

بررسی رفتار برشی زهکشی نشده‌ی ماسه‌ی سیمانه شده با پلیمر پی تکس و مسلح شده با الیاف ضایعاتی نخ تایر

علیرضا خلیلی (دانشجوی دکتری)

محمود حسنلوراد* (دانشیار)

علیرضا اردکانی (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۲
دوری ۳۹، شماره ۴، صص. ۱۲۳-۱۳۶، (پژوهشی)

در نوشتار حاضر، رفتار برشی ماسه‌ی نکا با دانه‌بندی یکنواخت، که با استفاده از یک مایع پلیمری به نام پی تکس تثبیت شده و با استفاده از الیاف ضایعاتی نخ تایر مسلح شده است، با انجام آزمایش‌های سه‌محوری تحت تنش‌های همه‌جانبه‌ی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال بررسی شده است. درصد پلیمر به مقدار صفر تا ۴٪ و الیاف به اندازه‌ی ۲٪ وزن خاک خشک به آن اضافه شده‌اند. نمونه‌ها در تراکم بیشینه ساخته و در دمای ۲۳ درجه تا ۲۷۰ روز نگهداری شده‌اند. نتایج نشان داد که پلیمر پی تکس، پتانسیل خوبی جهت تثبیت خاک‌های دانه‌بی داشته و در اثر تثبیت، پارامترهای مقاومتی و سختی خاک تا چند برابر ارتقاء یافته است. به نحوی که افزودن ۴٪ پلیمر، باعث افزایش چسبندگی ماسه‌ی خالی تقریباً از صفر تا ۱۳۵ kPa برای نمونه‌ی بدون الیاف و ۹۰ kPa برای نمونه با الیاف شده است. با این حال، رفتار نمونه‌ی تثبیت شده، تُرد بوده و عموماً در کرنش‌های کمتر از ۳٪ شکسته و بعد از نقطه‌ی شکست، دچار نرم‌شوندگی زیادی شده‌اند. حضور الیاف، کرنش نظیر نقطه‌ی شکست را کمی افزایش داده است؛ ولی به طور قابل‌توجهی رفتار نمونه را بعد از نقطه‌ی شکست انعطاف‌پذیرتر کرده و سبب جلوگیری از افت سریع مقاومت برشی شده است.

واژگان کلیدی: خاک ماسه‌ی نکا، پلیمر پی تکس، الیاف نخ تایر، آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته‌ی زهکشی نشده.

alirezakhalili@edu.ikiu.ac.ir
hassanlou@eng.ikiu.ac.ir
a.ardakani@eng.ikiu.ac.ir

۱. مقدمه

زمینست خواهد بود. از طرفی، استفاده‌ی هم‌زمان از دو روش تثبیت و تسلیح خاک منجر به ارتقاء ویژگی‌های مکانیکی و ژئوتکنیکی در خاک می‌شود. در این ارتباط، مطالعات مختلفی انجام شده است، که در ادامه، به نمونه‌هایی از آنها اشاره شده است:

خانپاشی و همکاران (۲۰۰۳)، با استفاده از پلیمرهای محلول در آب وینیل آکریلیک و اتیرین آکریلیک در خاک ماسه‌ی پرداختند و گزارش کردند با افزایش مقدار پلیمر، مقاومت فشاری تا ۱/۴ MPa و مدول کشسانی تا ۱۷ GPa، افزایش یافته است.^[۱]

مایخالوسکی و سرماک^۳ (۲۰۰۳)، ماسه‌های ریز و درشت را با سه نوع الیاف: پلی‌آمید، پلی‌پروپیلن و سیم فولادی گالوانیزه به وسیله‌ی دستگاه سه‌محوری استاتیکی

مهندسان همواره با روش‌های مختلفی درصدد تقویت خاک به علت ناکافی بودن مقاومت برشی آن بوده‌اند. پیشرفت سریع علوم و تکنولوژی در زمینه‌های مختلف، موجب پیدایش مواد جدید برای تثبیت (مانند انواع پلیمرها) و تسلیح (مانند انواع الیاف پلی‌پروپیلن^۱، پلی‌آمید^۲ و غیره) خاک می‌شود. الیاف ذکر شده معمولاً دارای خواص مهمی از جمله: انعطاف‌پذیری، دوام، مقاومت کششی زیاد و همچنین مقاومت مناسب در برابر عوامل شیمیایی هستند. از آنجایی که در زمینه‌ی تولیدات، همیشه ضایعاتی از این نوع محصولات به وجود می‌آید، لذا استفاده‌ی صحیح از آنها در چالش پروژه‌های مهندسی، گامی مؤثر در بهبود اقتصاد کشور و کمک به محیط

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۱۱/۲۳، اصلاحیه ۱۴۰۲/۱/۲۰، پذیرش ۱۴۰۲/۱/۲۸.

استناد به این مقاله:

خلیلی، علیرضا، حسنلوراد، محمود، و اردکانی، علیرضا، ۱۴۰۲. بررسی رفتار برشی زهکشی نشده‌ی ماسه‌ی سیمانه شده با پلیمر پی تکس و مسلح شده با الیاف ضایعاتی نخ تایر.

مهندسی عمران شریف، ۳۹(۴)، صص. ۱۲۳-۱۳۶. DOI:10.24200/J30.2023.61814.3197

بررسی کردند و دریافتند که مقاومت نهایی نمونه با افزایش درصد وزنی الیاف در تنش هم‌جانبه‌ی ۶۰۰ تا ۲۲۰۰ (kPa)، افزایش و شیب منحنی کرنش نمونه‌ها کاهش می‌یابد.^[۲]

آناگنوستوپولس^۴ (۲۰۰۵) گزارش کرد که اضافه کردن دوغاب پلیمر (آکریلیک رزین^۵ و متیل متا اکریلات^۶) و سیمان بر خاک ماسه‌یی باعث افزایش مقاومت فشاری تا ۱۲۰۰۰ kPa و مدول کشسانی خاک تا ۸۰۰ MPa می‌شود.^[۳] چاوآن و همکاران (۲۰۰۸)، به بررسی اثر الیاف پلی‌پروپیلن و نارگیل^۷ در ماسه‌ی سیلت‌دار با استفاده از آزمایش فشاری محصور نشده پرداختند و دریافتند که ترکیب ۷۰٪ ماسه‌ی سیلت‌دار و ۳۰٪ خاکستر بادی به همراه ۷۵٪ الیاف نارگیل، بیشینه‌ی مقاومت فشاری (3148 kN/m^2) را ایجاد می‌کند.^[۴]

شاه‌نظری و همکاران (۲۰۰۹)، با استفاده از آزمایش‌های سه‌محوری بر روی دو نوع خاک ماسه‌ی لای‌دار و ماسه‌ی توپورا به بررسی اثر حضور الیاف موکت و ژئوتکستایل پرداختند و دریافتند که حضور الیاف موجب افزایش شکل‌پذیری خاک مسلح نسبت به خاک غیرمسلح می‌شود. همچنین مدول برشی و محوری نمونه‌های مسلح شده در فشار هم‌جانبه‌ی پایین کاهش می‌یابد، اما در فشارهای هم‌جانبه‌ی بالا افزایش می‌یابد.^[۵]

کنسولی و همکاران (۲۰۰۹)، تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن کشسان در مقاومت ماسه‌ی سیمانی شده به طور مصنوعی را با استفاده از یک سری آزمایش سه‌محوری زهکشی شده بررسی کردند و الیاف با قطر ۰/۲۴ و طول ۲۴ میلی‌متر، در درصد‌های ۰ تا ۵٪ نسبت به وزن خشک مخلوط ماسه - سیمان را به کار بردند. براساس نتایج به دست آمده از پژوهش اخیر، افزودن ۱٪ سیمان به ماسه، به طور چشمگیری سختی را تا 600 MN/m^2 و مقاومت بیشینه را تا 1850 kN/m^2 افزایش داده و رفتار ماسه را به طور قابل‌توجهی ترد و شکننده کرده است. رفتار شکل‌پذیری نمونه‌های مسلح شده به الیاف، در مقادیر ۴٪ سیمان و پایین‌تر از آن و نیز رفتاری با تردی کمتر در درصد‌های بالاتر نشان داده‌اند. کرنش محوری متناظر با گسیختگی و رفتار پس از مقاومت بیشینه، وابسته به میزان الیاف در ترکیب است. همچنین رفتار اتساع ماسه به شدت به میزان الیاف و سیمان بستگی دارد. اضافه کردن الیاف در نمونه‌های سیمانی نشده، تغییری در سختی اولیه نشان نداده است، که رفتاری مشابه با رفتار مشاهده شده توسط هینک (۲۰۰۵)، داشته است.^[۶]

پارک (۲۰۰۹)، اثر چگونگی توزیع الیاف پلی‌وینیل الکل^۸ در مقاومت ماسه‌ی تثبیت شده با سیمان را با استفاده از آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده بررسی کرده و دریافت است که مقاومت فشاری محدود‌نشده‌ی نمونه‌های مسلح به الیاف تثبیت شده با سیمان، به طور تدریجی با افزایش تعداد لایه‌های مسلح به الیاف بیشتر می‌شود. استفاده از خاک‌های مسلح به الیاف لزوماً افزایش مقاومت موردانتظار یا طراحی ایمن را تضمین نمی‌کند.^[۷]

ناینی و مهدوی (۲۰۰۹)، مقاومت خاک ماسه‌یی سیلتی تثبیت شده با پلیمر پلی‌متیل متا اکریلات^۹ را با استفاده از آزمایش برش مستقیم بررسی کرده‌اند. مقادیر سیلت افزوده شده به خاک ماسه‌یی، ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد وزن خاک ماسه‌یی و مقدار پلیمر استفاده شده نیز صفر، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱٪ درصد وزن خاک خشک ماسه‌یی بوده است. نتایج پژوهش اخیر نشان داد که استفاده از پلیمر مذکور، مقاومت خاک ماسه‌یی و خاک ماسه‌یی سیلتی را تا بیشینه‌ی kPa ۴۰۰ افزایش داده و با افزایش مقدار پلیمر به کار رفته در همه‌ی حالت‌ها، مقاومت افزایش یافته است.^[۸]

ناینی و قربانعلی‌زاده (۲۰۱۰)، مقاومت ماسه‌ی سیلت‌دار تثبیت شده با پلیمر

رزین اپوکسی^{۱۰} را در شرایط ترو خشک با استفاده از آزمایش فشاری محدود نشده بررسی کرده‌اند. مقدار رزین استفاده شده، ۳، ۴ و ۵ درصد وزن ماسه‌ی لای‌دار و میزان لای، ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۳۵، ۴۵ و ۶۰ درصد وزن کل خاک بوده است. براساس نتایج پژوهش ایشان، افزایش زمان عمل‌آوری در تمامی حالت‌ها و افزایش میزان پلیمر منجر به افزایش مقاومت و همچنین آب و افزایش درصد سیلت، باعث کاهش مقاومت نمونه‌ها شده است.^[۹]

صادق و همکاران (۲۰۱۰)، با استفاده از سه نوع الیاف مختلف از جنس نایلون بر خاک ماسه‌یی ریز و درشت‌دانه به وسیله‌ی آزمایش برش مستقیم پرداختند و دریافتند که اضافه کردن الیاف باعث افزایش مقاومت برشی و نرمی مخلوط خاک و الیاف می‌شود. همین‌طور بررسی میزان الیاف نشان داد که مقادیر کم الیاف در ماسه‌ی ریزدانه، تأثیر بیشتری از ماسه‌ی درشت‌دانه دارد؛ در حالی که مقادیر الیاف بیشتر در خاک‌های درشت‌دانه، تأثیر بیشتری نسبت به ماسه‌ی ریزدانه داشته است.^[۱۰]

آناگنوستوپولس^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۱)، در پژوهشی در زمینه‌ی تثبیت ماسه‌ی ریزدانه توسط رزین اپوکسی محلول در آب دریافتند که با افزودن رزین اپوکسی به خاک، مقاومت فشاری و کششی افزایش و تخلخل و نفوذپذیری کاهش یافته است. همچنین در آزمایش سه‌محوری، با افزودن رزین اپوکسی به خاک، کاهش نسبت آب به رزین اپوکسی و گذشت زمان، مقدار مقاومت و سختی نیز افزایش یافته است.^[۱۱] آناگنوستوپولس و پاپالیانگاس^{۱۲} (۲۰۱۲)، در زمینه‌ی تثبیت خاک ماسه‌یی توسط رزین اپوکسی، پژوهش خود را تکمیل کردند و دریافتند که افزودن رزین اپوکسی به خاک ماسه‌یی بیشینه باعث افزایش مقاومت فشاری محصور نشده تا ۱۱/۳ MPa شده است، که تابعی از نسبت رزین اپوکسی به آن و زمان است. به این صورت که با گذشت زمان تا ۹۰ روز، مقاومت نیز افزایش یافته است.^[۱۲]

