

ارزیابی اثر میزان رطوبت اولیه بستر ماسه‌ای و درصد قیر امولسیون‌ی بر تغییر شکل نهایی و مقاومت روسازی تقویت‌شده توسط الیاف و سیمان

محمد مهدی خبیری*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

حسن محمدی انائی، دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه

یزد

Email: mkhabiri@yazd.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۲۹ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۲۹

چکیده

ساخت راه‌ها و پروژه‌های عمرانی روی خاک‌های ماسه‌ای، به دلیل عدم مقاومت کافی، معمولاً با جابجایی خاک بستر و یا تغییر مسیر انجام می‌شود. بنابراین، تثبیت و بررسی عوامل مؤثر بر تثبیت آن با مواد مختلف همواره مورد توجه محققین بوده است. مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن عموماً سبب افزایش شکل‌پذیری و مقاومت مکانیکی خاک‌ها، نظیر مقاومت فشاری و برشی، می‌گردد. از طرف دیگر، میزان رطوبت اولیه جهت تثبیت با قیر امولسیون‌ی نقش مهمی دارد. از این‌رو، در این تحقیق، تثبیت و بهسازی ماسه روان با استفاده از درصد‌های مختلف رطوبت اولیه، قیر امولسیون‌ی و الیاف در درصد سیمان بهینه مد نظر قرار گرفت. نتایج آزمایش فشاری تک‌محوره نشان می‌دهد که افزودن الیاف باعث افزایش ظرفیت باربری به‌طور متوسط به میزان ۱۰٪ می‌شود. افزایش رطوبت اولیه، عملکرد مقاومت بستر ماسه‌ای را در ابتدا افزایش داده و سپس در رطوبت‌های زیاد کاهش می‌دهد. همچنین، افزایش درصد قیر و الیاف تأثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش شکل‌پذیری خاک بستر تثبیت‌شده دارد.

واژه‌های کلیدی: ماسه روان، الیاف، قیر امولسیون‌ی، شکل‌پذیری، مقاومت فشاری تک‌محوره

۱. مقدمه

انتخاب نوع و مقدار ماده‌ی تثبیت و تقویت‌کننده به اهداف تثبیت و ارزیابی‌های اقتصادی بستگی دارد. مناطق خشک آسیا، سرزمین‌های وسیعی را در داخل نواحی معتدله، استوایی و نیمه‌استوایی می‌پوشانند. کشور پهناور ایران نیز در این منطقه قرار داشته و بیش از دوسوم خاک آن تحت تأثیر اقلیم خشک قرار دارد. سطح وسیعی از

بسیاری از خرابی‌هایی که امروزه در سطح روسازی به وجود می‌آید ناشی از ضعف توان باربری خاک بستر روسازی می‌باشد. در برخی مناطق، استفاده از خاک منطقه به‌عنوان لایه بستر اقتصادی‌تر است. در چنین شرایطی، تثبیت و تقویت بستر امری ضروری به نظر می‌رسد.

افزودن فیله‌های ریزدانه و غیرچسبنده برای استفاده مناسب شود.

مقاومت خاک بستر نقش عمده‌ای در خرابی روسازی‌ها دارد. اکثر مطالعات نشان داده‌اند که خرابی شیارشدگی و عمق آن بیش از ۴۰٪ وابسته به رفتار لایه‌های شنی، به‌ویژه خاک بستر، است (خبیری، ۲۰۰۶). امروزه، استفاده از مصالح نوین، نظیر الیاف و شبکه‌های پلیمری، در امر تقویت بستر و یا لایه‌های روسازی به دلیل مشخصات فنی مناسب، توزیع بهتر راه‌های ترافیکی و جلوگیری از نشست‌های موضعی و یا نامتقارن بستر در لایه‌های روسازی و بستر راه مورد توجه قرار گرفته است. گرگ و همکاران (۱۹۶۷) یک مطالعه‌ی میدانی و آزمایشگاهی برای ماسه روان تثبیت‌شده با قیر انجام دادند. در این مطالعه، آن‌ها بر دو عامل دما و نسبت باربری، که بر رفتار ماده تثبیت‌شده با قیر اثر می‌گذارد، تمرکز کردند. نتایج نشان داد که با افزایش دما، خاصیت چسبندگی و نسبت باربری به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. یانگ و همکاران (۱۹۹۴) نیز نشان دادند که در تثبیت لوم‌های ماسه‌ای با پسماند نفتی، چسبندگی افزایش قابل توجهی یافته، اما زاویه اصطکاک تغییرات چندانی نداشته است. همچنین، مشخص شد که رطوبت تأثیر نامطلوبی روی مقاومت نمونه‌های تثبیت‌شده با پسماند نفتی دارد.

در سال‌های اخیر، استفاده از الیاف برای مسلح کردن و بهبود پارامترهای مقاومتی خاک به‌صورت قابل توجه و در سطح گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده همزمان از مواد نفتی و الیاف، امکان بالا بردن مقاومت فشاری و سایر پارامترهای مهندسی خاک را به‌صورت بالقوه دارا می‌باشد. از سوی دیگر، به دلیل کم‌هزینه بودن این روش نسبت به مقاومت حاصل، استفاده از آن می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های متداول تثبیت خاک‌های ماسه‌ای و همچنین کاربرد در زمینه ساخت راه‌های روستایی باشد (سانتونی و

این مناطق، به مساحت تقریبی ۱۲ میلیون هکتار را تپه‌های ماسه‌ای پوشانده است (کلینسلی، ۱۳۸۱). معمولاً مقاومت این نوع خاک‌ها کم بوده و ساخت راه‌ها و پروژه‌های عمرانی دیگر روی این نوع خاک‌ها با توجه به خواصشان میسر نمی‌باشد. در این حالت، اگر فاصله معادن قرصه تا محور راه یا پروژه عمرانی زیاد باشد، آن‌گونه که در مناطق کویر مرکزی، کویر لوت و یا بیابان‌های جنوب کشور چنین است، هزینه بهسازی خاک منطقه و احداث راه چندین برابر حد معمول خواهد شد. از این‌رو، تثبیت و بهسازی این خاک‌ها، همواره مورد توجه محققین بوده و مواد و روش‌های گوناگونی برای بهسازی ماسه‌های روان، از جمله مواد هیدروکربنی سنگین نظیر قیر و پسماندهای نفتی، مورد استفاده قرار گرفته‌اند (حاجی‌نیان و همکاران، ۱۳۹۲). از گذشته تا به امروز، تحقیقات مختلفی در زمینه استفاده از مواد هیدروکربنی و مشتقات نفت خام برای اصلاح خصوصیات ژئوتکنیک خاک‌های ماسه‌ای صورت گرفته است. در این میان، مطالعه جامع اثر رطوبت اولیه در تثبیت ماسه با استفاده از قیرهای امولسیون‌ی برای تثبیت و بهسازی خاک‌های ماسه‌ای به‌ندرت انجام شده است.

