثابت الیاف، با افزایش فشار عمودی، مقاومت افزایش می‌یابد. باید توجه داشت که در فشارهای بالاتر، خاک غیر مسلح، دارای مقاومت زیادی است. این امر سبب می‌شود تا با وجود اینکه مقدار عددی افزایش مقاومت در این فشارها به مقدار چشمگیری بیش‌تر از نمونه مشابه در فشار پایین‌تر است، نسبت افزایش مقاومت چندان بزرگ‌تر به نظر نرسد.

### ۴-۵ مقاومت بیشینه در آزمایش سه محوری

شکل ۷، مقاومت بیشینه نمونه‌های سیمانی غیرمسلح و مسلح، با درصدهای مختلف سیمان بر اساس نتایج آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده را نشان می‌دهد.



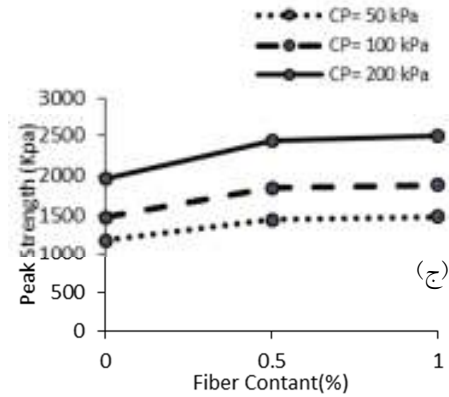
شکل ۷. مقاومت بیشینه نمونه‌های سیمانی در آزمایش سه محوری برحسب نسبت وزنی الیاف با: الف-۳ درصد سیمان، ب-۵ درصد سیمان، ج-۷ درصد سیمان.

مختلف الیاف پلی پروپیلن با ۳، ۵ و ۷ درصد سیمان در آزمایش برش مستقیم را نشان می‌دهد.

جدول ۲. ضرایب شکنندگی نمونه‌های سیمانی غیر مسلح و مسلح با الیاف پلی پروپیلن، با درصدهای مختلف سیمان بر اساس نتایج آزمایش برش مستقیم

ضرایب شکنندگی نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن			فشار عمودی (کیلوپاسکال)	نسب وزنی الیاف (درصد)
۷ درصد سیمان	۵ درصد سیمان	۳ درصد سیمان		
۰/۶۷	۰/۶۲	۰/۵۹	۵۰	۰
۰/۶۳	۰/۵۹	۰/۵۳	۱۰۰	
۰/۵۹	۰/۵۶	۰/۵	۲۰۰	
۰/۵۳	۰/۵۱	۰/۴	۵۰	۰/۵
۰/۴۹	۰/۴۷	۰/۳۶	۱۰۰	
۰/۴۷	۰/۴۲	۰/۳۴	۲۰۰	
۰/۵۵	۰/۵۲	۰/۳۵	۵۰	۱
۰/۵۱	۰/۴۳	۰/۲۷	۱۰۰	
۰/۴۶	۰/۳۸	۰/۲۴	۲۰۰	

از جدول ۲، می‌توان مشاهده نمود که عمل تسلیح ضریب شکنندگی را کاهش می‌دهد. در فشار عمودی ثابت برای نمونه‌های حاوی مقدار سیمان ثابت، با افزایش میزان الیاف، ضریب شکنندگی آن‌ها کاهش می‌یابد. برای مثال در فشار عمودی ۱۰۰ کیلوپاسکال برای نمونه حاوی ۳ درصد سیمان، با افزایش مقدار الیاف از ۰/۵ به ۱ درصد، ضریب شکنندگی از ۰/۳۶ به ۰/۲۷ کاهش یافت. علاوه بر این همانطور که انتظار می‌رود در فشار عمودی ثابت برای نمونه‌های حاوی مقدار



ادامه شکل ۷. مقاومت بیشینه نمونه‌های سیمانی در آزمایش سه محوری برحسب نسبت وزنی الیاف با: الف-۳ درصد سیمان، ب-۵ درصد سیمان، ج-۷ درصد سیمان

در این بخش نیز مانند آزمایش برش مستقیم مشاهده می‌شود که در مقدار ثابت الیاف، با افزایش فشار، مقاومت بیشینه افزایش می‌یابد. برخلاف نتایج مربوط به آزمایش برش مستقیم برای نمونه‌های حاوی ۷ درصد سیمان که با افزایش درصد الیاف در فشار ثابت، مقاومت بیشینه آن کاهش یافت. نتایج مربوط به آزمایش سه محوری نشان داد که برای نمونه‌های حاوی ۷ درصد سیمان، با افزایش درصد الیاف، افزایش مقاومت مشاهده شد.