لیو و همکاران (۲۰۱۷)، به بررسی اثر الیاف پلی‌پروپیلن و مایع پلیمری به نام پلی‌یورتان^{۱۳} در ماسه پرداختند. الیاف پلی‌پروپیلن با طول ۱۸ و قطر ۰/۰۳۴ (mm) استفاده شده است. از آزمایش‌های فشاری محصور نشده و برش مستقیم به منظور ارزیابی عملکرد ماسه استفاده شده است. ۴ مقدار مختلف الیاف (۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ درصد) و چهار مقدار مختلف از پلیمر (۱، ۲، ۳ و ۴ درصد) در نظر گرفته شده و نتایج نشان داده است که افزایش الیاف و پلیمر در نمونه باعث بهبود مقاومت فشاری محدود نشده شده است، که این افزایش به درصد الیاف و پلیمر بستگی دارد. نتایج نشان داد که نمونه‌ی تقویت شده با ۴٪ پلیمر و ۳٪ الیاف دارای بیشترین مقاومت فشاری محصور‌نشده برابر kPa ۱۶۳ را تجربه کرده و بالاترین چسبندگی در پلیمر ۴٪ و الیاف ۲٪ در حدود kPa ۸۰ به دست آمده است. همچنین تمامی نمونه‌های تقویت شده با پلیمر - الیاف تمایل به نرم شدن داشته‌اند.^[۱۳]

لیو و همکاران (۲۰۱۸)، از پلیمر ارگانیک به عنوان تثبیت‌کننده‌ی خاک ماسه‌یی استفاده کردند. برای بررسی تأثیر پلیمر ارگانیک در مسلح‌سازی خاک، با استفاده از آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور‌نشده، برش مستقیم و کشش بر روی ماسه‌ی مسلح شده با مقادیر مختلف غلظت پلیمر و چگالی خشک ماسه انجام دادند. پلیمر استفاده شده دارای ساختار اصلی رزین پلی‌یورتان بوده است. پنج غلظت محلول پلیمر (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد) برای مسلح‌سازی با سه چگالی خشک مختلف برای نمونه‌ها ارزیابی شدند. نتایج نشان‌دهنده‌ی افزایش مقاومت برشی خاک تا kPa ۳۶۰ با ۵۰٪ پلیمر بوده است. همین‌طور گزارش دادند که افزایش وزن مخصوص باعث افزایش مقاومت فشاری محصور‌نشده شده است، به

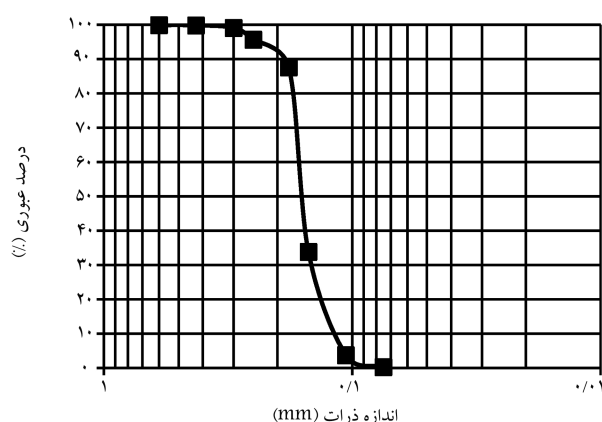
ماسه‌ی لای دار مسلح شده با الیاف نخ تیرگزارش کرده‌اند که بیشترین مقدار مدول برشی در ۱٪ الیاف به دست آمده و با افزایش طول الیاف، مدول برشی سکانت افزایش یافته است. با افزایش تنش همه‌جانبه، تأثیر الیاف بیشتر و حضور الیاف در خاک باعث زائل شدن فشار آب حفره‌یی و در نتیجه، افزایش مقاومت روان‌گرایی نمونه‌ها شده است. برای هر نوع خاک و الیاف نیز مقادیر خاصی از الیاف برای دست‌یابی به بهترین نتیجه در یک آزمایش وجود دارد.^[۲۲]

همان‌طور که مطالعات نشان می‌دهند، اصلاح پارامترهای مقاومتی خاک‌های ضعیف با استفاده از مواد جدید، ارزان و مخصوصاً استفاده‌ی مجدد از مواد ضایعاتی با هدف کمک به محیط‌زیست، همچنان یکی از روش‌های افزایش مقاومت مکانیکی خاک است و عمده‌ی مطالعات با آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده، برش مستقیم و نسبت باربری کالیفرنیا در حالت خشک بوده و کمتر با آزمایش‌های سه‌محوری، که نمونه در حالت اشباع قرار دارد، بررسی شده است. لذا در پژوهش حاضر، با در نظر گرفتن موارد اخیر، از یک ماده‌ی پلیمری جدید به نام چسب پلیمری Paytex NL ۲۵ و حلال در آب، ارزان و سازگار با محیط‌زیست برای تثبیت خاک ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده استفاده شده است. همچنین از الیاف نایلونی ضایعاتی نخ تیر و نیز با نگاه کمک به محیط‌زیست جهت بهبود خواص مکانیکی خاک اصلاح شده استفاده شده است. برای انجام مطالعات نیز از آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم‌یافته - زهکشی نشده استفاده شده است، تا رفتار مقاومت برشی خاک ماسه‌یی اصلاح شده‌ی مسلح شده ارزیابی شود.

۲. مواد مصرفی و روش پژوهش

۱.۲. خاک مصرفی

خاک مصرفی از بندر نکا در ۲۰ کیلومتری شمال شهر نکا و در مجاورت نیروگاه برق نکا، پایانه‌های نفتی شمال، نفت خزر و کشتی‌سازی ایران صدرا برداشت شده است. به لحاظ دانه‌بندی، بخش‌های مختلف زمین در منطقه‌ی مذکور مشابه یکدیگر است. به طور کلی خاک‌های ماسه‌یی موجود در بندر نکا، عموماً به صورت ریزدانه تا بسیار ریزدانه، با دانه‌بندی یکنواخت هستند و براساس سیستم طبقه‌بندی متحد، در رده‌ی SP قرار می‌گیرند. منحنی دانه‌بندی نمونه‌ی خاک طبیعی، که از منطقه‌ی اخیر گرفته شده است، در شکل ۱ مشاهده می‌شود. نسبت منافذ بیشینه و کمینه‌ی ماسه‌ی مورد نظر به ترتیب برابر با ۸۰٪ و ۵۳٪ و چگالی دانه‌های جامد آن برابر ۲/۶۷ به دست آمده است.



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی ماسه‌ی نکا.

طوری که افزایش وزن مخصوص از ۱/۴ تا ۱/۶ (g/cm^3) باعث افزایش مقاومت از ۲۴۰ تا ۳۶۰ (kPa) در غلظت ۵۰٪ شده است. به طور کلی، افزایش غلظت پلیمر منجر به افزایش مقاومت فشاری محصورنشده‌ی خاک می‌شود.^[۱۴]

شجاعی باقینی و همکاران (۲۰۱۸)، نشان دادند ترکیب پلیمر و سیمان به مقدار ۸٪ پلیمر و ۴٪ سیمان باعث افزایش مقاومت فشاری محصورنشده‌ی خاک گرانیتی خرد شده به مقدار ۱۴MPa شده است.^[۱۵] اهرلیچ^{۱۶} و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند الیاف بازیافتی از پلاستیک PET باعث افزایش مقاومت کششی خاک رس ماسه‌دار و کاهش گسترش ترک‌ها می‌شود.^[۱۶]

روشان و همکاران (۲۰۲۰)، با استفاده از لیگنوسولفات و الیاف پلی‌پروپیلن نشان دادند خاک ماسه‌ی رسی در آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده باعث نرمی رفتار و افزایش مقاومت نمونه می‌شود. مقادیر ۲٪ لیگنوسولفات، بیشترین مقاومت (۳۰۰ kPa) در عمل‌آوری ۷ روزه را نشان می‌دهد. همین طور ترکیب خاک به همراه الیاف پروپیلن باعث افزایش مقاومت از ۷۵kPa در خاک معمولی به ۲۶۰ kPa در خاک با ۸٪ الیاف با طول ۱۲ میلی‌متر شده است. ترکیب ۲٪ لیگنوسولفات ۸٪ الیاف، مقاومت فشاری محصورنشده‌ی ۵۵۰۰ kPa را به همراه داشته است، که در ۱۲ سیکل تر و خشک به مقدار ۱۰۰۰ kPa کاهش مقاومت داده است. به صورت کلی نتایج نشان دادند که پلیمر باعث افزایش دوام ماسه‌ی رسی تا ۲ سیکل تر و خشک می‌شود و اضافه شدن الیاف با آن باعث افزایش دوام خاک مذکور تا ۱۲ سیکل می‌شود.^[۱۷]

ظاهر زانا و همکاران (۲۰۲۰)، با آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده با استفاده از ۴ نوع پلیمر (vinyl copolymer) در دمای ۴۰ درجه با زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه در خاک رس با مخلوط ۱۵٪ بتونیت سدیم طبیعی، افزایش مقاومت ۴۶ kPa را گزارش کرده‌اند.^[۱۸]

وحیدپور و همکاران (۲۰۲۰)، با استفاده از الیاف تیر و شیشه به مسلح‌سازی خاک رس پرداختند و دریافتند که مقاومت فشاری محصورنشده‌ی خاک رس در اثر اضافه شدن الیاف از ۱۹۸ به ۲۹۴ (kPa) رسیده و باعث افزایش ۲ درصدی کرنش شکست شده است.^[۱۹]

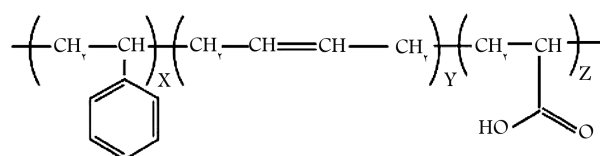
مولوی نجومی (۱۳۹۰)، در بررسی خاک کاتولینیت اصلاح شده با سیمان و الیاف نخ تیر به وسیله‌ی آزمون مقاومت فشاری محدود نشده و نسبت باربری کالیفرنیا، دریافتند که افزودن الیاف در خاک کاتولینیت، تأثیری در سختی اولیه نداشته و بیشترین مقاومت فشاری محدود نشده در الیاف ۲٪ با طول ۲ سانتی‌متر برابر ۳۱۱ kPa اعلام شده است. همچنین افزودن الیاف بر خاک کاتولینیت با ۳۰٪ سیمان باعث کاهش مقاومت نسبت به نمونه‌ی بدون الیاف شده است. کاتولینیت تثبیت شده نیز با ۵ و ۱۰ درصد وزنی سیمان، بیشترین مقاومت خاک را با افزودن ۱/۵٪ الیاف سبب شده و بیشترین مقاومت مربوط به ترکیب ۳۰٪ سیمان بدون الیاف برابر ۵MPa بوده است.^[۲۰]

میرزایی و اثنی عشری (۱۳۸۸)، در بررسی تأثیر الیاف نخ تیر در خاک ماسه‌یی به وسیله‌ی آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا و آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته‌ی زهکشی نشده گزارش کردند که افزودن الیاف به خاک، مقاومت بیشینه و مقاومت باقیمانده را افزایش و هم‌زمان اختلاف بین آنها را کاهش داده است. همین‌طور افزایش درصد یا طول الیاف، مقاومت نهایی و پسماند را افزایش داده است. بیشترین مقاومت نتایج سه‌محوری در خاک با ۱٪ وزنی الیاف به طول ۳ سانتی‌متر در تنش همه‌جانبه‌ی ۱۵۰ برابر ۳۳۵ کیلوپاسکال مشاهده شده است.^[۲۱]

طره دهقانی و اثنی عشری^{۱۵} (۱۳۹۱)، در بررسی رفتار خواص دینامیکی

۲.۲. مصالح مسلح و تشبیه کننده

در پژوهش حاضر از دو نوع ماده استفاده شده است، که یکی از آنها مایع پلیمری شیرین رنگ با نام تجاری PAYTEX NL ۲۵ ساخت ایران است و به صورت محلول در آب تولید می‌شود. پلیمر پی‌تکس، یک کوپلیمر امولسیون تشکیل شده از منومرهای استایرن و بوتادین و کربوکسیلیک اسید است. هر یک از ذرات پراکنده شده در امولسیون ذکر شده، شامل تعدادی از زنجیرهای پلیمری درهم تاب‌خورده است. دمای انتقال شیشه‌ای حدود منفی ۲۵ درجه سانتی‌گراد، میزان ژل پلیمری حدود ۹۰٪ (به علت پیوند عرضی)، اندازه‌ی ذرات امولسیون به طور میانگین ۱۵۰ نانومتر و سیستم امولسیونی بر پایه‌ی امولسیفایرهای آنیونیک بوده و ساختار شیمیایی پلیمر در شکل ۲ نشان داده شده است. [۲۳] پلیمر پی‌تکس به صورت محلول ۵۰٪ پلیمر و ۵۰٪ آب (غلظت ۵۰٪) ارائه می‌شود و ارزان قیمت است و طبق گزارش فنی ارائه شده از سوی سازنده، در مقایسه با پلیمرهای دیگر و مواد سنتی، مثل سیمان و آهک، سازگار با محیط‌زیست است. ماده‌ی دیگر، رشته‌های الیاف هستند، که از ضایعات صنعتی کارخانه‌ی نخ تایلر صبا در نزدیکی شهر زنجان تهیه شده‌اند. ضایعات مذکور از نایلون ۶ به وجود می‌آیند. الیاف اشاره شده از بهترین نوع نمک نایلون تهیه و در تایلر، کمربند ایمنی، تور ماهیگیری و غیره استفاده می‌شود. نمای ظاهری پلیمر و الیاف استفاده شده به ترتیب در شکل‌های ۳ (الف و ب) مشاهده می‌شود. الیاف پس از بریده شدن به طول‌های مختلف و با درصد‌های مختلف همراه با مایع پلیمری به خاک مورد نظر اضافه شده است. در جدول‌های ۱ و ۲، مشخصات مایع پلیمری و نخ تایلر ارائه شده‌اند.