۲. پیشینه پژوهش

مک‌کسان و مور (۱۹۴۱) نخستین کسانی بودند که از قیر امولسیون برای پایدارسازی ماسه استفاده کردند. ماسه از مناطق مختلف فلوریدا برای تثبیت با امولسیون مورد آزمایش قرار گرفت. آن‌ها نتیجه گرفتند که تثبیت ماسه در صورتی رضایت‌بخش است که مقدار باربری فلوریدای آن بیشتر از ۱۲ کیلوگرم باشد؛ اما هنگامی که ماسه قبل از اختلاط با امولسیون مورد آزمایش قرار گیرد. مخلوط در صورتی رضایت‌بخش است که مقدار باربری آن در آزمایش اصلاح‌شده فلوریدا بیشتر از ۴۵ کیلوگرم در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و بعد از اختلاط با امولسیون باشد. آن‌ها نشان دادند که ماسه با پایداری کم می‌تواند با

عملکرد ماسه‌ی روان تثبیت‌شده با امولسیون گوگردی با ماسه تثبیت‌شده با امولسیون معمولی مقایسه شد که این مصالح به‌عنوان لایه اساس در روسازی استفاده می‌شدند. در تمامی این مخلوط‌ها از ۲٪ سیمان پرتلند برای استحکام حالت خشک و مرطوب مخلوط استفاده شد. آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم، مقاومت برشی و مدول الاستیسیته مخلوط در دمای ۲۲ درجه سلسیوس انجام شد. نتایج نشان داد که امولسیون‌های گوگردی نسبت به امولسیون‌های معمولی مقاومت برشی کمتری داشته، ولی مدول الاستیسیته و مقاومت کششی غیرمستقیم بیشتری دارند. در مطالعات دیگری، یک پلیمر مایع فعال با نام متیلن دی‌فنیل‌دی‌زیوسیانات (MDI) به‌عنوان یک تثبیت‌کننده خاک برای ماسه ضعیف (SP) مورد مطالعه قرار گرفت. تمرکز مطالعه به‌منظور تعیین روش آماده‌سازی و طراحی مخلوط برای دستیابی به بهترین عملکرد ماسه تثبیت‌شده بود. نمونه‌های ماسه تثبیت‌شده در محیط‌های مختلف، به‌عنوان مثال محیط گرم و مرطوب، و در مدت‌زمان مختلف عمل‌آوری شدند. نتایج نشان داد که عمل‌آوری نمونه در هوا به مدت ۴ روز و آب به مدت ۴ روز منجر به حداکثر مقاومت می‌شود. پس از روش و مدت زمان تعیین شده، نمونه‌های آماده شده با درصد‌های مختلف نسبت پلیمر و پلیمر آب (۱:۲، ۱:۱، ۱:۲، ۱:۳ و ۱:۴) بیشتر مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت پلیمر-آب ثابت، مقاومت ماسه تثبیت‌شده به‌طور خطی با افزایش مقدار پلیمر اضافه شد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که نسبت پلیمر به آب ۱:۲ باعث افزایش ۵۰۰۰ کیلوپاسکال مقاومت فشاری نامحدود برای ماسه شده است. نمونه‌های تثبیت‌شده تحت شرایط بارگذاری فوق‌العاده‌ای ایستا و ثابت بودند. پس از ۱۰۰۰۰ بارگذاری خمشی تکراری با ۷۵۰ عدد میکرواسترین برای هر چرخه، نمونه‌ها به‌طور عمده واکنش‌های الاستیک، بدون نشانه‌ای از خستگی را نشان دادند

همکاران، ۲۰۱۱). تانگ و همکاران (۲۰۱۰) به اهمیت نقش الیاف در مسلح کردن خاک پی برده و توانستند توسط الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت فشاری خاک را به مقدار ۲۲۹/۸ کیلوپاسکال برسانند. این در حالی است که مقاومت فشاری نمونه‌های بدون الیاف حداکثر در حدود ۱۵۱ کیلوپاسکال بوده است. حق شنو و عربانی (۱۳۸۷) به بررسی اثر الیاف پلیمری بر خصوصیات مقاومتی ماسه تثبیت‌شده با سیمان پرداختند و با استفاده از آزمایش تک‌محوری، چنین نتیجه گرفتند که افزودن الیاف پلیمری به مخلوط خاک-سیمان موجب افزایش مقاومت فشاری آن می‌شود. درصد الیافی که به ازای آن حداکثر مقاومت فشاری حاصل می‌شود به مقدار سیمان بستگی دارد. بنابراین، توزیع تصادفی الیاف درون خاک می‌تواند به‌عنوان یک ماده مسلح‌کننده، که سبب بهبود خصوصیات مهندسی خاک می‌شود، مطرح شود. الیاف، به دلیل سطح تماس کم و اصطکاک محدود با دانه‌های خاک، به‌طور کامل نمی‌توانند تمامی ویژگی‌های مقاومتی خاک را بهبود بخشند. لذا، معمولاً برای ایجاد مقاومت‌های بیشتر، همراه با الیاف، از یک دوغاب و یا ماده چسبنده برای اتصال و درگیر کردن ذرات خاک با الیاف استفاده می‌گردد (پرابیکر و همکاران، ۲۰۰۱). در تحقیق مورد اشاره، علاوه بر قیر، از سیمان نیز به‌عنوان یک ماده چسبنده استفاده شده است، که استفاده از سیمان باعث بهبود پارامترهای مقاومتی خاک، اتصال بهتر و درگیر کردن ذرات خاک با یکدیگر و با الیاف می‌شود. در این میان، می‌توان به تحقیقات داس و همکاران (۱۹۹۴) و شیپاتا و بغدادی (۲۰۰۱) اشاره کرد. نتایج تحقیقات محققین نشان داد که افزودن سیمان به خاک سبب افزایش سختی و رفتار شکننده خاک و بهبود خصوصیات مهندسی آن می‌شود. در حالی که در کنار افزایش مقاومت، رفتار مخلوط شکننده شده و تردی همراه با افزایش سختی به همراه داشته است (کولگ و همکاران، ۱۹۸۱). در تحقیقی روی مناطق بیابانی (عبدالله و ال-عبدالوهاب، ۲۰۱۸)،

روش‌های گوناگونی برای بررسی عملکرد انعطاف‌پذیری لایه‌های بستر موجود می‌باشد. یکی از این روش‌ها، آزمایش میدانی با مخروط نفوذسنج دینامیک (نظریان و همکاران، ۲۰۰۰) می‌باشد. البته در مطالعه حاضر از این فرض که تغییر شکل به دست آمده در روش مقاومت فشاری تک‌محوره به‌عنوان ابزار سنجش انعطاف‌پذیری روسازی در نقطه شکست است، استفاده شد. از جمله فرضیات و سؤالات مورد بررسی در این پژوهش، تعیین اثر اختلاط قیر امولسیون‌ی و الیاف به خاک ماسه‌ای ناپایدار و روان در بستر روسازی می‌باشد که چه میزان باعث بهبود خواص مکانیکی آن از جمله افزایش مقاومت تک‌محوره و خاصیت شکل‌پذیری می‌شود. این امر، دست‌طراحان، در صورت ناگزیر بودن اجرای طرح‌های عمرانی، به‌خصوص پروژه‌های راه‌سازی در زمین‌های ماسه‌زار و ناپایدار، را باز می‌گذارد تا با تثبیت با امولسیون و تسلیح نمودن آن با مواد پیشنهادی این مطالعه، هزینه‌های وارده به پروژه‌های راه‌سازی را که روی این‌گونه خاک‌ها احداث می‌شوند حذف کرده یا کاهش دهند؛ یا هزینه‌های جابجایی حجم زیادی از ماسه از بستر راه را کاهش دهند.

