

The effect of hemp fibers on unconfined compressive strength and direct shear parameters of sand improved with cement, zeolite

Iman Mirzadeh¹, Reza Shirinabadi^{2*}, ghodrattollah Mihamadi², Seyed Hamid Lajevardi³

1- PhD student, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Petroleum and Mining Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

ABSTRACT

One of the essential difficulties in the field of foundation construction in construction projects is the low resistance of the subsoil, the presence of voids, and the presence of water in these holes in an undesirable amount, and this is the problem in the soil of the coastal area, which is more of the type of windy sand or loose sand. and is saturated; It causes many problems for engineers. Various methods are used in soil improvement according to the project's economic, operational, and environmental conditions. Considering the high adaptability of the chemical stabilization method to the different conditions governing the projects, it is considered one of the most common ways of soil improvement. Using chemical additives such as cement is one of the most common methods of improving soil engineering properties, which geotechnical engineers often use. On the other hand, the production of this highly consumed substance causes the release of 8% of the carbon dioxide entering the atmosphere in human activities. Therefore, considering an approach to reduce cement consumption is considered essential. One of the ways to reduce cement consumption in the stabilization method is to use natural pozzolanic materials such as zeolite So that part of the cement can be replaced with these materials. Therefore, adding natural fibers such as hemp can be a suitable choice to solve this problem of chemical stabilization of soils. This research investigated the direct shear behavior of improved samples after conducting unconfined compressive strength tests to achieve the optimal percentage of sand, cement, zeolite, and hemp fiber compounds and, according to the results, adding 1% of hemp fibers with a length of 1 cm results in the best resistance properties in the stabilized samples. The highest resistance was achieved in the sample with 8% cement and replacing 30% cement with zeolite.

ARTICLE INFO

Receive Date: 05 February 2024

Revise Date: 08 December 2024

Accept Date: 16 March 2024

Keywords:

*hemp fibers
unconfined compressive
strength
zeolite
cement
sand Soil*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.433729.3321>

*Corresponding author: Reza Shirinabadi
Email address: r_shirinabadi@azad.ac.ir

تاثیر الیاف کنف بر مقاومت فشاری محصورنشده و پارامترهای برشی مستقیم نمونه‌های

ماسه‌ای بهبودیافته با سیمان، ژئولیت

ایمان میرزاده^۱، رضا شیرین‌آبادی^{۲*}، قدرت‌اله محمدی^۳، و سید حمید لاجوردی^۴

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران و مرکز تحقیقات مدلسازی و بهینه‌سازی در علوم و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی نفت و معدن، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۴- دانشیار گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

چکیده

از مهمترین دشواری‌ها در زمینه پی‌سازی در پروژه‌های عمرانی مقاومت کم خاک بستر، وجود خلل و فرج و حضور آب در این حفرات به مقدار نامطلوب است و این مساله در خاک منطقه ساحلی که بیشتر از نوع ماسه بادی یا ماسه شل و اشیاع است؛ مشکلات زیادی را برای مهندسان به وجود می‌آورد. در بهسازی خاک‌ها، روش‌های متنوعی وجود دارد که با توجه به شرایط اقتصادی، اجرایی و زیست‌محیطی پروژه‌ها، مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به انطباق‌پذیری زیاد روش تثبیت شیمیایی با شرایط مختلف حاکم بر پروژه‌ها، یکی از رایج‌ترین راه‌های بهسازی خاک‌ها تلقی می‌گردد. به‌کارگیری افزودنی‌های شیمیایی مانند سیمان از رایج‌ترین روش‌های بهبود خصوصیات مهندسی خاک است که به فراوانی مورد استفاده مهندسان ژئوتکنیک قرار می‌گیرد. از سوی دیگر، تولید این ماده‌ی پرمصرف موجب انتشار ۸ درصد از دی‌اکسید کربن ورودی به جو زمین در بخش فعالیت‌های انسانی می‌شود. بنابراین، در نظر گرفتن رویکردی برای کاهش مصرف سیمان امری ضروری تلقی می‌شود. یکی از راه‌های کاهش مصرف سیمان در روش تثبیت، استفاده از مواد پوزولانی طبیعی مانند ژئولیت بوده؛ به طوری که بخشی از سیمان را می‌توان با این مواد جایگزین نمود. از طرفی، افزودن مواد پوزولانی به خاک علاوه بر ارتقاء بسیاری از خواص مقاومتی، موجب بروز رفتار ترد و شکننده در هنگام گسیختگی هنگام بارگذاری در نمونه‌های تثبیت‌شده می‌گردند. بنابراین، افزودن الیاف طبیعی مانند کنف می‌تواند انتخاب مناسبی جهت برطرف کردن این مشکل روش تثبیت شیمیایی خاک-ها باشد. در این پژوهش پس از انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری محصورنشده برای دست‌یابی به درصد بهینه ترکیبات ماسه، سیمان، ژئولیت و الیاف کنف، به بررسی رفتار برشی مستقیم نمونه‌های بهسازی شده پرداخته شد. با توجه به نتایج می‌توان بیان نمود که افزودن ۱٪ الیاف کنف با طول ۱ سانتی‌متر موجب حاصل‌شدن بهترین خواص مقاومتی در نمونه‌های تثبیت‌شده می‌گردد. بیشترین مقاومت در نمونه با ۸٪ سیمان و جایگزینی ۳۰٪ سیمان با ژئولیت حاصل گردید.