شکل ۲. ساختار شیمیایی مایع پلیمری. [۲۳]



(ب) الیاف پلیمری پلی آمید.

(الف) مایع پلیمری PAYTEXNL ۲۵

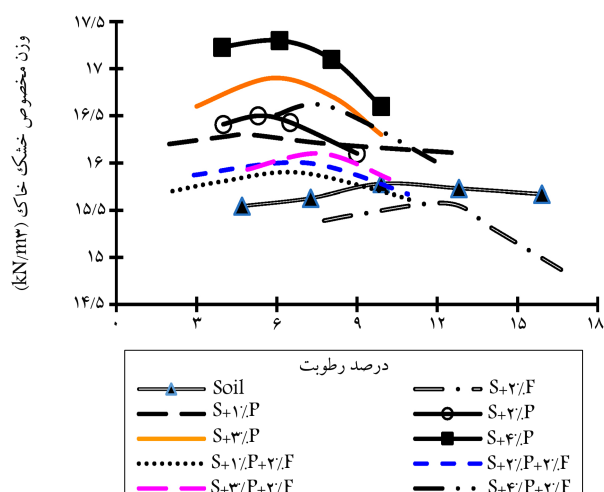
شکل ۳. نمای ظاهری پلیمر و الیاف استفاده شده.

جدول ۱. مشخصات مایع پلیمری استفاده شده. [۲۳]

PAYTEX NL ۲۵	نام تجاری
۵۰-۴۹	محتوای جامد (%)
۹-۶	pH
۲۰۰-۶۵۰	گرانروی (cP)
منسوجات بافته شده و غیر بافته - قیرهای امولسیونی	کاربرد

۳.۲. نمونه‌سازی

برای نمونه‌سازی در آزمایشگاه از روش تراکم مرطوب استفاده شده است. با استفاده از استاندارد ASTM-D۶۹۸، وزن مخصوص بیشینه و رطوبت بهینه برای ترکیب‌های مختلف به دست آمده است، که نتایج آن در شکل ۴ مشاهده می‌شود؛ [۲۵] که مطابق آن، برای خاک بدون افزودنی و خاک به همراه الیاف، از آب استفاده شده است. همچنین، در ترکیب‌های حاوی پلیمر، به جای آب از محلول پلیمری که حاوی آب و پلیمر است، استفاده شده است. به علت یکنواخت بودن دانه‌های خاک، نمودار پهنی به دست آمده است. در شکل اخیر ملاحظه می‌شود که برای خاک بدون افزودنی، بیشترین مقدار تراکم، متناظر با رطوبت ۹/۹٪ است. الیاف باعث کاهش اندک وزن مخصوص از $15/78 \text{ kN/m}^3$ به $15/57 \text{ kN/m}^3$ شده است، که علت آن را می‌توان به پایین بودن وزن مخصوص الیاف نسبت به دانه‌های خاک و جایگزینی حجمی از خاک با الیاف دانست. همچنین علت بیشتر بودن رطوبت بهینه‌ی خاک در حضور الیاف را می‌توان به قابلیت جذب بالای آب توسط الیاف نسبت داد. اضافه کردن پلیمر به خاک باعث افزایش وزن مخصوص شده و مخلوط نهایی را متراکم‌تر کرده است، که نشان می‌دهد پلیمر باعث کاهش بیشتر اصطکاک بین دانه‌های خاک و در نتیجه، تراکم بهتر آن می‌شود و هر چقدر مقدار پلیمر بیشتر شود، مقدار وزن مخصوص آن بیشتر می‌شود. همچنین، درصد بهینه‌ی رطوبت (محلول پلیمر) آن نسبت به خاک تنها کاهش یافته است. مقدار رطوبت بهینه در ترکیب ۴٪ پلیمر با خاک، نسبت به ترکیب ۱٪ پلیمر با خاک بیشتر بوده است، که می‌توان علت آن را پوشش بیشتر سطح دانه‌های خاک توسط پلیمر دانست. از طرف دیگر، با توجه به اینکه پلیمر بعد از خشک شدن خاک، به صورت مواد جامد در خاک باقی می‌ماند، این امر نیز باعث بالا رفتن وزن مخصوص نهایی خاک در حالت خشک می‌شود. همین‌طور زمانی که الیاف به مخلوط خاک و پلیمر اضافه می‌شود، باعث کاهش وزن مخصوص و افزایش رطوبت بهینه می‌شود. نکته‌ی مهم دیگری که از نمودارهای تراکم مشاهده می‌شود، این است که نمودارهای تراکم ترکیب‌های مختلف، همچنان تقریباً مسطح هستند، که نشان می‌دهد افزودن پلیمر و الیاف، طبیعت خاک را خیلی تغییر نداده و فقط نمودارهای تراکم را به سمت بالا انتقال داده است. با توجه به این‌که محدوده‌ی تغییرات وزن مخصوص ترکیب‌های



شکل ۴. نمودار تراکم استاندارد خاک نکا (F=Fiber, P=Polymer) (S=Sand).

جدول ۲. مشخصات فنی نخ تایر نایلون ۶. [۲۴]

پارامتر	واحد	نخ ۸۴۰
تعداد تار	عدد	بیشینه ۲۰۵۰
تاب	در متر	10 ± 490
مقاومت پارگی	نیوتن	کمینه ۱۴۰
ازدیاد طول در نقطه ی پارگی	درصد	2 ± 22
ازدیاد طول در نیروی ۴۷/۷ سانتی نیوتن بر تکس	درصد	$1 \pm 9/2$
جمع شدگی در هوای داغ ۱۶۰ درجه، ۲ دقیقه، ۴۴/۰ سانتی نیوتن بر تکس	درصد	$1 \pm 7/8$
چسبندگی (روش H)	نیوتن	کمینه ۱۱۰
درصد جذب	درصد	1 ± 5
ضخامت	میلی متر	0.06 ± 0.052



شکل ۶. ترکیب ماسه به همراه پلیمر و الیاف.



شکل ۵. ترکیب ماسه به همراه پلیمر.

سه تنش همه جانبه ی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلو پاسکال بر روی نمونه هایی با دوره ی نگهداری ۲۷۰ روز در محیط آزمایشگاه با دمای حدوداً ۲۳ درجه ی سانتی گراد و نمونه های مربوط به ماسه ی بدون پلیمر و الیاف و ماسه به همراه الیاف انجام شده است. نمونه ها دارای قطر ۳۸ و ارتفاع ۸۰ میلی متر بوده اند. زمان نگهداری نمونه ها با توجه به نتایج آزمایش های مقاومت فشاری محصور نشده، که قبلاً انجام شده بود، ۲۷۰ روز به دست آمد؛ یعنی بعد از گذشت ۲۷۰ روز، مقاومت نمونه ها به مقدار نهایی خود می رسد. همین طور با استفاده از نتایج آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده، مقدار بهینه ی الیاف ۲٪ با طول ۱۲ mm انتخاب شد، که در مقدار مذکور، بیشترین مقاومت و کرنش شکست در نمونه مشاهده شده است.

مولوی نجومی (۲۰۱۲)، نیز درصد بهینه ی الیاف را ۲٪ و به طول ۲ cm بیان کرده است.^[۲۰] روند اشباع سازی نمونه ها با عبور گاز CO_2 و اعمال پس فشار تا ۲۰۰ کیلو پاسکال و نیز کلیه ی آزمایش ها با درجه ی اشباع شدگی بیشتر از ۹۵٪ انجام شده اند. بعد از اشباع سازی، ابتدا تنش همه جانبه، اعمال و تحکیم صورت گرفته و سپس بارگذاری محوری با سرعت ۴ mm/min انجام شده است.^[۲۶] مشخصات و کد نمونه های آزمایش در جدول ۳ ارائه شده است. برای نامگذاری نمونه ها از علائم P برای بیان درصد پلیمر، F برای بیان درصد الیاف و d برای بیان سن نمونه ها استفاده شده است. به طور مثال، $1P \cdot 0F \cdot 27d \cdot SCU200$ ، معرف نمونه با ۱٪ پلیمر، ۰٪ الیاف با نگهداری ۲۷۰ روزه است. همین طور $200 \cdot SCU$ ، معرف آزمایش استاتیکی تحکیم یافته ی زهکشی نشده در تنش همه جانبه ی ۲۰۰ کیلو پاسکال است. منظور از درصد های بیان شده، درصد وزن خشک خاک است.

مختلف کم است، نمونه های آزمایش با تراکم حدوداً ۹۸٪ تراکم بیشینه ساخته شده اند.

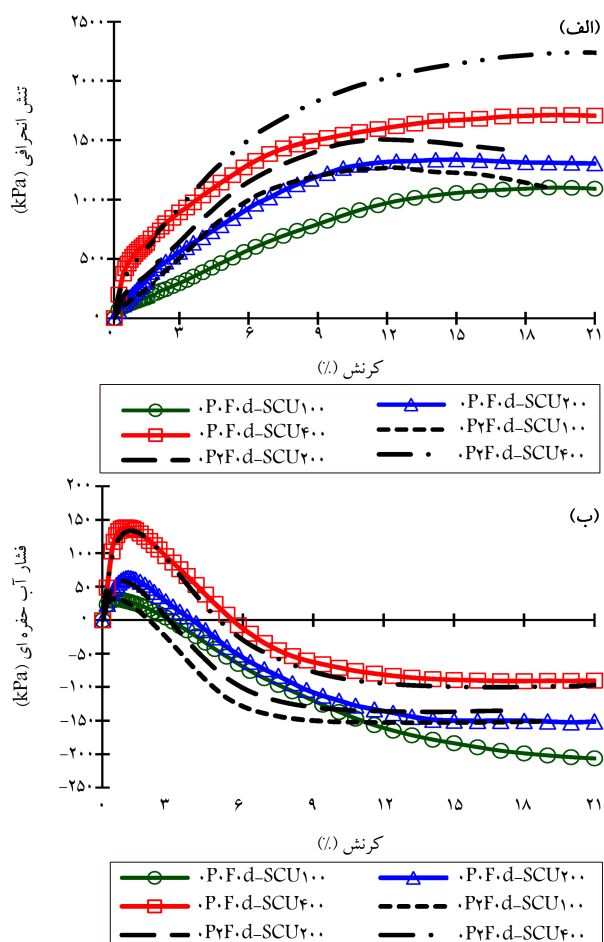
از آنجایی که محلول تولیدی با نسبت ۵۰٪ پلیمر در آب است، لذا اگر قرار باشد به عنوان مثال، به مقدار ۲٪ از محلول مذکور در خاک استفاده شود، ۱٪ آن آب و ۱٪ آن پلیمر خواهد بود. به همین منظور، برای مثال اگر ۱٪ پلیمر به همراه ۵٪ آب مورد نیاز باشد، ۲٪ محلول به همراه ۴٪ آب مخلوط می شود؛ که نتیجه ی نهایی ۱٪ پلیمر به همراه ۵٪ آب آماده می شود، که محلول مذکور با عنوان ۱٪ پلیمر در آزمایش ها نام گذاری شده است، که نشان دهنده ی ۱٪ وزن خشک خاک، پلیمر است. برای ساخت نمونه ها، ابتدا محلول پلیمری با آب به میزان مورد نظر مخلوط و به خاک به عنوان درصدی از وزن خشک خاک، اضافه و به مدت ۵ دقیقه هم زده شده اند (شکل ۵). سپس الیاف مورد نظر به نسبت درصد وزنی خشک خاک به مخلوط مورد نظر اضافه و ترکیب حاصل کاملاً هم زده شده است، تا مخلوط یکنواختی حاصل شود (شکل ۶). سپس ترکیب اخیر، در ۵ لایه به درون قالب با وزن های مساوی و ارتفاع تمام شده ی مشخص، به وسیله ی کوبه، با وزن مخصوص مورد نظر آماده شده است. نمونه ی حاصل شده با دمای مورد نظر و تا زمان لازم، نگهداری و آزمایش انجام شده است.