همان‌گونه که در بررسی مطالعات فوق مشخص شد، تا کنون به اثر رطوبت اولیه بر عملکرد خاک تثبیت‌شده با قیرهای امولسیون‌ی توجه نشده است. میزان رطوبت اولیه بر عملکرد مقاومت و پاسخ روسازی در بسترهای تثبیت‌شده تأثیرات قابل توجهی دارد. از این‌رو، هدف این تحقیق، بررسی اثر میزان رطوبت اولیه و مقدار قیر امولسیون‌ی بر مقاومت ماسه روان تثبیت‌شده با سیمان و الیاف می‌باشد. همچنین، بهینه‌ترین حالت اختلاط برای رسیدن به بیشترین مقاومت و کمترین تغییر شکل در لحظه شکست برای ماسه روان تثبیت‌شده با سیمان، قیر امولسیون‌ی و الیاف در درصد رطوبت بهینه مورد نظر است. از اهداف این تحقیق، رسیدن به طرح اختلاط بهینه

(رضایملک و همکاران، ۲۰۱۷). در تحقیقی دیگر، به استفاده از الیاف طبیعی در تثبیت ماسه‌های ساحلی توجه شده است. نتایج آزمایش^۱ ITS نشان‌دهنده افزایش بیش از ۸۲ درصدی مقاومت کششی نمونه‌های حاوی صفر و ۱ درصد الیاف نخل در خاک و همچنین در نمونه‌های ۰/۵ درصد الیاف با عمل‌آوری ۵ روزه بود. همچنین، به‌کارگیری این مقادیر در حالت اشباع و رطوبت بهینه، موجب ارتقاء قابل توجه مقادیر CBR^۲ شد (کاووسی و صائبی، ۱۳۹۵). در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۷ نشان داده شد که ماسه‌های طبیعی در ساختار داخلی دارای نیروی انسجام و پیوستگی کوچکی هستند. پلیمرهای آلی برای تقویت این ماسه‌ها استفاده می‌شوند. برای ارزیابی اثربخشی پلیمرهای اُرگانیک به‌عنوان تثبیت‌کننده خاک (PSS)، یک سری آزمون‌های مقاومت فشاری محدود نشده روی ماسه تقویت شده انجام شد. تمرکز این مطالعه به‌منظور تعیین یک روش عمل‌آوری و طراحی مخلوط برای تثبیت شن و ماسه بود. مدت زمان عمل‌آوری، ویسکوزیته PSS و تراکم ماسه به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شد. مکانیسم تقویت با تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقاومت ماسه تثبیت‌شده با افزایش زمان، ویسکوزیته و تراکم ماسه افزایش یافته است. واکنش شیمیایی بین PSS و ذرات ماسه در سطح میکروی آن است که موجب افزایش مقاومت ماسه توسط پیوند ذرات آن و پر شدن فضاهای خالی می‌شود. در مقایسه با روش‌های تثبیت سنتی، PSS دارای مزایای صرفه‌جویی در زمان، هزینه‌های کمتر و حفاظت بهتر محیط‌زیست است. نتایج تحقیق می‌تواند برای برنامه‌های اجرایی مهندسی، مانند تثبیت لایه اساس، تثبیت خاک بستر و محدوده‌های دفن زباله کاربرد داشته باشد (لیو و همکاران، ۲۰۱۸).

^۲ California Bearing Ratio

^۱ Indirect tensile strength

الیاف مورد استفاده جهت تسلیح، الیاف مرکب پلیمری می‌باشد. الیاف، با استفاده از ایجاد پیوستگی بین اجزای خاک، به افزایش مقاومت خاک کمک می‌کند. با این کار، در هنگام بارگذاری نمونه خاک، نیروی کششی در الیاف ایجاد می‌شود و الیاف به علت مقاومت کششی، به پایداری و مقاومت بیشتر نمونه کمک می‌کند. هرچه الیاف درگیری بیشتری با خاک داشته باشد و یا مقاومت بیشتری داشته باشد، این فرایند بهتر انجام خواهد شد. همچنین، الیاف بدون گلوله شدن و به‌طور یکنواخت در خاک توزیع می‌شود. در نتیجه، باعث تقویت خاک در تمام جهات و حذف صفحات ضعیف در آن می‌شود. خصوصیات الیاف مذکور در جدول ۱ ارائه گردیده است. شکل ۱، تصویری از مصالح خاک بستر و الیاف به‌کار رفته در تحقیق را نشان می‌دهد. همچنین، شکل ۲، دانه‌بندی ماسه روان که آن را در دسته SP قرار داده نشان می‌دهد.

در مواد تثبیت‌کننده برای رسیدن به مقاومت حداکثر و در عین حال شکل‌پذیری در روسازی انعطاف‌پذیر است. موضوع محدوده شکل‌پذیری قابل قبول و مشخص، نه روسازی بسیار سخت و نه تغییرشکل بیش از حد، مورد توجه طرحان روسازی است (خبیری، ۲۰۱۱) و لذا توجه به این موضوع، در این مطالعه و مطالعات آتی از ضروریات دانش در جوامع علمی مرتبط با روسازی است.

۳. روش تحقیق و فرایند آزمایشگاهی

مصالح به‌کار رفته در این تحقیق شامل ماسه روان، سیمان، آب و الیاف پروپیلین می‌باشند که توضیحات بعدی به معرفی مشخصات این مصالح و روش‌های استاندارد به‌کار رفته برای انجام آزمایش‌ها اختصاص یافته است.

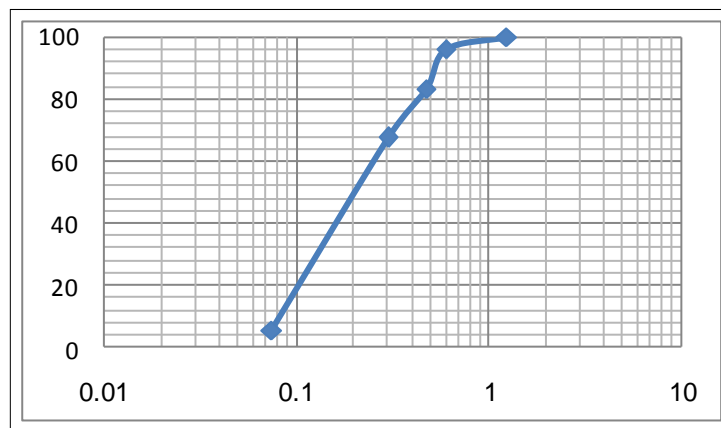
۳-۱. مشخصات مصالح اولیه

جدول ۱. مشخصات فیزیکی الیاف مورد استفاده (انصاری نیا)

رنگ	چگالی (gr/cm^3)	طول (mm)	قطر (mm)	مقاومت کششی (Mpa)
سفید	۱۸/۱	۱۸-۱۲	۰/۱۳	۹۰۰
مدول الاستیسیته (Gpa)	نقطه ذوب ($^{\circ}C$)	جذب آب	مقاومت در محیط‌های اسیدی و بازی	نشان تجاری
۶	۲۳۰	ندارد	خوب	الیاف مرکب پلیمری پارافیبر



شکل ۱. نمایش شکل ظاهری ماسه و الیاف



شکل ۲. نمودار دانه بندی خاک مورد استفاده

ماسه‌ای با درصدهای مختلف قیر امولسیونی (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد)، الیاف (۱، ۲ و ۳ درصد) و آب (۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد) نسبت به وزن خشک خاک ساخته شد. در روش طرح اختلاط نمونه‌ها، ابتدا خاک با مقدار سیمان بهینه به خوبی با هم مخلوط شده و سپس با اضافه کردن درصدهای مختلف آب و قیر به مخلوط، الیاف به صورت کاملاً یکنواخت به آن اضافه شد. پس از اطمینان از همگنی مخلوط حاصل، نمونه‌های ساخته شده در دو لایه و در داخل قالب (لوله پی وی سی به قطر ۵) کوبیده شد. نمونه‌های ساخته شده بلافاصله از قالب بیرون آورده شده و بعد از گذشت ۲۴ ساعت، آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده مطابق با استاندارد ASTM:D2166-96 روی آن‌ها صورت گرفت (شکل ۳). انتخاب زمان کوتاه عمل‌آوری بعد از اختلاط، برای انطباق شرایط آزمایشگاهی با واقعیت، جهت افزایش سرعت عمل اجرا است.