#### ۵-۵ مقاومت پسماند

مقاومتی که خاک پس از گسیختگی از خود نشان می‌دهد، مقاومت پسماند است. ضریب شکنندگی برابر با تفاضل مقاومت بیشینه و مقاومت پسماند نسبت به مقاومت بیشینه است. هرچه این ضریب به صفر نزدیک‌تر باشد، مقاومت پسماند نمونه به مقاومت بیشینه آن نزدیک‌تر است و رفتار نمونه شکل‌پذیرتر می‌باشد [Ghoreyshi Zarinkolaie, 2014 (in persian)].

#### ۵-۵-۱ مقاومت پسماند در آزمایش برش مستقیم

جدول ۲، ضرایب شکنندگی نمونه‌های سیمانی مسلح برحسب فشارهای عمودی مختلف، برای نسبت‌های وزنی

مطابق جدول ۳، برای نمونه‌های سه‌محوری نیز مشاهده شد که انعطاف‌پذیری نمونه‌ها با افزایش مقدار سیمان کاهش و با افزایش میزان الیاف افزایش می‌یابد. این پدیده نشان‌دهنده تردتر شدن نمونه‌ها با افزایش مقدار سیمان و انعطاف‌پذیرتر شدن آن‌ها با افزایش میزان الیاف است.

الیاف ثابت، با افزایش میزان سیمان ضریب شکنندگی آن‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین انعطاف‌پذیری نمونه‌ها با افزایش مقدار سیمان کاهش و با افزایش میزان الیاف افزایش می‌یابد. این پدیده نشان‌دهنده تردتر شدن نمونه‌ها با افزایش مقدار سیمان و انعطاف‌پذیرتر شدن آن‌ها با افزایش میزان الیاف است.

#### ۶-۵- پارامترهای مقاومتی

۶-۱-۵- پارامترهای مقاومتی در آزمایش برش مستقیم  
جدول ۴ و ۵ به ترتیب مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نمونه‌های سیمانی غیرمسلح و مسلح با نسبت‌های وزنی مختلف الیاف پلی پروپیلن را نشان می‌دهد.

جدول ۴. زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های سیمانی غیرمسلح و مسلح با درصد‌های مختلف سیمان در آزمایش برش مستقیم

زاویه اصطکاک داخلی (درجه)			نسب وزنی الیاف (درصد)
۷ درصد سیمان	۵ درصد سیمان	۳ درصد سیمان	
۴۷	۴۶	۴۵	۰
۴۸	۴۹	۵۰	۰/۵
۴۷	۵۲	۵۲	۱

جدول ۵. چسبندگی نمونه‌های سیمانی غیرمسلح و مسلح با درصد‌های مختلف سیمان در آزمایش برش مستقیم

چسبندگی (کیلوپاسکال)			نسب وزنی الیاف (درصد)
۷ درصد سیمان	۵ درصد سیمان	۳ درصد سیمان	
۱۴۱	۱۰۷	۴۷	۰
۱۵۰	۱۱۹	۵۳	۰/۵
۱۴۳	۱۲۰	۵۶	۱

#### ۲-۵-۵ مقاومت پسماند در آزمایش سه محوری

جدول ۳، ضرایب شکنندگی نمونه‌های سیمانی مسلح برحسب فشارهای دورگیر مختلف، برای نسبت‌های وزنی مختلف الیاف پلی پروپیلن با ۳، ۵ و ۷ درصد سیمان در آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده را نشان می‌دهد.