۳. انجام آزمایش های سه محوری

به منظور بررسی رفتار برشی مخلوط خاک، پلیمر و الیاف، از آزمایش سه محوری تحکیم یافته ی زهکشی نشده استفاده شده است. به همین منظور ۳۰ آزمایش تحت

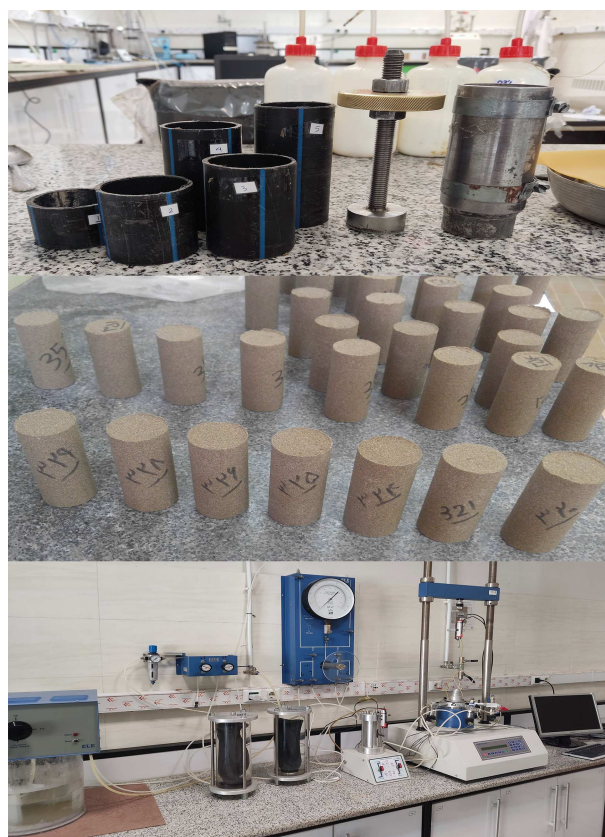
جدول ۳. جزئیات و کد نمونه‌های آزمایش‌های سه‌محوری.

اسم ترکیب	مقدار پلیمر (%)	مقدار الیاف (%)	σ_3 (kPa)	سن نمونه (روز)
P°F°d-SCU	۰	۰		۰
P۲F°d-SCU	۰	۲		۰
۱P°F۲۷°d-SCU	۱	۰		۲۷°
۲P°F۲۷°d-SCU	۲	۰		۲۷°
۳P°F۲۷°d-SCU	۳	۰		۲۷°
۴P°F۲۷°d-SCU	۴	۰	۴۰۰ و ۲۰۰، ۱۰۰	۲۷°
۱P۲F۲۷°d-SCU	۱	۲		۲۷°
۲P۲F۲۷°d-SCU	۲	۲		۲۷°
۳P۲F۲۷°d-SCU	۳	۲		۲۷°
۴P۲F۲۷°d-SCU	۴	۲		۲۷°



شکل ۸. الف) تنش انحرافی، ب) فشار آب حفره‌یی در برابر کرنش محوری در ماسه و ماسه - الیاف.

خط‌چین مربوط به نمونه‌های دارای الیاف و خطوط ممّتد مربوط به نمونه‌های دارای ماسه تنها است. مطابق شکل ۸ الف، نمودارهای ماسه‌ای مسلح شده با الیاف نسبت به ماسه، مقاومت بالاتری داشته و در هر سه تنش هم‌جانبه‌ای اعمالی، مقادیر تنش انحرافی بالاتری را نشان داده و با افزایش تنش هم‌جانبه، تنش انحرافی افزایش یافته است. در نمونه‌های دارای ماسه تنها، روند رفتاری در تنش هم‌جانبه‌ای ۱۰۰ تا ۴۰۰



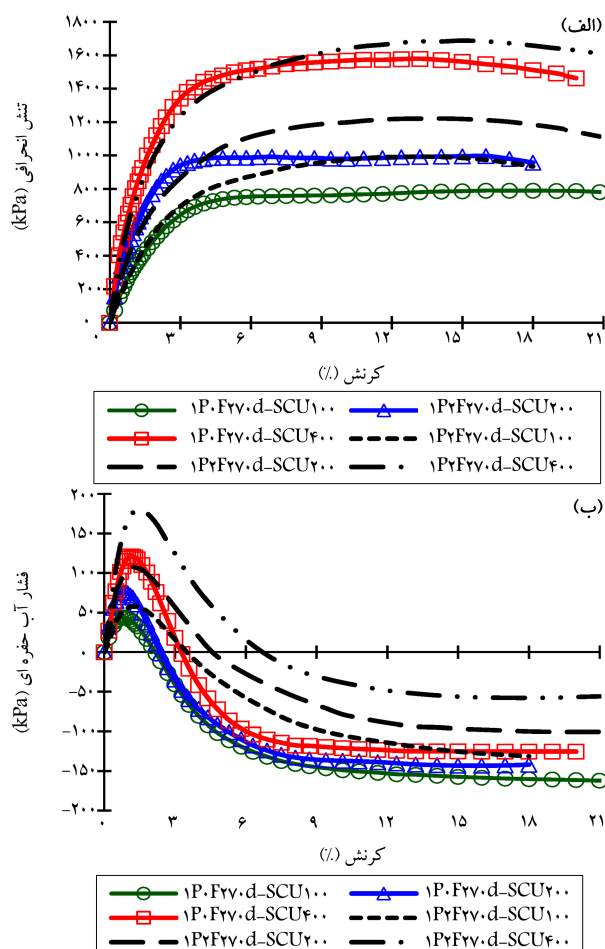
شکل ۷. تجهیزات ساخت و نمونه‌های ساخته شده و دستگاه سه‌محوری استاتیکی و استفاده شده.

تصویر دستگاه سه‌محوری استفاده شده و نمونه‌های ساخته شده نیز در شکل ۷ مشاهده می‌شود.

۴. نتایج آزمایش و تحلیل آنها

۴.۱. رفتار برشی ماسه با و بدون الیاف

نمودارهای تنش انحرافی و فشار آب حفره‌یی در برابر کرنش محوری برای نمونه‌های دارای ماسه تنها و نیز ماسه به همراه الیاف در شکل ۸ مشاهده می‌شود. نمودارهای



شکل ۹. الف) تنش انحرافی و ب) فشار آب حفره ای در برابر کرنش محوری در ماسه به همراه ۱٪ پلیمر با و بدون الیاف.

به دلیل این که در حین تحکیم تعداد بیشتری از پیوندهای ضعیف می شکند، لذا در حین برش، ماسه با ۱٪ پلیمر مشابه ماسه ی بدون پلیمر رفتار می کند.

شکل ۹ ب، نشان می دهد که فشار آب حفره ای در هر دو حالت الیاف دار و بدون الیاف در ابتدا مثبت و در ادامه، از رفتار انقباضی به سمت رفتار اتساعی و با فشار آب حفره ای منفی تغییر کرده است. حضور الیاف باعث افزایش رفتار انقباضی خاک و کاهش رفتار اتساعی نمونه ها شده است. بیشترین فشار آب حفره ای مربوط به نمونه ی الیاف دار در تنش همه جانبه ی ۴۰۰ و کمترین فشار آب حفره ای مثبت مربوط به حالت بدون الیاف در تنش همه جانبه ی ۱۰۰ بوده است. ملاحظه ی هم زمان رفتار تنش - کرنش و تغییرات فشار آب حفره ای نشان می دهد با اینکه نمونه ی الیاف دار، فشار آب حفره ای منفی کمتری (و تنش مؤثر همه جانبه ی کمتری) در حین برش داشته است، ولی مقاومت بیشتری نیز از خود نشان داده است، که بیانگر اثر نقش مثبت الیاف در افزایش اتصالات و حفظ ساختار خاک در زنجیره ی انتقال نیروها و افزایش مقاومت برشی است.

افزایش پلیمر به مقدار ۲٪ باعث زیاده تر شدن پیوندهای پلیمر در بین دانه های خاک می شود و همان طور که در شکل ۱۰ الف مشاهده می شود، روند رفتاری از سخت شوندگی به حالت نرم شوندگی کرنش تغییر کرده است. نقطه ی شکست و مقاومت نمونه در نمونه ی حاوی تنها پلیمر در کرنش های کم (کمتر از ۳٪) رخ داده و

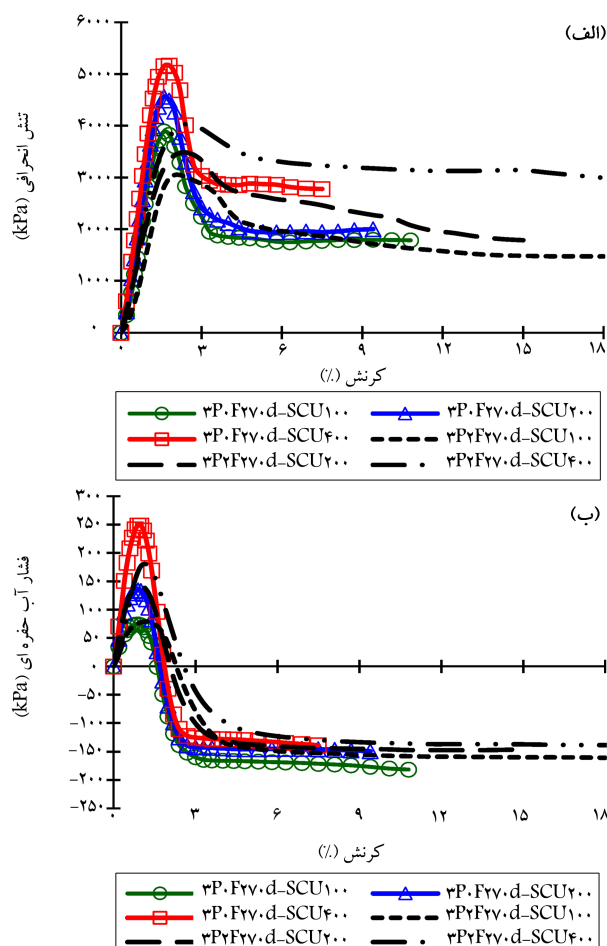
کیلو پاسکال به صورت سخت شونده مشاهده می شود و نقطه ی تنش بیشینه و پسماند در انتهای نمودار یکسان بوده و با افزایش تنش همه جانبه، تنش بیشینه و پسماند افزایش یافته است؛ به طوری که از تنش همه جانبه ی ۱۰۰ به ۴۰۰ کیلو پاسکال، افزایش مقاومت از ۱۱۰۰ به ۱۷۱۰ کیلو پاسکال ملاحظه می شود. از طرفی، در نمونه های مسلح شده با الیاف در تنش های همه جانبه ی ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال تا کرنش حدوداً ۱۲٪، رفتار سخت شونده از خود نشان داده و سپس دچار نرم شوندگی شده اند؛ در صورتی که همین نمونه در تنش همه جانبه ی ۴۰۰ کیلو پاسکال، رفتاری سخت شونده تا انتهای آزمایش از خود نشان داده است. این افزایش مقاومت ناشی از درگیری بیشتر دانه های ماسه با الیاف به واسطه ی افزایش تنش همه جانبه بوده است. به صورت کلی ملاحظه می شود که مسلح سازی ماسه به الیاف استفاده شده باعث افزایش مقاومت نمونه ها شده است، ولی شکل پذیری آن را تحت دو تنش همه جانبه ی ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال کاهش داده است.

در شکل ۸ ب ملاحظه می شود که با اعمال کرنش محوری، تمامی نمونه ها از تنش همه جانبه ی ۱۰۰ تا ۴۰۰ کیلو پاسکال، ابتدا به صورت انقباضی که منجر به فشار آب حفره ای مثبت و سپس اتساعی که منجر به فشار آب حفره ای منفی شده است، نشان داده اند که دلیل آن یکنواخت بودن دانه بندی ماسه ی استفاده شده و تراکم بالای آن بوده است. از طرفی، تمامی نمونه ها در انتهای آزمایش دارای فشار آب حفره ای منفی و رفتار اتساعی بوده اند. نکته ی دیگر، اثر متقابل فشار همه جانبه و تسلیح نمونه در کاهش رفتار اتساعی و فشار آب حفره ای منفی است. همان طور که ملاحظه می شود، افزایش تنش همه جانبه ی اولیه از ۱۰۰ به ۴۰۰ کیلو پاسکال، منجر به کاهش فشار آب حفره ای منفی در نمونه های دارای فقط ماسه از ۲۰۷- به ۹۰- و در حالت الیاف دار از ۱۵۰- به ۹۴- کاهش یافته است. به عبارتی دیگر، تسلیح باعث شده است که اثر تنش همه جانبه در رفتار اتساعی در انتهای آزمایش تعدیل شود.