ماسه مورد آزمایش از کویر اطراف یزد، که مسیر روی آن احداث شده، تهیه و برای تعیین خصوصیات ماسه تهیه شده آزمایش‌های مختلفی به شرح جدول ۲ انجام گرفت. قیر مصرفی در تحقیق، جهت تثبیت نمونه‌ها، از کارخانه نفت پاسارگاد با مشخصات جدول ۲ می‌باشد. آب مصرفی مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها، آب شرب شهری می‌باشد. مواد سیمانی به کار برده شده در ساخت نمونه‌ها، سیمان پرتلند تپ ۲ تولیدی کارخانه سیمان شهرستان مهریز است. سیمان پرتلند مورد استفاده باید الزامات استاندارد ASTM C150 را ارضا نماید (ASTM C150-07، ۲۰۰۷). مشخصات فیزیکی و شیمیایی این سیمان در جدول ۲ آورده شده است.

۲-۳. تهیه نمونه‌ها و آزمایش‌ها

در این تحقیق، در ابتدا برای تعیین درصد سیمان بهینه، آزمایش فشاری تک‌محوره روی نمونه‌های ماسه‌ای ساخته شده با ۱٪ الیاف و میانگین درصدهای استفاده شده برای رطوبت و قیر، به ترتیب به میزان ۵ و ۱۰ درصد، با مقادیر مختلف سیمان (۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ درصد) انجام شد. پس از تعیین مقدار سیمان بهینه، نمونه‌های

جدول ۲. مشخصات ماسه، قیر و سیمان مورد استفاده

مقدار	استاندارد	مشخصات خاک	
(A-1-b) SP Non. PI صفر غیرخمیری ۲/۶۳ ۰/۶	ASTM D-2487 ASTM D-4318 ASTM D-854 ASTM D-2487 ASTM D-2487 ASTM D-2216	رده بندی خاک 'USCS (AASHTO) حد خمیری حد روانی شاخص خمیری چگالی ویژه درصد رطوبت اولیه	
نوع قیر CRS-1	آزمایش های مربوط به قیر		
۴۳ ۶۵ حداکثر ۱ حداکثر ۰/۱ حداکثر ۱۲	کندروانی سی بولت فیورل در ۵۰ درجه سلسیوس (ثانیه) درصد قیر پایداری در برابر ته نشینی مانده روی الک درصد حجمی روغن امولسیون در آزمایش تقطیر		
۱۱۵ ۴۰ ۹۹/۷	درجه نفوذ (یک دهم میلی متر) خاصیت انگمی حلالیت در تری کلروراتیلن (%)	آزمایش قیر باقیمانده از تقطیر	
نوع آزمون	مقدار (درصد)	اختصار	ویژگی های شیمیایی سیمان
طبق استاندارد ملی ایران به شماره ۱۳۹۲	۲۰/۰	SiO ₂	اکسید سیلیسیم
	۶/۰	Al ₂ O ₃	اکسید آلومینیوم
	۶/۰	Fe ₂ O ₃	اکسید آهن
	۵/۰	MgO	اکسید منیزیم
	۳/۰	SO ₃	تری اکسید گوگرد
	۳/۰	-	کسر وزن در اثر سرخ شدن
	۰/۷۵	-	باقیمانده نامحلول
۸/۰	C ₃ A	تری کلسیم آلومینات	
	مقدار	ویژگی فیزیک سیمان	
	۲۸۰۰	سطح مخصوص ۱ سانتی متر مربع بر گرم	
	۰/۸	انبساط آزمایش اتوکلاو درصد	
	۴۵	اولیه (دقیقه)	زمان گیرش با سوزن ویکات
	۶	نهایی (ساعت)	
	۱۰۰	۳ روزه	تاب فشاری (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)
	۱۷۵	۷ روزه	
	۳۱۵	۲۸ روزه	
	۷۰	حرارت هیدراتاسیون (کالری بر گرم)	

^۱ Unified Soil Classification System



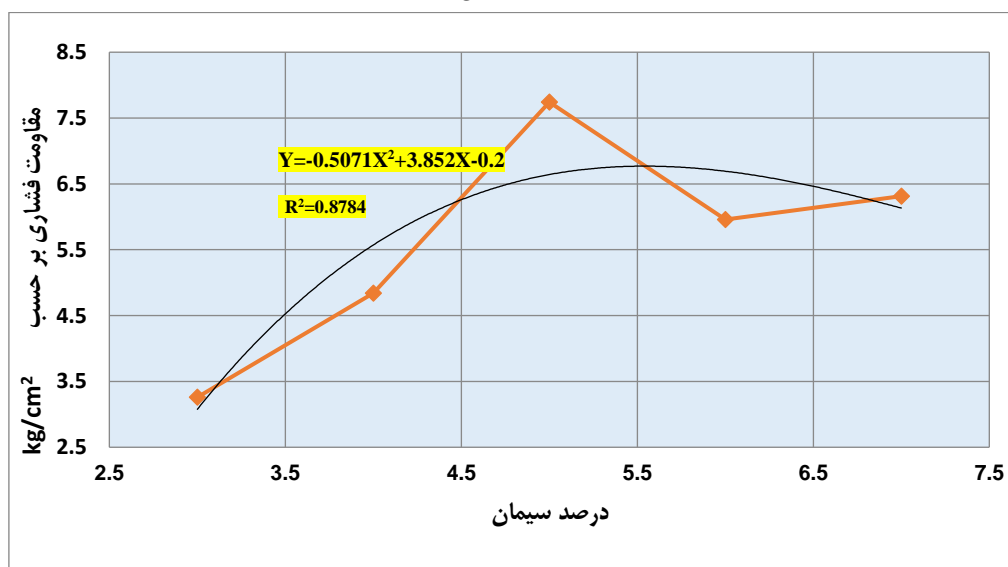
شکل ۳. تصویری از بخشی از نمونه‌های ساخته شده

نتایج آزمایش تک‌محوری روی نمونه‌های ساخته شده با الیاف، درصدهای مختلف قیر و درصدهای مختلف رطوبت در درصد سیمان بهینه، با استفاده از نرم‌افزار D plot به صورت نمودارهای سه‌بعدی ترسیم گردید. همان‌طور که از نمودارها مشخص می‌شود، استفاده از الیاف، همراه با سیمان و قیر امولسیون‌ی، باعث افزایش قابل توجه مقاومت فشاری خاک ماسه روان شده است. مطابق شکل ۴، هنگام استفاده از ۱٪ الیاف، همراه با سیمان و قیر امولسیون‌ی، بیشترین مقاومت فشاری برابر $7/74 \text{ kg/cm}^2$ می‌باشد که به ازای ۱۰٪ قیر امولسیون‌ی و ۵٪ رطوبت به دست آمده است. همان‌گونه که از شکل ۵ مشخص است، به ازای رطوبت ۲/۵ درصد، با ۱۵٪ قیر امولسیون‌ی نیز مقاومت فشاری برابر $7/6 \text{ kg/cm}^2$ به دست می‌آید.