جدول ۳. ضرایب شکنندگی نمونه‌های سیمانی غیرمسلح و مسلح با الیاف پلی پروپیلن، با درصد‌های مختلف سیمان بر اساس نتایج آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده

نسب وزنی الیاف (درصد)	فشار عمودی (کیلوپاسکال)	ضرایب شکنندگی نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن		
		۳ درصد سیمان	۵ درصد سیمان	۷ درصد سیمان
۰	۵۰	۰/۶۳	۰/۶۸	۰/۷۲
	۱۰۰	۰/۵۵	۰/۶۱	۰/۶۶
	۲۰۰	۰/۴۶	۰/۵۴	۰/۵۹
۰/۵	۵۰	۰/۴۴	۰/۴۷	۰/۵۳
	۱۰۰	۰/۳۷	۰/۴۰	۰/۴۴
	۲۰۰	۰/۲۹	۰/۳۵	۰/۴۰
۱	۵۰	۰/۲۹	۰/۳۵	۰/۴۰
	۱۰۰	۰/۲۶	۰/۲۹	۰/۳۱
	۲۰۰	۰/۲۲	۰/۲۶	۰/۲۷



جداول ۶ و ۷ نشان می‌دهند که افزودن الیاف به بهبود مشخصات مقاومتی نمونه‌ها کمک می‌نماید. با افزایش درصد الیاف، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی افزایش می‌یابد. بر خلاف نتایج آزمایش برش مستقیم که در ۷ درصد سیمان و ۱ درصد الیاف، تاثیر الیاف بر زاویه اصطکاک داخلی منفی بود، در این بخش، با توجه به جدول ۶ مشاهده می‌شود که در تمامی حالات، با افزودن الیاف، مقدار زاویه اصطکاک داخلی افزایش می‌یابد. با این وجود می‌توان کم‌تر شدن تاثیر الیاف را در درصدهای بالاتر سیمان مشاهده نمود. به عنوان مثال، با افزودن یک درصد الیاف پلی پروپیلن به ماسه با ۳ درصد سیمان، زاویه اصطکاک داخلی از ۴۳ به ۴۵ درجه، این مقدار برای ماسه با ۵ درصد سیمان از ۴۵ به ۵۲ و برای ماسه با ۷ درصد سیمان از ۴۶ به ۵۱ می‌رسد که به ترتیب بیانگر افزایشی برابر با ۱۰، ۷ و ۵ درجه می‌باشد. همچنین با مشاهده جدول ۷ می‌توان مشاهده نمود که در تمامی حالات افزودن الیاف به نمونه‌های سیمانی موجب افزایش چسبندگی شده است.

## ۶- نتیجه گیری

اهم نتایج به دست آمده از افزودن الیاف پلی پروپیلن با توزیع تصادفی به خاک ماسه سیمانی بابلسر مطابق زیر است:

- به طور کلی با افزایش نسبت وزنی الیاف، مقدار زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نمونه‌ها بیش تر می‌شود.
- با افزایش فشار عمودی و دورگیر در آزمایش‌های برش مستقیم و سه‌محوری، مقاومت بیشینه افزایش می‌یابد.
- سیمان یکی از مواد پرکاربرد برای تثبیت بستر راه‌ها است و باعث افزایش مقاومت خاک می‌شود، اما تردی آن را نیز افزایش می‌دهد. افزودن الیاف به خاک موجب کاهش ضریب شکنندگی و به عبارتی افزایش شکل‌پذیری می‌شود.
- به دلیل جهت‌یابی تقریباً افقی بخش عمده‌ای از الیاف و هم‌راستایی این جهت‌یابی با جهت کرنش‌های کششی اصلی در آزمایش‌های سه‌محوری فشاری، تاثیر عمل

مطابق جداول ۵، به طور کلی با افزایش نسبت وزنی الیاف، مقدار زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی بیش تر می‌شود. همچنین با توجه به میزان افزایش زاویه اصطکاک داخلی در جدول ۴، می‌توان سیر کاهشی تاثیر الیاف بر زاویه اصطکاک داخلی را با افزایش درصد سیمان مشاهده کرد. در مورد چسبندگی نمونه‌ها می‌توان از جدول ۵ مشاهده نمود که به طور کلی با وجود چسبندگی بالای نمونه‌های سیمانی، حضور الیاف موجب افزایش چسبندگی شده است.