۲.۴ رفتار برشی ماسه ی اصلاح شده با پلیمر و مسلح شده با الیاف

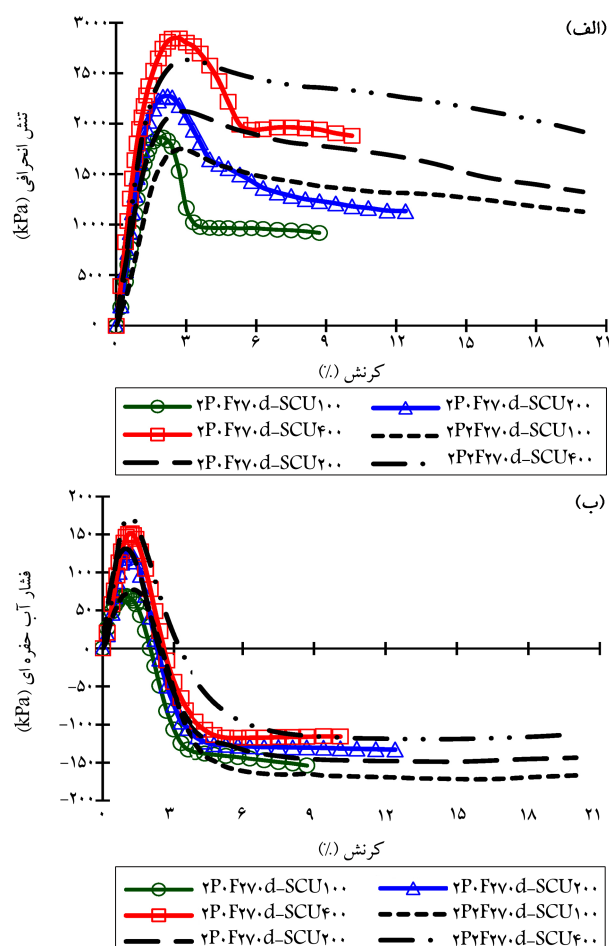
نمودارهای تنش انحرافی و فشار آب حفره ای در برابر کرنش محوری برای ماسه دارای پلیمر ۱ تا ۴ درصد با و بدون الیاف در شکل های ۹ الی ۱۲ ارائه شده اند؛ که در آنها، نمودارهای خط چین مربوط به ترکیب های با الیاف و خطوط ممتد مربوط به نمونه های بدون الیاف هستند.

شکل ۹ الف، نشان می دهد که نمونه های بدون الیاف دارای سختی اولیه ی بیشتری نسبت به نمونه های با الیاف هستند و همین طور نمونه های حاوی ۲٪ الیاف نسبت به نمونه های بدون الیاف تا گسیختگی (نقطه ی پیک)، کرنش بیشتری را تجربه کرده و رفتاری سخت شونده از خود نشان داده اند؛ هر چند که بعد از کرنش حدود ۱۵٪، تقریباً تغییر رفتار داده و به نرم شوندگی میل کرده اند. نمودارهای نمونه های الیاف دار بالاتر از نمونه های بدون الیاف هستند، که می توان گفت در نمونه های حاوی ۱٪ پلیمر، که پیوندها نسبت به نمونه های با درصد پلیمر بالاتر ضعیف تر هستند و چه بسا در حین تحکیم هم شکسته شده باشند، نقش الیاف به واسطه ی مقدار کم پیوندهای پلیمر، پُر رنگ تر بوده و باعث افزایش مقاومت شده است. این رفتار در خاک بدون پلیمر با شدت بیشتری مشاهده شده است. نکته ی دیگر در نمودارها تأثیر تنش همه جانبه در تفاوت مقدار مقاومتی نمونه های الیاف دار و بدون الیاف است. همان طور که مشاهده می شود هر چقدر تنش همه جانبه بیشتر شده است، نمودارهای نمونه های الیاف دار و بدون الیاف به هم نزدیک تر شده اند، که نشان می دهد نمونه ی الیاف دار، مقاومت و کرنش بیشتری دارد. به عبارتی دیگر، در تنش همه جانبه ی بالاتر



شکل ۱۱. الف) تنش انحرافی و ب) فشار آب حفره‌ای در برابر کرنش محوری در ماسه به همراه ۳٪ پلیمر با و بدون الیاف.

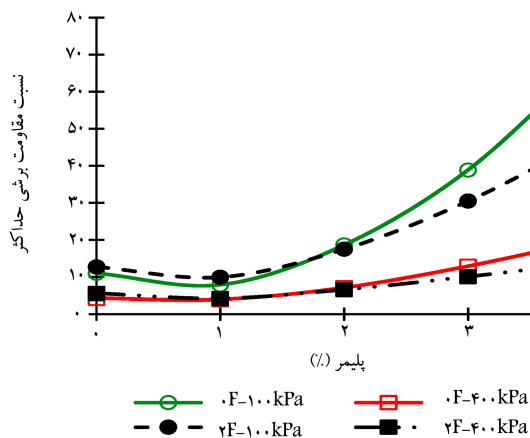
افزایش پلیمر به مقدار ۳٪، باعث قوی‌تر شدن باندهای پلیمری شده است، که به تبع آن افزایش سختی، مقاومت بیشینه‌ی نمونه‌ها و تنش‌های پسماند را ایجاد کرده است (شکل ۱۱ الف). همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقاومت پیک در کرنش‌های کمتر از ۲٪ رخ داده و همین‌طور افتادگی از قله و رسیدن به مقاومت پسماند در کرنش کمتری اتفاق افتاده است. به بیانی دیگر، می‌توان گفت هر چند افزایش مقدار پلیمر و مقاومت پیوندها منجر به افزایش بیشتر مقاومت نمونه شده است، رفتار نمونه را تردتر کرده است. مطابق با شکل مذکور، نمونه‌های حاوی الیاف، مقاومت کمتری داشته‌اند؛ ولی بعد از نقطه‌ی شکست، همچنان بخش اعظم مقاومت حفظ شده است. نکته‌ی دیگر آن‌که، نمونه‌های بدون الیاف، بعد از شکست، افت مقاومت زیادی را متحمل شده و به مقاومت پسماند کمتر از نمونه‌ی الیاف‌دار رسیده‌اند. شکل شکست نمونه‌ها نشان داد که نمونه‌های حاوی ۳٪ پلیمر با شکل‌گیری سطح برش حدوداً ۴۵ درجه شکسته‌اند و در نمودارهای الیاف‌دار همین روند تکرار شده است؛ ولی از آنجایی که الیاف در طرفین سطح شکست مهار شده‌اند، تحت کشش قرار گرفته و مانع از جداشدگی نمونه از صفحه‌ی برش شده‌اند. به همین دلیل کاهش مقاومت آن به آهستگی انجام شده است (برعکس نمونه‌ی بدون الیاف). لذا می‌توان گفت پیوندها تا نقطه‌ی شکست و الیاف بعد از آن در ارتقاء ویژگی‌های برشی خاک مؤثرتر بوده‌اند. نمودار ۱۱ ب نشان می‌دهد در نمونه‌های به همراه ۳٪ پلیمر در تنش هم‌جانبه‌ی ۴۰۰ kPa، نمودار فشار آب حفره‌ی نمونه با پلیمر تنها نسبت به حالت الیاف‌دار،



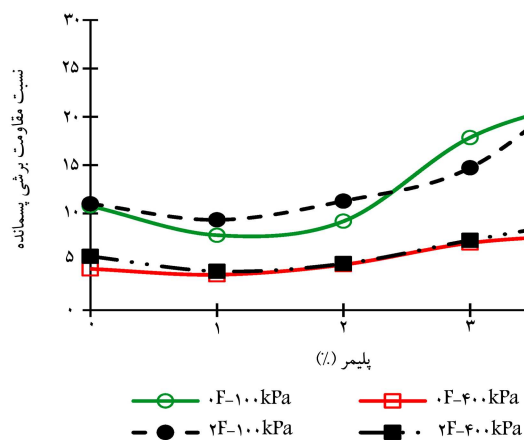
شکل ۱۰. الف) تنش انحرافی و ب) فشار آب حفره‌ای در برابر کرنش محوری در ماسه به همراه ۲٪ پلیمر با و بدون الیاف.

این کرنش شکست در تنش هم‌جانبه‌ی ۱۰۰ کیلوپاسکال کمتر از تنش هم‌جانبه‌ی ۴۰۰ کیلوپاسکال بوده است. با افزودن پلیمر به نمونه، الگوی رفتاری متحول شده است؛ بدین نحو که اولاً، مقاومت شکست نمونه کم شده و در ادامه، بعد از نقطه‌ی شکست، از شدت نرم‌شوندگی کاسته شده و نمونه بعد از آن با شیب ملایم‌تری به کاهش مقاومت خود ادامه داده است. به عبارتی دیگر، در نمونه‌ی حاوی صرفاً پلیمر، تقریباً به صورت ناگهانی بیشتر پیوندها شکسته و نمونه بعد از آن رفتار اصطکاکی پیدا کرده است. پیوندهای باقیمانده هم نقش چندانی در رفتار نمونه نداشته‌اند، ولی در نمونه‌ی حاوی پلیمر و الیاف، ظاهراً الیاف مانع از شکست ناگهانی همه‌ی پیوندها شده و همان‌طور که گفته شد، بعد از نقطه‌ی شکست، همچنان ساختار و انسجام دانه‌ها حفظ و در زنجیره‌ی انتقال نیروها درگیر شده است.

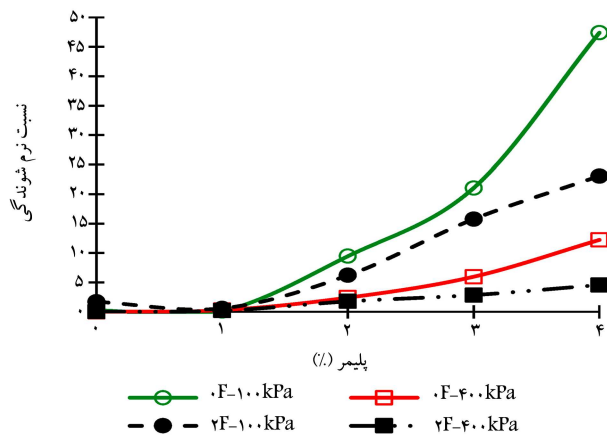
شکل ۱۰ ب نشان می‌دهد در کرنش‌های زیر ۳٪، نمونه دارای فشار آب حفره‌ی مثبت و رفتار انقباضی بوده و در کرنش‌های بالاتر، فشار آب حفره‌ی منفی و رفتار اتساعی به خود گرفته است و در انتهای آزمایش در تمامی حالت‌ها، فشار آب حفره‌ی منفی وجود داشته و تقریباً در تنش هم‌جانبه‌ی ۴۰۰ کیلوپاسکال، مقادیر فشار آب حفره‌ی منفی در حالت الیاف‌دار و بدون الیاف با هم برابر بوده است. در این ترکیب، حضور الیاف هر چند در انتهای آزمایش، کمی رفتار نمونه را اتساعی‌تر کرده است، ولی به طور کلی تأثیر چندانی در نحوه‌ی تغییرات فشار آب حفره‌ی نداشته است.



شکل ۱۳. نسبت مقاومت برشی پیش‌بینیه (نقطه‌ای پیک) نمونه‌ی ماسه‌ی اصلاح شده با پلیمر تنها و پلیمر به همراه الیاف.



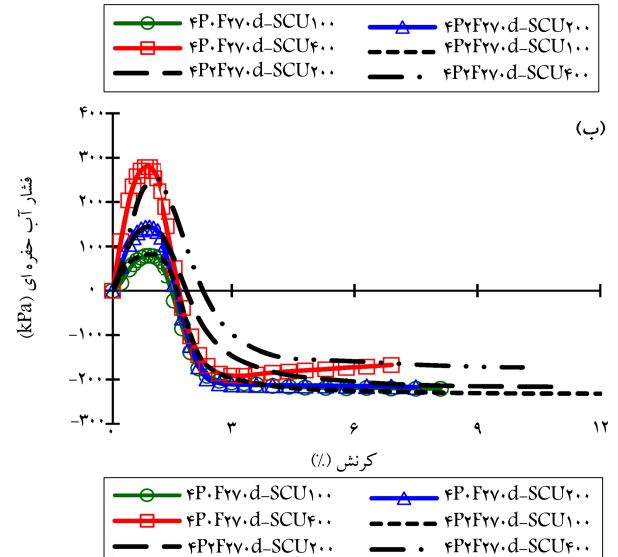
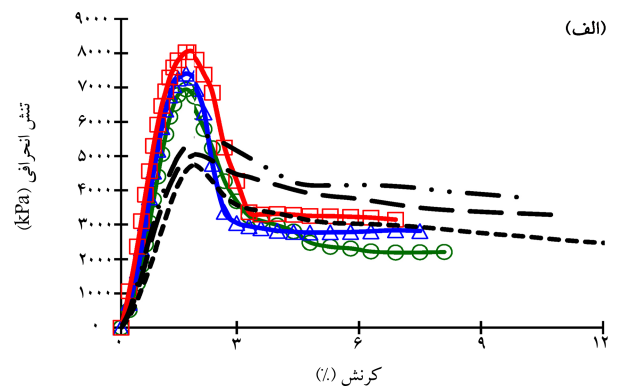
شکل ۱۴. نسبت مقاومت برشی پسمانده‌ی نمونه‌ی ماسه‌ی اصلاح شده با پلیمر تنها و پلیمر به همراه الیاف.