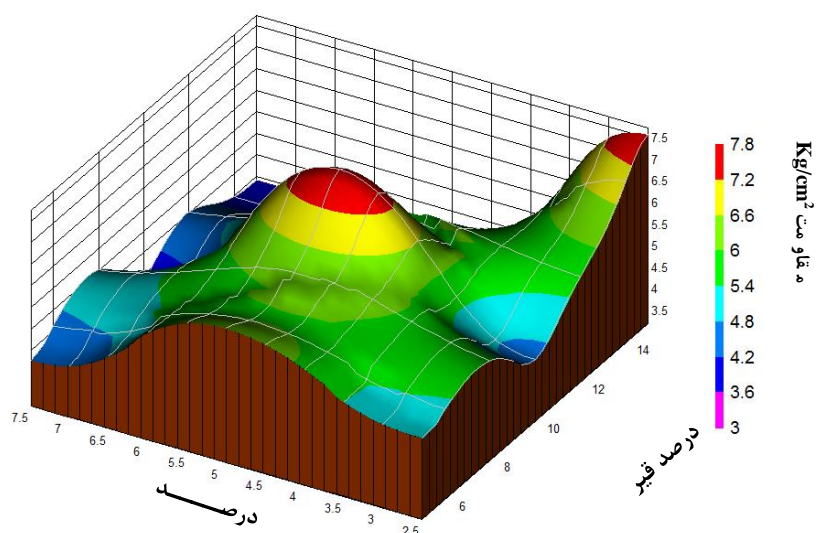
۴. نتایج و بحث

برای یافتن بهترین درصد مقدار سیمان، که بیشترین مقاومت فشاری محدود نشده را ایجاد می‌کند، از آزمایش فشاری محدود نشده مطابق با استاندارد ASTM:D2166-96 استفاده شد. در حین بارگذاری، تغییر شکل اندازه‌گیری و حداکثر تغییر شکل در لحظه شکست به عنوان شکل‌پذیری بستر تثبیت شده محسوب شد. مطابق شکل ۴، به ازای ۱٪ الیاف، میانگین ۵٪ رطوبت، میانگین ۱۰٪ قیر و درصدهای مختلف سیمان، نتایج نشان داد که ۵٪ سیمان بیشترین مقاومت فشاری محدود نشده را ایجاد می‌کند.

۴-۱. نتایج آزمایش مقاومت ماسه تثبیت شده

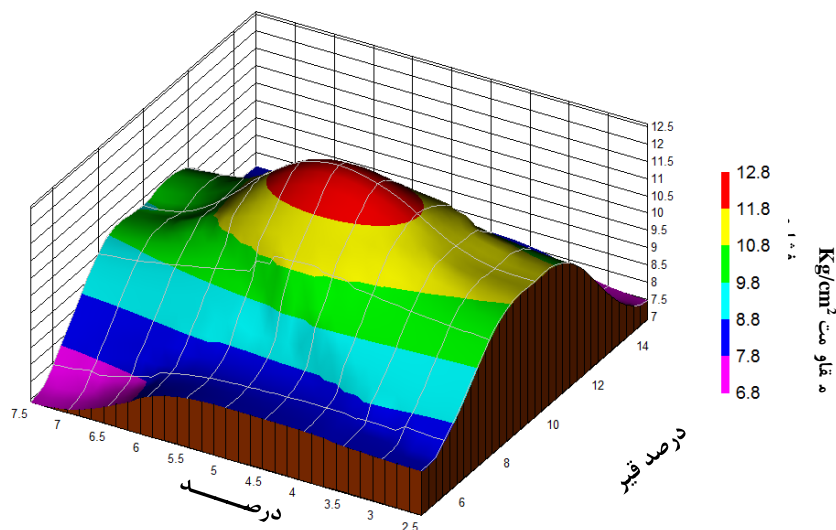


شکل ۴. نمودار تعیین درصد سیمان بهینه



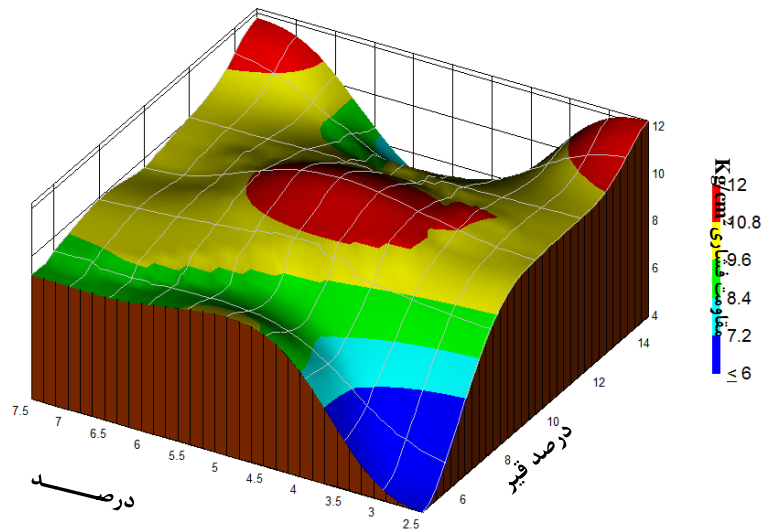
شکل ۵. نمودار مقاومت فشاری برحسب درصد رطوبت و درصد قیر برای ۱٪ الیاف

زمانی که از ۲٪ الیاف، همراه با قیر امولسیون و سیمان، استفاده شد، مطابق شکل ۶، نتایج نشان داد که بیشترین مقاومت فشاری برابر $12/6 \text{ kg/cm}^2$ می‌باشد، که به ازای ۱۰٪ قیر امولسیون و ۵٪ رطوبت حاصل می‌شود.



شکل ۶. نمودار مقاومت فشاری برحسب درصد رطوبت و قیر برای ۲٪ الیاف

مطابق شکل ۷، هنگامی که از ۳٪ الیاف، همراه با قیر امولسیون و سیمان، استفاده شد، بیشترین مقاومت فشاری به ازای ۱۵٪ قیر امولسیون و ۲/۵ درصد رطوبت برابر $12/2 \text{ kg/cm}^2$ به دست آمد.



شکل ۷. نمودار مقاومت فشاری برحسب درصد رطوبت و قیر برای ۳٪ الیاف

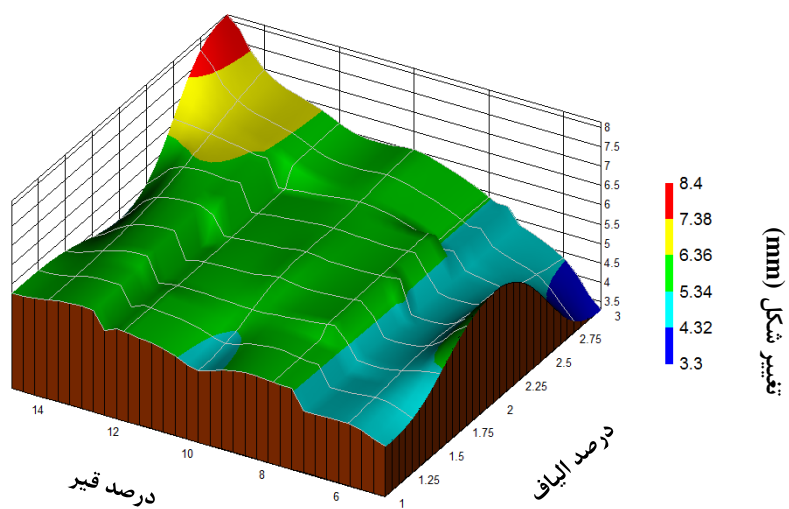
عوامل زیادی بستگی دارد و در محدوده بسیار وسیعی تغییر می‌کند. تغییر شکل پذیری خاک توسط آزمایش‌های مختلف آزمایشگاهی و درجا از جمله آزمایش سه و تک‌محوری، نفوذ استاندارد، مقاومت مخروط و آزمایش بارگذاری صفحه تعیین می‌گردد. در تحقیق حاضر، سعی گردیده که با استفاده از نتایج آزمایش تک‌محوری و اندازه‌گیری تغییر شکل نهایی در لحظه گسیختگی در آزمایشگاه، مقدار تغییر شکل پذیری خاک در آزمایشگاه تعیین گردد.

نتایج اندازه‌گیری تغییر شکل محوری در آزمایش‌های بارگذاری تک‌محوری در شکل‌های ۸ تا ۱۰ نشان می‌دهد که با تغییر درصد الیاف، تغییر محسوسی در تغییر شکل لحظه گسیختگی مصالح تثبیت شده حاصل می‌شود. همچنین، افزایش درصد رطوبت اولیه ماسه روان، حداکثر تغییر شکل در زمان شکست نمونه‌ها را داشته و کرنش گسیختگی نمونه‌ها قدری کاهش یافته است. در یک رطوبت ثابت اولیه اندک، نمونه‌های با درصد قیر بیشتر در لحظه شکست، افت و خیز بیشتری داشته‌اند. با افزودن درصد الیاف به هر نوع خاک، همواره کرنش گسیختگی و مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد.