## ۲-۶-۵ پارامترهای مقاومتی در آزمایش سه محوری

جدول ۶ و ۷ به ترتیب مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نمونه‌های سیمانی غیرمسلح و مسلح با نسبت‌های وزنی مختلف الیاف پلی پروپیلن را نشان می‌دهد.

جدول ۶. زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های سیمانی غیرمسلح و مسلح با درصدهای مختلف سیمان در آزمایش سه محوری

زاویه اصطکاک داخلی (درجه)			نسب وزنی الیاف (درصد)
۷درصد سیمان	۵درصد سیمان	۳درصد سیمان	
۴۶	۴۵	۴۳	۰
۵۰	۵۰	۵۱	۰/۵
۵۱	۵۲	۵۳	۱

جدول ۷. چسبندگی نمونه‌های سیمانی غیرمسلح و مسلح با درصدهای مختلف سیمان در آزمایش سه محوری

چسبندگی (کیلوپاسکال)			نسب وزنی الیاف (درصد)
۷درصد سیمان	۵درصد سیمان	۳درصد سیمان	
۱۸۶	۱۴۰	۷۷	۰
۲۰۰	۱۵۹	۱۰۱	۰/۵
۲۰۴	۱۶۹	۱۳۶	۱

-طباطبایی، الف. م.، (۱۳۸۰)، "روسازی راه" مرکز نشر دانشگاهی، تهران.

-عابدی کوپایی، ج.، سلطانیان، س. و قیصری، م.، (۱۳۹۴)، "تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر ویژگی‌های مکانیکی ماسه بادی"، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۱، جلد ۹، ص. ۳۱-۲۲.

-کاووسی، الف.، صائبی، ج.، (۱۳۹۵)، "تثبیت خاک نامرغوب ساحلی با استفاده از سیمان و الیاف نخل خرما برای بستر روسازی‌ها"، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، دوره ۲، شماره ۴، ص. ۶۱-۷۲.

-قریشی زرین کلایی، س. ط. (۱۳۹۲)، "مقایسه مشخصات مقاومتی ماسه مسلح با رشته‌های مجزا با توزیع تصادفی در دستگاه‌های سه محوری و برش مستقیم"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.

-Akbulut, S., Arasan, S. and Kalkan, E. (2007), "Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers", Applied Clay Science, Vol.38, No.1, pp. 23-32.

-Ateş, A., (2016), "Mechanical properties of sandy soils reinforced with cement and randomly distributed glass fibers (GRC)", Composites Part B: Engineering, Vol.96, pp. 295-304.

-Changizi, F., & Haddad, A. (2015), "Strength properties of soft clay treated with mixture of nano-SiO<sub>2</sub> and recycled polyester fiber", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol.7, No.4, pp. 367-378.

-Chen, M., Shen, S. L., Arulrajah, A., Wu, H. N., Hou, D. W., & Xu, Y. S. (2015), "Laboratory evaluation on the effectiveness of polypropylene fibers on the strength of fiber-reinforced and cement-stabilized Shanghai soft clay", Geotextiles and Geomembranes, Vol.43, No.6, pp. 515-523.

-Chore, H. S., Kumthe, A. A., Abnave, S. B., Shinde, S. S., Dhole, S. S., & Kamerkar, S. G. (2011), "Performance evaluation of polypropylene fibers on sand-fly ash mixtures in highways", Journal of Civil Engineering (IEB), 39(1), pp.91-102.

تسلیح با الیاف مجزا در آزمایش‌های سه‌محوری بسیار چشمگیرتر از آزمایش‌های برش مستقیم است.

• با افزایش درصد سیمان، تاثیرگذاری الیاف بر مشخصات مقاومتی ماسه سیمانی کم می‌شود. زیرا سیمان به تنهایی آنقدر مقاومت نمونه را افزایش می‌دهد که تاثیر الیاف در رقابت با آن بسیار ناچیز است به طوری که در درصد‌های بالاتر سیمان، عامل تعیین کننده سیمان است.

• استفاده از الیاف پلی پروپیلن در نمونه‌های ماسه سیمانی، موجب بهبود پارامترهای مقاومتی خاک (C و  $\phi$ ) و به دنبال آن افزایش مقاومت فشاری می‌شود. از اینرو کنترل نشست و تغییر شکل‌های دائمی بستر راه که از معیارهای اصلی طرح و کنترل روسازی راه است، برآورده می‌شود. بنابراین از خاک ماسه سیمانی مسلح به الیاف پلی پروپیلن می‌توان به عنوان مصالحی مناسب برای بستر راه‌ها استفاده نمود.