شکل ۱۵. نسبت نرم شونده‌گی ماسه‌ی اصلاح شده با پلیمر تنها و پلیمر به همراه الیاف.

این دو مقدار $[(\Delta\sigma_{dp}/\sigma_r) - (\Delta\sigma_{dr}/\sigma_r)]$ نیز تحت نام نسبت نرم‌شوندگی در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

مطابق شکل ۱۳ ملاحظه می‌شود که در ۱٪ پلیمر، نسبت مقاومت برشی با ماسه‌ی اصلاح نشده، مقادیر تقریباً یکسان و حتی کمتری دارد، که علت آن کم



شکل ۱۲. الف) تنش انحرافی و ب) کرنش حجمی در برابر کرنش محوری در ماسه به همراه ۴٪ پلیمر با و بدون الیاف.

مقادیر مثبت بالاتری را تجربه کرده است، در حالی که در دیگر تنش‌های همه‌جانبه، نمودارها تقریباً بر هم منطبق بوده‌اند.

در شکل ۱۲ الف، که نتایج آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های حاوی ۴٪ پلیمر مشاهده می‌شود، اثر متقابل مقاومت پیوندها و پلیمر خیلی برجسته‌تر نشان داده شده است. بدین نحو که با افزایش بیشتر مقاومت پیوندها، نمونه سخت‌تر، قوی‌تر و تردتر شده و بعد از نقطه‌ی شکست دچار نرم‌شدگی بیشتری شده و الیاف همچنان بعد از نقطه‌ی شکست به نقش خود ادامه داده و اثر آن همچنان در این حالت نیز با وجود پیوندهای اولیه، قوی‌تر حفظ شده است. لذا ملاحظات مطرح شده در بخش‌های پیشین در مورد اثر متقابل پیوندها و الیاف در این‌جا نیز با شدت بیشتری مطرح است. تنها نکته‌ی قابل ذکر این است که در این حالت و ۴٪ پلیمر، اثر نسبی تنش‌های همه‌جانبه در مقاومت شکست کاهش یافته است. شکل ۱۲ ب، نیز تفاوت محسوسی با شکل ۱۱ ب نشان نمی‌دهد.

۳.۴. مقاومت برشی

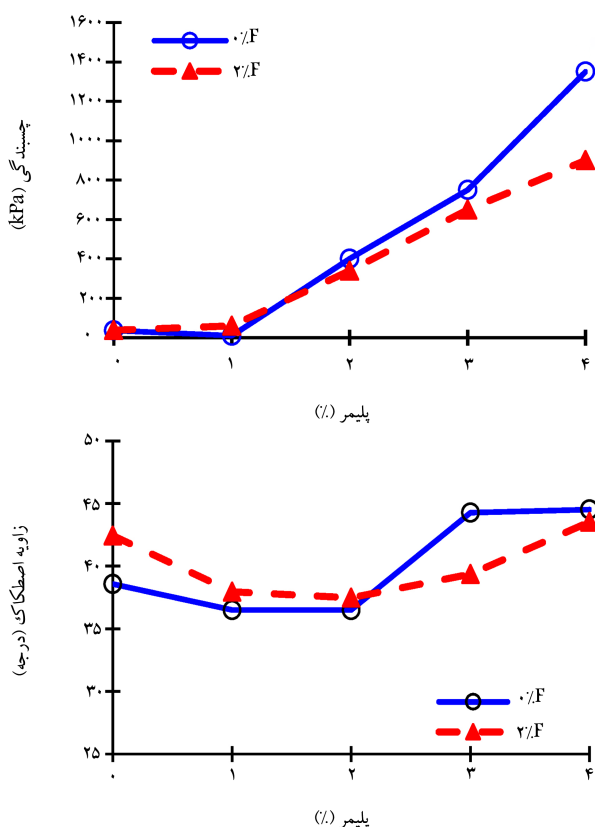
در شکل ۱۳، نسبت تنش انحرافی پیش‌بینیه به تنش همه‌جانبه‌ی اولیه یا همان مقاومت برشی نرمالیزه شده $(\Delta\sigma_{dp}/\sigma_r)$ در برابر درصد پلیمر برای دو تنش همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ و ۴۰۰ kPa در دو حالت بدون الیاف و با الیاف نشان داده شده است. در شکل ۱۴، نیز همین نسبت در حالت باقیمانده $(\Delta\sigma_{dr}/\sigma_r)$ مشاهده می‌شود. تفاضل

۴.۴. پارامترهای مقاومت برشی

پارامترهای مقاومت برشی، شامل چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به کمک رسم دایره‌ی موهر در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۱۶ الف، حضور الیاف در ۰ و ۱ درصد پلیمر، تأثیر محسوسی در چسبندگی نداشته و در درصدهای بالاتر پلیمر، باعث کاهش چسبندگی شده است به طوری که بیشترین کاهش در نمونه ۴٪ پلیمر مشاهده شده است. افزایش مقدار پلیمر، باعث افزایش قابل توجه و غیرخطی چسبندگی از مقدار تقریباً صفر برای ماسه‌ی خالی تا ۱۳۵۰ kPa برای نمونه‌ی بدون الیاف و ۹۰۰ kPa برای نمونه با الیاف در مقدار پلیمر ۴٪ شده است. همچنین شکل ۱۶ ب نشان می‌دهد الیاف باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی مخلوط ماسه‌ی پلیمر و الیاف در مقادیر کمتر از ۲٪ پلیمر شده و در ۲٪ پلیمر، زاویه اصطکاک جابه‌جایی بوده است؛ به طوری که در مقادیر بزرگ‌تر از ۲٪، به علت دیگته شدن اثر پلیمر در الیاف، باعث بیشتر شدن زاویه اصطکاک نمونه‌ی بدون الیاف از نمونه‌ی دارای الیاف شده است. به طور کلی، در مقدار الیاف ثابت (۲٪)، افزایش درصد پلیمر مسلماً منجر به افزایش مقاومت برشی (حاصل جمع چسبندگی و اصطکاک) $(\tau = c + \sigma \tan \varphi)$ می‌شود.

۵.۴. تغییرات فشار آب حفره‌ی

پیشینه‌ی فشار آب حفره‌ی مثبت و منفی در حین آزمایش به ترتیب در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آنها، افزایش تنش همه‌جانبه منجر به افزایش فشار آب حفره‌ی مثبت و کاهش فشار آب حفره‌ی منفی شده است. همچنین

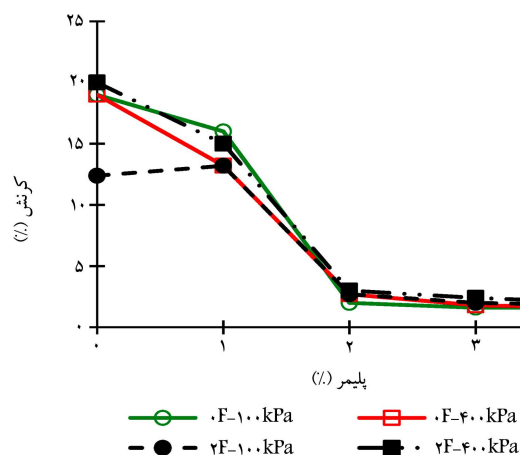


شکل ۱۶. پارامترهای مقاومت برشی در حالت‌های ماسه تنها، ماسه و پلیمر با و بدون الیاف.

بودن تعداد و مقاومت پیوندها و احتمال شکست آنها در حین تحکیم است. مقدار ۱٪ پلیمر کمک محسوسی به افزایش مقاومت نکرده و منجر به کاهش اندکی در مقاومت نیز شده است. این رفتار در نمونه‌ی الیاف‌دار هم صادق بوده است، با این تفاوت که نمونه‌های الیاف‌دار، کاهش مقاومت کمتری نسبت به نمونه‌های بدون الیاف داشته‌اند. افزایش پلیمر به ۲٪ و افزایش پیوندهای پلیمری بین دانه‌های ماسه و الیاف، منجر به تقویت چسبندگی نمونه شده است، که باعث افزایش مقاومت نمونه شده است. همچنین افزایش پلیمر به ۳ و ۴ درصد منجر به افزایش صعودی نسبت مقاومت نمونه‌ها شده است. از طرفی، با افزایش تنش‌های همه‌جانبه از ۱۰۰ به ۴۰۰ کیلو پاسکال، از شدت افزایش مقاومت نسبی کاسته شده است. به عبارتی، افزایش تنش همه‌جانبه از اثر پیوندها در نسبت مقاومت کم کرده است. نکته‌ی حائز اهمیت بعدی، اثر الیاف در نسبت مقاومت است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مقادیر کم پلیمر (۱٪)، الیاف اثر مثبت در نسبت مقاومت داشته‌اند، ولی در مقادیر بالای پلیمر (بیشتر از ۲٪)، الیاف اثر منفی در مقاومت داشته‌اند، لذا می‌توان گفت اثر الیاف در مقاومت بستگی به مقاومت پیوندهای ایجاد شده (درصد پلیمر) و مقدار تنش همه‌جانبه دارد.

شکل ۱۴ نشان می‌دهد که نسبت مقاومت پسماند با افزودن ۱٪ پلیمر، کمی کاهش و سپس با افزایش ۲٪ پلیمر، مجدداً کمی افزایش یافته است، ولی به طور کلی تا ۲٪ پلیمر، تغییرات نسبت مقاومت پسماند تقریباً ناچیز بوده و بعد از ۲ تا ۳ و ۴ درصد پلیمر، روند افزایش نسبت مقاومت پسماند ادامه یافته است. از طرف دیگر، افزایش تنش همه‌جانبه، نیز منجر به کاهش نسبت مذکور شده است، به عبارت دیگر، افزایش تنش همه‌جانبه از شدت نرم‌شوندگی نمونه‌ها کم کرده است. چون مقاومت پسماند در کرنش‌های زیاد مطرح می‌شود و در کرنش‌های زیاد، عمده‌ی پیوندها شکسته شده‌اند، لذا تا ۲٪ پلیمر فرق زیادی بین مقاومت پسماند نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود، از طرفی، پیوندهای شکسته در درصدهای بالاتر (برای مثال ۳ و ۴ درصد) و در شرایط پسماند، اولاً شکل سطح ذرات را تغییر داده و ثانیاً درصدی از پیوندهای شکسته به صورت ذرات ریز درآمده و دانه‌بندی خاک را به هم زده‌اند؛ لذا مقاومت‌های پسماند متفاوت‌تری نسبت به نمونه‌ی ماسه‌ی بدون پلیمر مشاهده می‌شود، اتفاقی که در مقادیر کم پلیمر کم‌رنگ‌تر است. حضور الیاف در مقاومت پسماند تحت تنش‌های همه‌جانبه‌ی کم (۱۰۰ kPa)، روند چندان مشخصی نشان نمی‌دهد؛ ولی تحت تنش‌های همه‌جانبه‌ی زیاد (kPa ۴۰۰)، فقط در حالت بدون پلیمر و ۴٪ پلیمر، کمی نسبت مذکور را افزایش داده است.

شکل ۱۵ نیز که در واقع پارامتر نرم‌شوندگی را در برابر درصدهای مختلف پلیمر نشان می‌دهد؛ گویای این مطلب است که تا مقدار پلیمر ۱٪، نرم‌شوندگی چندانی اتفاق نیفتاده و تا ۱٪ پلیمر، رفتار خاک سیما نه مشابه خاک غیرسیما نه است. بیشترین نرم‌شوندگی در نمونه‌ی حاوی ۴٪ پلیمر بدون الیاف در تنش همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ kPa مشاهده می‌شود، که علت آن مقاومت زیاد در نقطه‌ی پیک و مقدار کم تنش همه‌جانبه است، که نتوانسته است بعد از نقطه‌ی شکست، افت مقاومت نمونه را جبران کند. از طرفی، افزایش تنش همه‌جانبه تا ۴۰۰ kPa، تا حدود زیادی از شدت افت مقاومت مذکور کاسته است. به طور کلی، افزایش تنش همه‌جانبه و اضافه شدن الیاف به نمونه، منجر به کاهش نرم‌شوندگی در درصدهای مختلف پلیمر شده است. در واقع، الیاف از گسستن ساختار خاک بعد از شکستن پیوندها و شکل‌گیری نوار برشی در نمونه‌های حاوی ۳ و ۴ درصد پلیمر، جلوگیری و همچنان طرفین سطح شکست را در تماس هم حفظ کرده و مانع از افت زیاد مقاومت برشی شده است.



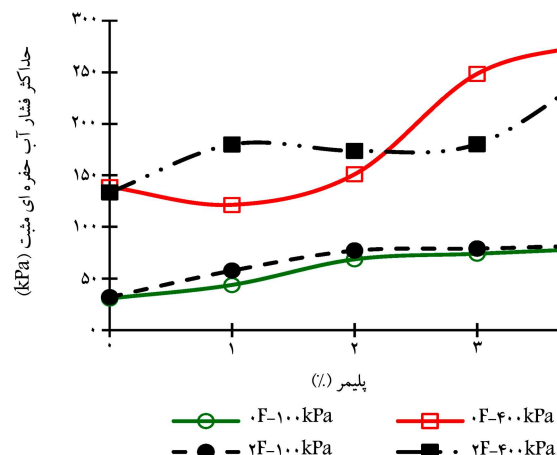
شکل ۱۹. تغییرات کرنش گسیختگی در لحظه‌ی شکست نمونه‌ها در حالت با و بدون الیاف.