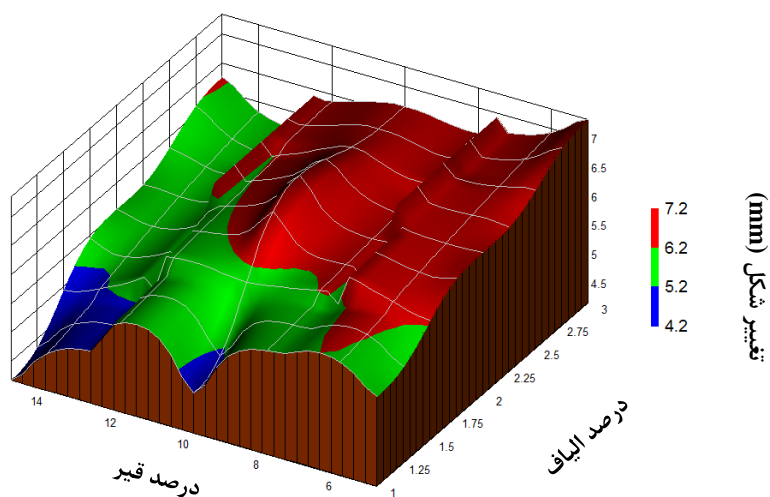
از مقایسه شکل‌های قبیل می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین مقاومت فشاری به ازای ۲٪ الیاف همراه با ۱۰٪ قیر امولسیون‌ی و ۵٪ رطوبت به دست می‌آید. اما با توجه به شکل ۷، نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که به ازای ۳٪ الیاف همراه با درصد‌های مختلف قیر و رطوبت، مقاومت فشاری نمونه‌های ماسه‌ای نسبت به حالتی که از ۱ و ۲ درصد الیاف استفاده شود بیشتر است. به طور کلی، با توجه به نمودارها، با افزایش میزان الیاف و درصد قیر امولسیون‌ی، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است. اما با مقایسه شکل‌های ۶ و ۷ می‌توان نتیجه گرفت که در صورتی که میزان الیاف کم باشد، می‌توان با درصد قیر کمتر و رطوبت بیشتر، به مقاومت فشاری تقریباً برابر با حالتی که میزان الیاف و درصد قیر بیشتر و رطوبت کمتر است رسید.

۲-۴. بررسی شکل‌پذیری ماسه تثبیت شده در نقطه شکست

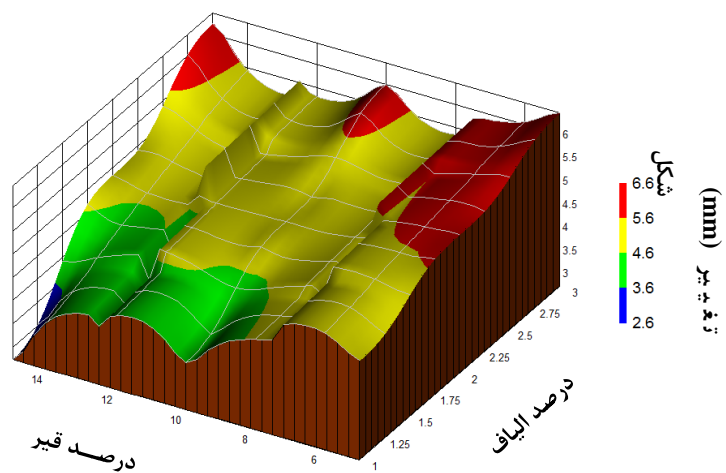
تغییر شکل پذیری خاک، که یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین پارامترهای خاک است، ثابت نیست و به



شکل ۸. نمودار تغییر شکل در نقطه شکست بر حسب درصد الیاف و قیر برای ۲/۵ درصد رطوبت



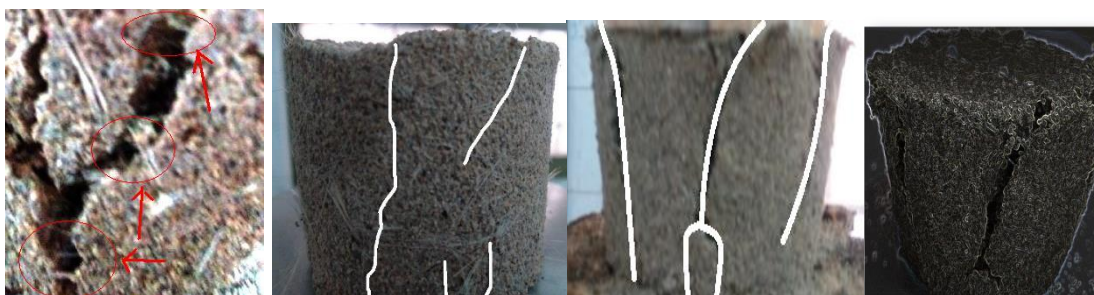
شکل ۹. نمودار تغییر شکل در نقطه شکست بر حسب درصد الیاف و قیر برای ۵٪ رطوبت



شکل ۱۰. نمودار تغییر شکل در نقطه شکست بر حسب درصد الیاف و قیر برای ۷/۵ درصد رطوبت

می‌شود، با افزودن الیاف، که مانند پلهایی کوچک (FBCP)^۱ میان قسمت‌های نمونه مانع از پیشرفت ریزترک‌ها و تبدیل آن‌ها به ترک‌های بزرگ‌تر و گسیختگی نابهنگام نمونه می‌شود. نمونه از لحاظ مقاومت برشی تقویت می‌شود. بارگذاری نمونه توسط دستگاه تک‌محوری تا جایی ادامه می‌یابد که کرنش نمونه از مقدار مجاز بیشتر شده و نمونه لهیده می‌شود. در این تصویر، به دلیل ابعاد کوچک نمونه و همچنین عدم مقاومت اولیه خاک ماسه روان، ترک‌های عمیق بوده و به صورت سطحی گسترده نشده‌اند.

۴-۴. نحوه شکست و گسترش ترک در نمونه‌ها
در شکل‌های ۳ و ۱۱، تصاویر نمونه‌های ساخته شده جهت به دست آوردن مقاومت فشاری تک‌محوری، قبل و بعد از آزمایش، نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، در هنگام رسیدن نمونه به مقاومت نهایی و شکست، به دلیل وجود الیاف، نمونه پس از شکست از هم نمی‌پاشد و الیاف باعث جلوگیری از گسیختگی سریع و نابهنگام نمونه می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۱۱ دیده



شکل ۱۱. نحوه گسترش ترک در نمونه بعد از شکست (سه شکل سمت راست) و پدیده پل شدگی (شکل سمت چپ)