## ۷-مراجع

-آزدرپور، م.، نیکودل، م. ر. و محمدی، س. د. (۱۳۹۴)، "ارزیابی نقش خرده‌های بطری بازیافتی و فیبرلاستیک فرسوده بر رفتار مهندسی خاک ماسه‌ای"، فصلنامه علمی-پژوهشی علوم زمین، شاخه مهندسی محیط زیست، دوره ۹۵-۲۴، ص. ۱۳۵-۱۴۰.

-بهاری، م.، شاه نظری، ع. (۱۳۹۴)، "بررسی آزمایشگاهی تثبیت بستر خاکی ریزدانه با استفاده از نانورس" فصلنامه علمی پژوهشی علوم آب و خاک، دوره ۱۹، شماره ۷۲، ص. ۱۰۷-۱۱۳.

-حداد، ع. ح. و شفابخش، غ.ع.، (۱۳۸۵)، "بررسی و تحلیل سختی بستر ماسه ای زیربناهای حمل و نقل با استفاده از آزمایش های امواج سطحی پیوسته و بارگذاری صفحه"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال سوم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۸۵، ص. ۲۶۹-۲۷۶.

- Singh, R. R., & Mittal, E. S. (2014), "Improvement of local subgrade soil for road construction by the use of coconut coir fiber", *International Journal of Research in Engineering and Technology* eISSN, pp.2319-1163.
- Sivakumar Babu, G. L., and Raja Jaladurgam, M. E. (2014), "Strength and Deformation Characteristics of Fly Ash Mixed with Randomly Distributed Plastic Waste", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 26, No.12, pp. 04014093.
- Sridhar, R. (2017), "A Review on Cyclic Strength of Fiber Reinforced Soil", *International Journal of Materials Science*, Vol.12, No.1, pp. 33-46.
- Tang, C. S., Shi, B., & Zhao, L. Z. (2010), "Interfacial shear strength of fiber reinforced soil", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.28, No.1, pp. 54-62.
- Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F. and Cai, Y. (2007), "Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil", *Geotextiles and Geo membranes*, Vol.25, No.3, pp. 194-202.
- Zaimoglu, A. S. (2010), "Freezing–thawing behavior of fine-grained soils reinforced with polypropylene fibers", *Cold regions science and technology*, Vol. 60, No.1, pp.63
- Hejazi, S. M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S. M., and Zadhoush, A. (2012), "A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers", *Construction and building materials*, Vol.30, pp.100-116.
- Jiang, H., Cai, Y., & Liu, J. (2010), "Engineering properties of soils reinforced by short discrete polypropylene fiber", *Journal of Materials in civil Engineering*, Vol.22, No.12, pp. 1315-1322.
- Jamsawang, P., Voottipruex, P., and Horpibulsuk, S. (2014), "Flexural strength characteristics of compacted cement-polypropylene fiber sand", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 27, No.9, pp.04014243.
- Jamshidi, R., Towhata, I., Ghiassian, H., and Tabarsa, A. R. (2010), "Experimental evaluation of dynamic deformation characteristics of sheet pile retaining walls with fiber reinforced backfill", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.30, No.6, pp. 438-446.
- Malidarreh, N. R., Shooshpasha, I., Mirhosseini, S. M., & Dehestani, M. (2017), "Effects of reinforcement on mechanical behavior of cement treated sand using direct shear and triaxial tests", *International Journal of Geotechnical Engineering*, pp. 1-9.
- Mirzababaei, M., Mirafteb, M., Mohamed, M., and McMahan, P. (2012), "Unconfined compression strength of reinforced clays with carpet waste fibers", *Journal of Geotechnical and Geo environmental Engineering*, Vol.139, No.3, pp.483-493.
- Shao, W., Cetin, B., Li, Y., Li, J., & Li, L. (2014), "Experimental investigation of mechanical properties of sands reinforced with discrete randomly distributed fiber", *Geotechnical and Geological Engineering*, 32(4), pp.901-910.