نداشته و در انتهای برش، نقش آن متأثر از اندازه‌ی تنش همه‌جانبه بوده است؛ به نحوی که تحت تنش همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ kPa، میل انقباضی را بیشتر و تحت تنش همه‌جانبه‌ی ۴۰۰ kPa، برعکس آن عمل کرده است. لذا مجدداً یادآور می‌شود که رفتار حجمی و فشار آب حفره‌یی یک خاک ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده‌ی سیمانه شده با پلیمر و مسلح شده با الیاف، تابع پیچیده‌ی از مقاومت پیوندها، تسلیح، مقدار محصورشدگی و مقدار تغییر شکل (کرنش) است.

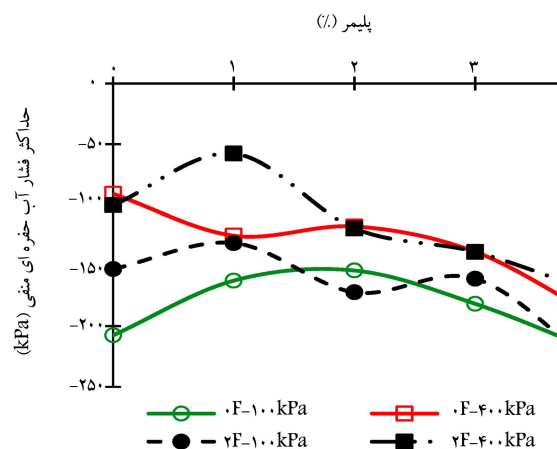
۶.۴. کرنش شکست و مدول کشسانی نمونه‌ها

کرنش محوری نظیر مقاومت برشی یا تنش انحرافی بیشینه در برابر درصد پلیمر با و بدون الیاف در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، حضور پیوندهای پلیمری در بین دانه‌های ماسه منجر به کاهش کرنش شکست نمونه‌ها و ترد شدن رفتار آن شده است. نرخ کاهش کرنش شکست و تردشدگی از پلیمر ۱ تا ۲ درصد خیلی شدیدتر از دیگر بازه‌هاست. به بیانی دیگر، از منظر انعطاف‌پذیری و تردی، تفاوت زیادی بین نمونه‌های حاوی ۲ تا ۴ درصد پلیمر مشاهده نمی‌شود. به استثناء نمونه‌ی حاوی ۱٪ پلیمر، نکته‌ی دیگر اثر نامحسوس الیاف در پارامتر مذکور است به بیان دیگر، ۲٪ الیاف، نقش چندانی در افزایش کرنش لحظه‌ی شکست نداشته است (لازم به ذکر است که علت پایین‌تر بودن کرنش نمونه‌ی الیاف‌دار نسبت به نمونه‌ی بدون الیاف در نمونه‌ی دارای ماسه تنها (بدون پلیمر) در آغاز رفتار نرم‌شوندگی (افت مقاومت جزئی) در کرنش ۱۲/۴٪ نمونه‌ی ماسه‌ی الیاف‌دار نسبت به نمونه‌ی بدون الیاف، که رفتار سخت‌شونده دارد، دانست (شکل ۸ الف). البته همان‌طور که قبلاً هم ملاحظه شد، نقش مثبت الیاف بیشتر بعد از نقطه‌ی شکست پیوندهاست، که مانع از افت شدید مقاومت می‌شود و نرم‌شوندگی را کم می‌کند.

مدول کشسانی ۵۰٪ در برابر درصد پلیمر در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که حضور پیوندهای پلیمر منجر به افزایش صعودی سختی ماسه شده و مطابق با انتظار محصورشدگی، روند اخیر را تشدید و حضور الیاف آن را کم کرده است. به عنوان مثال، تحت تنش همه‌جانبه‌ی ۴۰۰ kPa، افزودن ۴٪ پلیمر به ماسه، مدول کشسانی آن را از حدوداً ۳۱ به ۶۴۷ MPa رسانده و کاهش تنش همه‌جانبه به ۱۰۰ kPa، همین مقدار را به ۴۵۶ MPa تنزل داده است. از طرفی، حضور ۲٪ الیاف در بین دانه‌های ماسه، عدد ۶۴۷ MPa را به ۳۷۶ MPa کاهش داده است. لذا ملاحظه می‌شود که اثر حضور الیاف در کاهش سختی بیشتر از تنش

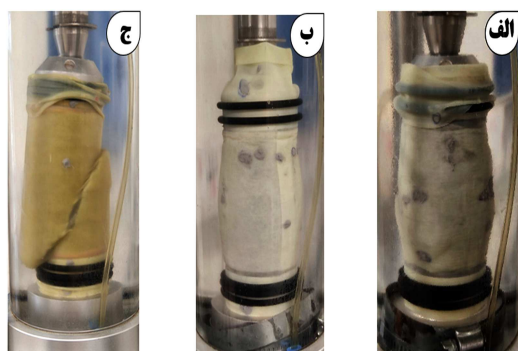


شکل ۱۷. بیشینه‌ی فشار آب حفره‌یی مثبت ایجاد شده در حالت با و بدون الیاف.

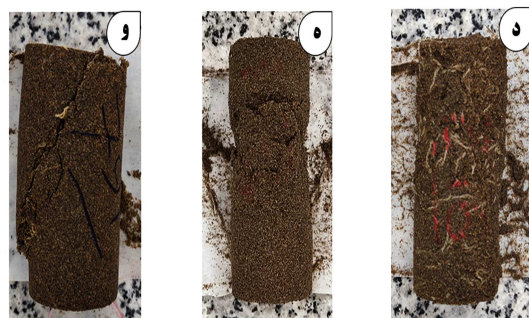


شکل ۱۸. بیشینه‌ی فشار آب حفره‌یی منفی ایجاد شده در حالت با و بدون الیاف.

حضور پیوندهای پلیمری و افزایش تعداد و مقاومت آنها، هم میل انقباضی (فشار آب حفره‌یی مثبت) را افزایش و هم در انتهای آزمایش، میل اتساع (فشار آب حفره‌یی منفی) را افزایش داده است، هر چند نوسان‌هایی در فشار آب حفره‌یی منفی نیز مشاهده می‌شود. فشار آب حفره‌یی مثبت در بخش ابتدایی بارگذاری برشی است، که هنوز بخش اعظم پیوندها سالم بوده و در این حالت، پیوندها با حفظ ساختار دانه‌های خاک در کنار یکدیگر مانع از ازدیاد حجم نمونه شده و منجر به ایجاد فشار آب حفره‌یی مثبت بیشتری شده‌اند. در حالی که در انتهای بارگذاری برشی، بیشتر پیوندها از هم گسیخته شده و دانه‌ها میل به اتساع داشته و فشار آب حفره‌یی منفی بیشتری ایجاد شده است. در مقادیر بالای پلیمر (۳ و ۴ درصد)، پیوندهای شکسته منجر به تیزگوشه‌تر شدن دانه‌ها شده و حتی بخشی از پیوندها به صورت ذرات ریز مستقل درآمده و در منافذ آزاد و مانع از رفتار انقباضی نمونه شده و لذا به افزایش فشار آب حفره‌یی منفی کمک کرده‌اند. الیاف نیز تقریباً همین نقش را دارند، ولی به جای ایجاد چسبندگی، با اتصال دانه‌ها به یکدیگر به کمک اصطکاک به حفظ ساختار نمونه و ایجاد فشار آب حفره‌یی مثبت و کاهش فشار آب حفره‌یی منفی کمک می‌کنند. این نکته در مقادیر کم پلیمر (۱ و ۲ درصد) خیلی محسوس است؛ ولی در مقادیر بالای پلیمر، به نوعی اثر متقابل پلیمر، الیاف و تنش همه‌جانبه در یک اندرکنش پیچیده‌ی هستند. در ابتدای نمودار شکل ۱۷ ملاحظه می‌شود که حضور الیاف، تأثیر چندانی در رفتار انقباضی ابتدایی (فشار آب حفره‌یی مثبت)

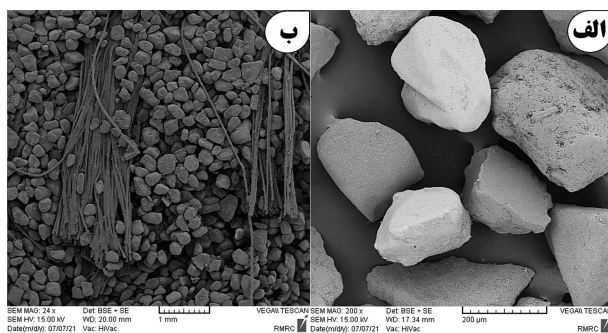


الف) ماسه تنها با الیاف؛ ب) ماسه تنها بدون الیاف؛ ج) ماسه با ۴٪ پلیمر؛

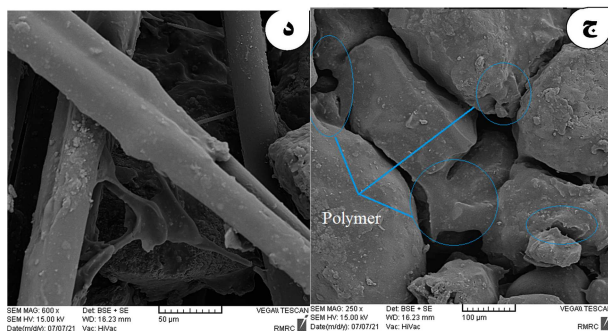


د) ماسه با ۱٪ پلیمر به همراه الیاف؛ ه) ماسه با ۱٪ پلیمر بدون الیاف؛ و) ماسه با ۴٪ پلیمر به همراه الیاف.

شکل ۲۱. تصاویر شکست نمونه در انتهای آزمایش.



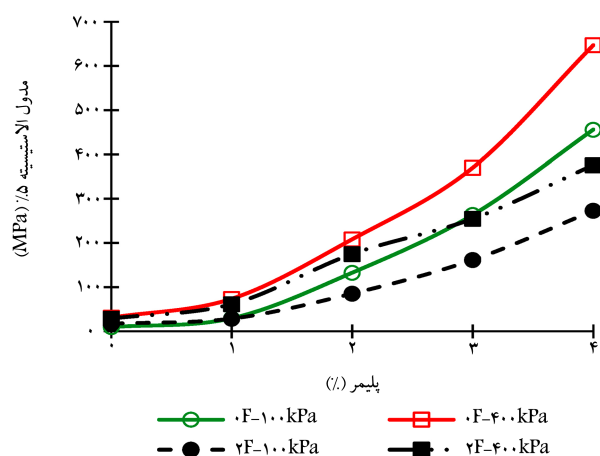
الف) دانه های ماسه؛ ب) الیاف در ترکیب با ماسه.



ج) پیوندهای پلیمر با الیاف؛ د) پیوندهای پلیمر بر روی دانه های ماسه.

شکل ۲۲. تصاویر میکروسکوپ.

۱۲ ج، پل ها و پیوندهای پلیمر را که در بین دانه های ماسه و سطح آنها ایجاد شده است، را به وضوح نشان می دهد. همین طور در شکل ۱۲ د، پیوندهای مابین الیاف و سطح آنها مشاهده می شود. البته لازم به ذکر است که بخشی از پیوندها در حین نمونه گیری و آماده سازی نمونه جهت تهیه عکس شکسته شده اند.



شکل ۲۳. مدول کشسانی ۵۰٪ در برابر مقدار پلیمر برای دو حالت با و بدون الیاف.

همه جانبه بوده است. البته با ملاحظه‌ی مجدد شکل مشاهده می شود که با افزایش درصد پلیمر، نقش الیاف در کاهش سختی پررنگ تر شده است.