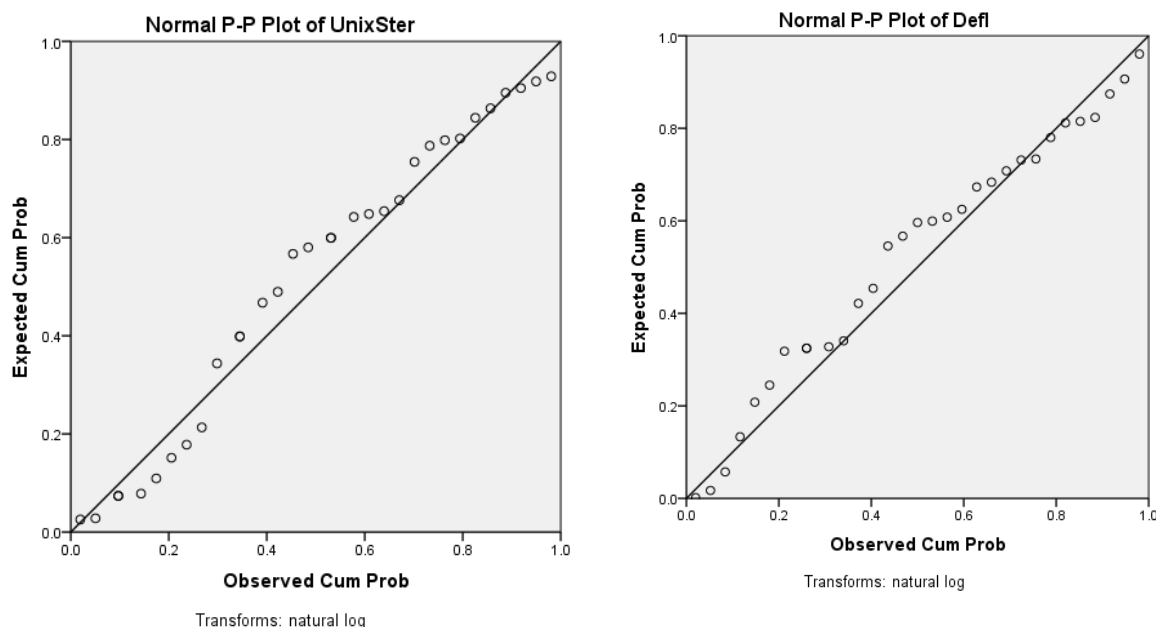
مقادیر مشاهده و نرمال برای متغیرهای آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده، یعنی تغییر شکل نمونه در لحظه گسیختگی و مقاومت فشاری تک‌محوره، به صورت گرافیکی وجود ندارد. همچنین، جدول ۳، مقدار چولگی نتایج آزمایش‌های نمونه‌ها در بازه‌ی (+۲ و -۲) خروجی نرم‌افزار SPSS^۲ را نشان می‌دهد. توزیع متغیر از کشیدگی نرمال برخوردار است و به‌عنوان معیاری از نرمال بودن داده‌ها می‌توان به کاربرد.

۵. تحلیل آماری داده‌ها

به علت محدودیت تعداد خروجی نتایج آزمایشگاهی، تعیین نرمال بودن نتایج حاصل از فرایند آزمایشگاهی یکی از موارد ضروری تحقیقات است. لذا، در این مطالعه، آزمون ترسیمی برای این هدف استفاده شد. همان‌گونه که در شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود، تفاوتی بین

^۲ Statistical package for the social sciences

^۱ Fiber bridging on the crack propagation



شکل ۱۲. رسم نمودار بررسی نرمال بودن داده‌ها برای میانگین دو متغیر وابسته و اندازه‌گیری شده (تغییر شکل و مقاومت فشاری تک‌محوری)

جدول ۳. نتایج آزمون چولگی و کشیدگی داده‌ها توسط آزمون چولگی در نرم‌افزار SPSS

Parameter	N	MinimumMaximum		Mean		Skewness	
		Statistic	Statistic	Statistic	Std. Error	Statistic	Std. Error
FibCon	32	1.0	3.00	1.8437	0.14966	.314	0.414
EmulBit	32	5.0	15.00	10.0000	0.67352	0.000	0.414
WatCont	32	2.5	7.50	5.0000	0.33676	0.000	0.414
UnixSter	32	63.0	247.00	147.7500	9.56936	0.136	0.414
Defl	32	0.0	8.14	5.3647	0.26812	-1.425	0.414
Cementcont	32	3.0	7.00	5.0000	0.10040	0.000	0.414
Valid N (listwise)	32						

شده‌اند. افزودن الیاف باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی کلیه مخلوط‌ها شده و تغییر شکل پذیری نمونه‌ها بیشتر می‌شود. همچنین، این جدول نشان می‌دهد که شکل‌پذیری رابطه معنی‌داری با درصد سیمان به کار رفته در مرحله تثبیت ندارد.

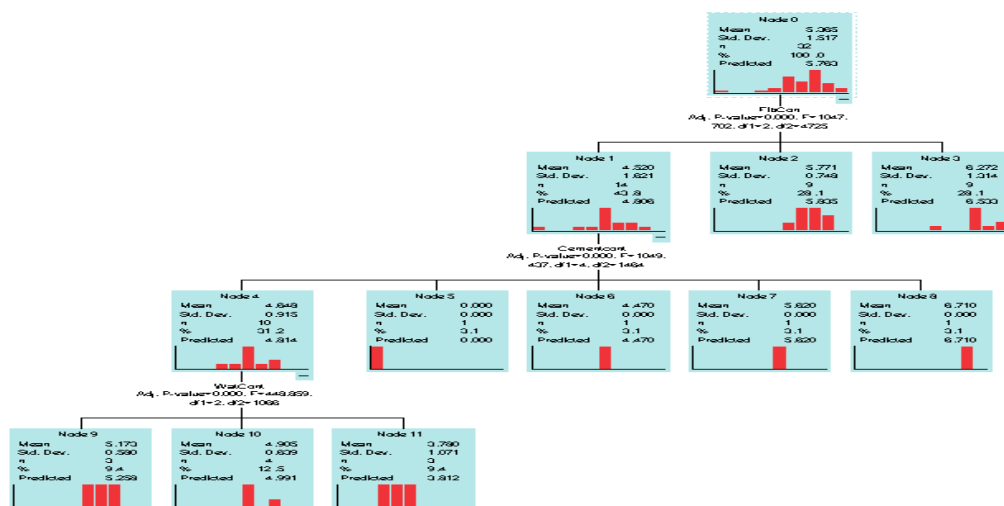
برای تعیین ارتباط بین داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده در این تحقیق به یکدیگر، مقدار همبستگی پیرسون آن‌ها توسط نرم‌افزار آماری SPSS محاسبه گردید. داده‌هایی که به نسبت بیش از ۰/۵ با هم ارتباط برقرار کرده‌اند (به صورت مستقیم) در جدول ۴ آورده

جدول ۴. داده‌های با همبستگی پیرسون معنی‌دار ((Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed))

همبستگی	مشخصات خاک بستر تثبیت شده با الیاف و قیر امولسیون	ردیف
۰/۶۹۷	مقاومت فشاری تک‌محوری (Mpa)	۱
۰/۷۶۴	شکل‌پذیری خاک بستر (mm)	۲
۰/۵۹۰	شکل‌پذیری خاک بستر (mm)	۳
۰/۳۶۹	شکل‌پذیری خاک بستر (mm)	۴

دارند. این شکل همچنین نشان می‌دهد که در یک درصد ثابت سیمان، درصد رطوبت به کار رفته در تثبیت نقش اساسی در تغییر شکل قبل از گسیختگی در نمونه‌ها دارد. در این تقسیم‌بندی، مقاومت فشاری نمونه‌ها به‌عنوان یک متغیر وابسته در نظر گرفته شده و در این درخت گروه‌بندی نقشی ندارد. مشاهده می‌شود که مقدار قیر امولسیون‌ی در این تقسیم‌بندی توسط این تحلیل آماری دخالت داده نشده است. بدین معنی که در تقسیم‌بندی گروه‌ها، نقش آن کمتر از سه متغیر قبلی، یعنی درصد سیمان، الیاف و رطوبت اولیه، است.