۷.۴. نحوه‌ی شکست نمونه‌ها در انتهای آزمایش

در شکل ۲۱، تصاویر شکست نمونه‌ها در حالت‌های مختلف در انتهای آزمایش مشاهده می شود، که مربوط به ماسه‌ی بدون پلیمر است و مطابق آن، نمونه‌ی با الیاف، تغییرشکل خمیری بیشتری نسبت به نمونه‌ی بدون الیاف دارد. همین طور در تصویر ۱٪ پلیمر به وضوح شکست باندهای پلیمری در بین دانه‌های ماسه در یک سوم میانی نمونه دیده می شود. شکست در نمونه‌ی ۱٪ پلیمر به علت ضعیف بودن باندهای پلیمر، ابتدا در یک سوم میانی نمونه، که تمرکز تنش‌های وارده است، به صورت ترکیبی از خمیری شدن و شکل گیری نوار برشی است و بیشتر باندهای پلیمر در این مقطع از نمونه دچار گسیختگی می شوند و بیشتر انرژی وارد را جذب می کنند و باندهای پلیمر در یک سوم بالایی و پایینی آسیب کمتری می بینند. با اضافه شدن همین ترکیب به الیاف، باعث شکست خمیری و تمامی باندهای پلیمری دچار شکست شده اند و به علت وجود الیاف، جذب انرژی وارده بر تمامی دانه‌ها و باندهای پلیمری وارد می شود، که به طبع آن، شکست خمیری در تمامی نمونه ایجاد می شود، که در شکل ۲۱ د مشاهده می شود. در نمونه‌های بالاتر از ۲٪ به علت وجود پیوندهای قوی پلیمری، تمامی نمونه‌ها به صورت نوار برشی ۴۵ درجه رخ می دهد و به علت مقاومت بالای چسبندگی باندهای پلیمری در نمونه، ترک سراسری ۴۵ درجه مشاهده می شود. حتی در زمانی که به نمونه، الیاف وارد می شود، به علت قوی تر بودن مقاومت کششی الیاف نسبت به باندهای ایجاد شده و همچنین ضعیف بودن اصطکاک سطح الیاف نسبت به آن، مد گسیختگی بیرون کشیدگی الیاف رخ می دهد و الیاف دچار پارگی نمی شود.

۸.۴. عکس های میکروسکوپ الکترونیکی

در شکل ۲۲، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ماسه با پلیمر به همراه الیاف و بدون الیاف مشاهده می شود. مطابق شکل ۲۲ - الف، دانه های ماسه ی استفاده شده تقریباً با سطح های نسبتاً صاف، نیمه گرد و تیرگوشه هستند. تصویر ۲۲ ب، وضعیت اندازه‌ی الیاف نسبت به دانه های ماسه را نشان می دهد. ابتدا و انتهای الیاف، به علت هم زدن متعدد در حین ساخت نمونه، تارها از هم باز شده اند. تصاویر شکل ۲۲ ج و د، مربوط به ماسه با ۴٪ پلیمر بدون الیاف و با الیاف است. تصویر

کرنش‌های نظیر نقطه‌ی شکست ماسه بدون پلیمر بسته به مقدار تنش هم‌جانبه و حضور یا عدم حضور الیاف بین ۱۲/۵ تا ۲۰ درصد بوده است. حضور الیاف، کمی کرنش شکست نمونه‌های تثبیت شده را بهبود بخشیده است، ولی عمده‌ی تأثیر آن جلوگیری از شکست ترد نمونه‌ها بوده است؛ به نحوی که بعد از نقطه‌ی شکست نمونه و پیوندها، مانع از پاشیدگی ساختار خاک شده و از افت زیاد مقاومت جلوگیری کرده است، که باعث شده است نمونه تغییرشکل‌های بیشتری را تحمل کند.

۳. افزودن ۱ و ۲ درصد پلیمر منجر به کاهش حدوداً ۲/۵ درجه زاویه‌ی اصطکاک داخلی شده و افزایش درصد پلیمر به ۳ و ۴ درصد، منجر به افزایش ۱ تا ۶ درجه زاویه‌ی اصطکاک داخلی نسبت به خاک مینا شده است. حضور الیاف در مقادیر کم پلیمر (۱ و ۲ درصد) باعث افزایش ۱ تا ۴ درجه زاویه‌ی اصطکاک داخلی و در مقادیر پلیمر ۳ و ۴ درصد، منجر به کاهش آن به اندازه‌ی حدوداً ۱ تا ۵ درجه شده است.

۴. عمدتاً تأثیر پلیمر در ایجاد چسبندگی در ماسه است، به نحوی که اضافه کردن پلیمر تا ۴٪، چسبندگی ماسه را تا ۱۳۵۰ kPa اضافه کرده است. نتایج نشان از آن دارد که حضور الیاف، باعث کاهش چسبندگی خاک تثبیت شده است، به نحوی که عدد ۱۳۵۰ kPa را به ۹۰۰ kPa تقلیل داده است.

۵. اثر تثبیتی دیگر پلیمر پی‌تکس، افزایش قابل توجه سختی خاک است؛ به نحوی که تحت تنش هم‌جانبه‌ی ۴۰۰ kPa، مدول کشسانی سکانت ۵٪ را از حدود ۳۰ MPa به حدود ۶۴۷ MPa رسانده است. با این حال، حضور الیاف آن را کاهش داده و به ۳۷۶ MPa رسانده است.

۶. به طور کلی رفتار برشی و پارامترهای مقاومتی خاک تثبیت شده با پلیمر پی‌تکس و مسلح شده با الیاف نخ تار، تابعی از درصد پلیمر، اندازه‌ی تنش هم‌جانبه و تغییر شکل یا کرنش اعمالی است و گاهی نتایج نااهم‌انگ هم مشاهده می‌شود و تشریح را سخت می‌کند.

به طور کلی، ۱٪ پلیمر توانسته باندهایی با ضخامت کافی و مقاومت بالا بین دانه‌ها ایجاد و رفتار خاک را کنترل کند. از طرفی، در قفل و بست و اصطکاک دانه‌های ماسه هم اختلال ایجاد کرده است. افزایش درصد پلیمر باعث انتقال رفتار مقاومت ماسه از دانه‌های آن به پیوندهای پلیمری شده است. افزایش درصد پلیمر باعث افزایش پیوندهای بین دانه‌های ماسه و ضخیم شدن باندها و در نتیجه افزایش مقاومت می‌شود، که در عکس‌های SEM مشاهده می‌شوند.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، پتانسیل اصلاح‌پذیری مقاومتی خاک ماسه‌یی با دانه‌بندی یکمواخت با استفاده از یک مایع پلیمری به نام PAYTEX NL۲۵ که یک پلیمر دوستدار محیط‌زیست نسبت به دیگر پلیمرها و تثبیت‌کننده‌های سنتی است و الیاف ضایعاتی صنعت نخ تار به کمک آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته‌ی - زهکشی شده تحت تنش‌های هم‌جانبه‌ی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال بررسی شده است. مقدار پلیمر به اندازه‌ی صفر، ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد و مقدار الیاف به اندازه‌ی ۲٪ وزن خاک خشک انتخاب شده‌اند. نمونه‌ها با رطوبت بهینه و تراکم بیشینه‌ی حاصل از آزمایش تراکم استاندارد ساخته شده‌اند. اهم نتایج به دست آمده به این شرح است:

۱. ۱٪ پلیمر پی‌تکس باعث افزایش اندکی در سختی و مقاومت خاک شده است. استفاده از الیاف نیز تأثیر کمی در مقاومت برشی ماسه‌ی خالی و ماسه‌ی حاوی ۱٪ پلیمر نشان داده است؛ ولی شکل‌پذیری هر دو را ارتقاء داده است. به عبارتی دیگر، در این حالت، الیاف در کنار اثر مثبت در مقاومت برشی و سختی، کرنش لحظه‌ی شکست را نیز افزایش داده‌اند.

۲. مقاومت برشی در مقادیر پلیمر ۲، ۳ و ۴ درصد، افزایش قابل‌توجهی داشته است؛ که عمدتاً تمامی نمونه‌ها در کرنش‌های محوری زیر ۳٪ دچار شکست شده و بعد از آن نرم‌شوندگی و افت مقاومت زیادی را تجربه کرده‌اند؛ در حالی که

پانویس‌ها

1. Polypropylene
2. Polyamide
3. Michalowski & Cermak
4. Anagnostopoulos
5. Acrylic Resin
6. Methyl Methacrylate Ester
7. Coir
8. Polyvinyl Alcohol
9. Poly Methyl Mehta Acrylate
10. Epoxy resin
11. Anagnostopoulos
12. Anagnostopoulos & Papaliangas
13. Polyurethane Organic Polymer
14. Ehrlich
15. Tareh Dehghani & Ezna Ashri

منابع (References)

1. Al-Khanbashi, A. and El-Gamal, M., 2003. Modification of sandy soil using water-borne polymer. *Journal of Applied Polymer Science*, 88(10), pp.2484-2491. <https://doi.org/10.1002/app.12066>.
2. Michalowski, R.L. and Čermaák, J., 2003. Triaxial compression of sand reinforced with fibers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(2), pp.125-136. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:2\(125\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:2(125)).
3. Anagnostopoulos, C.A., 2005. Laboratory study of an injected granular soil with polymer grouts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(6), pp.525-533. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.04.005>.
4. Chauhan, M.S., Mittal, S. and Mohanty, B., 2008. Performance evaluation of silty sand sub-grade reinforced with fly ash and fibre. *Geo-*

- textiles and Geomembranes*, 26(5), pp.429-435. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2008.02.001>.
5. Shahnazari, H.A.B.I.B., Ghiassian, H., Noorzad, A., Shafiee, A., Tabarsa, A.R. and Jamshidi, R., 2009. Shear modulus of silty sand reinforced by carpet waste strips. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 11(3), pp.133-142.
6. Consoli, N.C., Vendruscolo, M.A., Fonini, A. and Rosa, F.D., 2009. Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(3), pp.196-203. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2008.11.005>.
7. Park, S.S., 2009. Effect of fiber reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fiber-reinforced cemented sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(2), pp.162-166. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2008.09.001>.
8. Naeini, S.A. and Mahdavi, A., 2009. Effect of polymer on shear strength of silty sand. *EJGE*, 14, pp.1-11.
9. Naeini, S.A. and Ghorbanali, M., 2010. Effect of Wet and Dry Conditions on Strength of Silty Sand Soils Stabilized with Epoxy Resin Polymer. *Journal of Applied Sciences*, 10(22), pp.2839-2846. <https://doi.org/10.3923/jas.2010.2839.2846>.
10. Sadek, S., Najjar, S.S. and Freiha, F., 2010. Shear strength of fiber-reinforced sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(3), pp.490-499. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000235](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000235).
11. Anagnostopoulos, C., Papaliangas, T., Manolopoulou, S. and Dimopoulos, T., 2011. Physical and mechanical properties of chemically grouted sand. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(6), pp.718-724. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.05.006>.
12. Anagnostopoulos, C.A. and Papaliangas, T.T., 2012. Experimental investigation of epoxy resin and sand mixes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(7), pp.841-849. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000648](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000648).
13. Liu, J., Feng, Q., Wang, Y., Bai, Y., Wei, J. and Song, Z., 2017. The effect of polymer-fiber stabilization on the unconfined compressive strength and shear strength of sand. *Advances in Materials Science and Engineering*, pp.1-9. <https://doi.org/10.1155/2017/2370763>.
14. Liu, J., Bai, Y., Song, Z., Lu, Y., Qian, W. and Kanungo, D., 2018. Evaluation of strength properties of sand modified with organic polymers. *Polymers*, 10(3), 287. <https://doi.org/10.3390/polym10030287>.
15. Baghini, M.S., Ismail, A., Asghar, M.P., Fendereski, G. and Sadeghi, M., 2018. Measuring the effects of styrene butadiene copolymer latex-Portland cement additives on properties of stabilized soil-aggregate base. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(5), pp.458-469. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.12.001>.
16. Ehrlich, M., Almeida, M. and Curcio, D., 2019. Hydro-mechanical behavior of a lateritic fiber-soil composite as a waste containment liner. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(1), pp.42-47. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2018.09.005>.
17. Roshan, K., Choobbasti, A.J. and Kutanaei, S.S., 2020. Evaluation of the impact of fiber reinforcement on the durability of lignosulfonate stabilized clayey sand under wet-dry condition. *Transportation Geotechnics*, 23, 100359. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100359>.
18. Taher, Z.J., Scalia IV, J. and Bareither, C.A., 2020. Comparative assessment of expansive soil stabilization by commercially available polymers. *Transportation Geotechnics*, 24, 100387. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100387>.
19. Valipour, M., Shourijeh, P.T. and Mohammadinia, A., 2021. Application of recycled tire polymer fibers and glass fibers for clay reinforcement. *Transportation Geotechnics*, 27, 100474. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100474>.
20. Molvi Najoomi., 2012. Studying the mechanical behavior of clay modified with cement and tire thread fibers. Master's Thesis, Boali Sina University, Hamadan. [In Persian].
21. Mirzaei, F. and Ezni Ashari, M., 2010. Investigating the effect of tire thread fibers on the behavior of reinforced shear stress and shear strength of sandy soil. Master's Thesis, Bo Ali Sina University, Hamedan. [In Persian].
22. Tareh Dehghani, A. and Ezna Ashri, M., 2013. Investigation of stress-strain behavior and dynamic properties of soil reinforced with tire thread fibers, Master's Thesis, Bo Ali Sina University, Hamadan. [In Persian].
23. Isfahan Paya Resin Company., 1993. Technical reports of the company's laboratory. Isfahan, Iran, <https://payaresin.com>
24. Introducing Saba Tire Cord Company., 1996. Zanjan, Iran. <http://www.riidco.com>.
25. ASTM D6980., 2017. Standard test method for determination of moisture in plastics by loss in weight. (n.d.). <https://www.astm.org/d6980-17.html>.
26. ASTM D4767-11. 2020. Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils. (n.d.). <https://www.astm.org/d4767-11r20.html>.