با توجه به تعداد حالات مختلف مورد بررسی در این تحقیق، تقسیم‌بندی نتایج آزمایش‌ها به کمک ابزار درخت گروه‌بندی در نرم‌افزار SPSS امکان‌پذیر است. درخت گروه‌بندی و رگرسیون CART^۱ ابزار قوی برای داده‌کاوی می‌باشد. درخت گروه‌بندی نتایج این تحقیق در شکل ۱۳ نمایش داده شده که در آن، با توجه به تغییر شکل قائم در لحظه گسیختگی برای حالات مختلف، بهترین تقسیم‌بندی صورت گرفته است. در گره اول، به‌طور معنی‌داری نتایج عدد تغییر شکل نهایی در نمونه‌های ساخته شده با درصدهای مختلف الیاف، وابستگی بیشتری به درصد الیاف (در سه گروه متفاوت)



شکل ۱۳. گروه‌بندی نتایج تغییر شکل گسیختگی بستر ماسه‌ای تثبیت شده تابع متغیرهای مختلف- مدل خروجی CART

فشاری به ازای ۱۰٪ قیر امولسیون‌ی و ۵٪ رطوبت به دست آمد.
ب- نتایج این پژوهش نشان داد که مقدار تغییر شکل پذیری نمونه‌ها در لحظه گسیختگی به مقاومت فشاری تک‌محوره نمونه‌های ماسه روان تثبیت شده بستگی دارد. هر دوی این‌ها نیز تحت تأثیر مقدار الیاف به کار رفته در فرایند تثبیت با ضریب همبستگی بیش از ۰/۶ وابسته هستند.

۶. نتیجه‌گیری

این تحقیق، تأثیر استفاده از الیاف در بستر ماسه‌های روان تثبیت شده با قیر امولسیون بر مقاومت و شکل‌پذیری، در درصدهای رطوبت اولیه مختلف، مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج زیر حاصل گردید:
الف- با توجه به سطح افزایش زاویه اصطکاک داخلی و تشکیل سنگدانه‌های بزرگتر ناشی از چسبیدن دانه‌های ماسه توسط قیر امولسیون، هنگامی که از ۳٪ الیاف همراه با قیر امولسیون‌ی و سیمان استفاده شد، بیشترین مقاومت

^۱ Classification and regression tree

می‌تواند مورد استفاده مهندسين و محققين قرار گیرد. با توجه به پژوهش انجام شده، از این مواد الیافی می‌توان در بستر راه‌های مناطق کویری و ساحلی استفاده نمود که علاوه بر فواید اقتصادی، بهبود عملکرد و مقاومت و افزایش عمر مفید روسازی را نیز به همراه دارد. موضوعاتی نظیر بررسی استفاده از مصالح بازیافتی همراه با الیاف و یا الیاف بازیافتی صنایع دیگر در تثبیت ماسه‌های روان، می‌تواند مورد توجه سایر محققین قرار گیرد.

ج- افزودن الیاف به خاک موجب کاهش ضریب شکندگی یا افزایش شکل‌پذیری و به عبارتی افزایش شکل‌پذیری در لحظه‌ی گسیختگی می‌شود که برای خاک‌های دارای افزودنی سیمانی که رفتاری ترد دارند بسیار حائز اهمیت است. با افزایش نسبت وزنی الیاف، ضریب شکندگی، یا رفتار ترد نمونه‌ها، کاهش می‌یابد. با توجه به رفتار پیچیده ماسه تثبیت‌شده با قیر امولسیون و نیز شرایط آزمایشگاهی، نتایج به‌دست آمده در محدوده این تحقیق، منطقی به نظر می‌رسد. این نتایج

۷. مراجع

انصاری نیا. "الیاف مسلح کننده آسفالت". شرکت دانش رویان یکتا ماندگار، استان خوزستان. حاجی نیان، ا.، یاری، غ. و کسائیان، ش. ۱۳۹۲. "بررسی اثر ریزدانه بر روی ماسه‌های بادی تثبیت شده با پسماندهای نفتی". اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل. حق شنو، ح. و عربانی، م. ۱۳۸۷. "اثر ضایعات الیاف پلیمری بر خصوصیات مقاومتی ماسه تثبیت شده باسیمان". چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، اردیبهشت ۱۳۸۷. کاووسی، ا. و صائبی، ج. ۱۳۹۵. "تثبیت خاک نامرغوب ساحلی با استفاده از سیمان و الیاف نخل خرما برای بستر روسازی‌ها". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۲(۴): ۷۲-۶۱. کلینسلی، د. ب. ۱۳۸۱. "کویرهای ایران و خصوصیات ژئومورفولوژیکی و پالئوکلیماتولوژی آن". ترجمه عباس پاشایی، سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، تهران.

Abdullah, G. M. S. and Al-Abdul Wahhab, H. I. 2018. "Stabilization of soils with emulsified sulphur asphalt for road applications". Road Mater. Pavement Design, <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1436465>. ASTM C150-07, 2007, "Standard specification for Portland cement". ASTM International, West Conshohocken, PA, DOI: 10.1520/C0150-07. Cough, G. W., Sitar, N., Bachus, R. C. and Red, N. C. 1981. "Cemented sands under static load". J. Geotech. Eng. Div., 107(6): 799-817. Das, R. N., Yen, S., Das, B., Puri, V. and Wright, M. 1994. "Tensile stress-strain characteristics of lightly cemented sand". Geotech. Test. J., 17(3): 305-314. Gregg, J. S., Dehlen, C. L. and Rigden, P. J. 1967. "On the behavior and design of bituminous stabilized sand bases". Proceedings of the 2nd International Conference on Structural Design of Asphalt Pavement, University of Michigan, pp.709-729. Khabiri, M. M. 2006. "Development of a mathematical model for increasing flexible pavement life cycle under preventive maintenance". Ph. D. Dissertation, Iran Science and Technology University, DOI: 10.13140/RG.2.2.23107.71203. Khabiri, M. M. 2011. "The influence of waste carpet on the structural soil characteristics in pavement granular layer". Environ. Asia J., 4(2): 38-42. Liu, J., Feng, Q., Wang, Y., Zhang, D., Wei, J. and Kanungo, D. P. 2018. "Experimental study on unconfined compressive strength of organic polymer reinforced sand". Int. J. Polym. Sci., <https://doi.org/10.1155/2018/3503415>, 18 p. McKesson, C. L. and Mohr, A. W. 1941. "Soil emulsified asphalt and sand emulsified asphalt pavement". Proceeding, Highway Research Board, pp. 500-515.

- Nazarian, S. Tandon, V. Crain, K. and Yuan, D. 2000. "Use of instrumented dynamic cone penetrometer in pavement characterization". In: *Nondestructive Testing of Pavements and Back-calculation of Moduli, Third Volume*, ASTM International.
- Prabaker, J., Dendorkar, N. and Morchhale, R. K. 2001. "Influence of fly ash on strength behavior of typical soils". Structural Engineering Research Center, India.
- Rezaeimalek, S., Jie, H. and Sazzad, B. 2017. "Evaluation of curing method and mix design of a moisture activated polymer for sand stabilization". *Constr. Build. Mater.*, 146: 210-220.
- Santoni, R. L., Tingle, J. S. and Webster, S. L. 2011. "Engineering properties of sandfiber mixtures for road construction". *ASCE, J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 127(3): 258-268.
- Shihata, S. A. and Baghdadi, Z. A. 2001. "Simplified method to assess freeze-thaw durability of soil cement". *J. Mater. Civ. Eng.*, 13(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2001\)13:4\(243\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:4(243)).
- Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F. and Cai, Y. 2017. "Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil". *Geotext. Geomembranes*, 25: 194 -202.
- Yong, R. N., Mohammed, L. F., Mohamed, A. M., O'Shay, T. A. and Hoddinott, K. B. 1994. "Retention and transport of oil residue in a loamy soil". In: *Analysis of Soils Contaminated with Petroleum Constituent*, Philadelphia, pp. 89-101.