کلمات کلیدی: الیاف کنف، مقاومت فشاری نامحدود، ژئولیت، سیمان، خاک ماسه ای.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.433729.3321	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2024.433729.3321	۱۴۰۳/۰۹/۳۰	۱۴۰۳/۱۲/۲۶	۱۴۰۳/۱۲/۲۶	۱۴۰۲/۱۲/۲۰	۱۴۰۲/۱۱/۱۶
نویسنده مسئول:			رضا شیرین‌آبادی			
پست الکترونیکی:			R_Shirinabadi@azad.ac.ir			

۱- مقدمه

با توسعه صنایع و شهرنشینی و افزایش روزافزون جمعیت، کمبود زمین مناسب برای احداث سازه مورد توجه قرار گرفته است. در بسیاری از موارد انسان مجبور به ساخت سازه بر زمین‌های با کیفیت کمتر از جنبه مهندسی ژئوتکنیک بوده است [۱]. وجود خاک ماسه‌ای در پروژه‌های عمرانی موجب ایجاد مشکلات فراوانی می‌گردد. مقاومت پایین و ناپایداری حجمی از جمله خصوصیات ماسه‌های شل و اشباع می‌باشند که سبب به وجود آمدن مشکلاتی نظیر نشست‌های نامتقارن، مقاومت برشی ضعیف، تراکم‌پذیری بالا و شکست سازه می‌شوند [۲]. در پروژه‌های ساختمانی، جایگزینی مصالح با کیفیت بهتر به جای خاک نامرغوب محل، به عنوان یک روش قدیمی برای دستیابی به ویژگی‌های مهندسی موردنظر، سبب بروز مشکلات اقتصادی و محیط‌زیستی فراوانی می‌گردد. به عنوان مثال، در پروژه‌های راه‌سازی، در صورت فاصله‌ی زیاد حمل قرضه تا محل پروژه، به کارگیری از مصالح با کیفیت بالا و یا تعویض خاک محل باعث بالا رفتن هزینه‌های اقتصادی می‌گردد و حتی سبب ایجاد دست‌خوردگی زیادی در طبیعت نیز می‌شود. در پروژه‌های درون‌شهری مانند پروژه‌های ساختمانی نیز احداث سازه بر روی زمین با ظرفیت باربری کم، منجر به استفاده از پی‌های عمیق و گسترده می‌شود که صرفه‌ی اقتصادی خاک‌های ماسه‌ای (به ویژه ماسه بادی) از جمله خاک‌هایی هستند که از لحاظ فراوانی در بخش‌های مختلف ایران و سایر نقاط جهان، از جمله کشورهای حوزه خلیج فارس، دارای اهمیت می‌باشند. به همین دلیل در اجرای بسیاری از پروژه‌های عمرانی به خصوص راهسازی مواجهه با این خاک‌ها امری اجتناب ناپذیر است.

با توجه به موارد گفته شده، استفاده از افزودنی‌ها جهت تثبیت خاک، همواره به عنوان یک گزینه‌ی مناسب و اقتصادی مطرح بوده است. تثبیت خاک با استفاده از مواد افزودنی، یکی از قدیمی‌ترین روش‌های بهسازی خاک می‌باشد که سبب بهبود و کنترل پایداری حجم (کنترل تورم و انقباض)، مقاومت، نفوذپذیری خاک و تغییر خصوصیات تنش- کرنش خاک می‌گردد. به صورت کلی، تثبیت خاک با افزودنی‌هایی مانند سیمان و آهک به عنوان روش شیمیایی می‌باشد که خواص فیزیکی خاک را با کاهش خلل و فرج بین دانه‌های خاک تغییر می‌دهد. در ادامه، افزودن المان‌های گسسته با توزیع تصادفی یا جهت‌دار مانند الیاف را تسلیح خاک با الیاف می‌گویند. استفاده‌ی الیاف به دو صورت است که یا الیاف به صورت تصادفی در ماتریسی همانند زمین مخلوط می‌شوند و یا به صورت استفاده از الیاف جهت‌دار همچون خانواده‌ی ژئوسینتتیک‌ها است [۳،۴]. تغییرات خصوصیات مکانیکی و مقاومتی خاک ماسه‌ای تثبیت‌شده با سیمان توسط پژوهشگران زیادی بررسی شده است. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که افزودن سیمان به خاک باعث بهبود خواص مقاومتی می‌گردد [۵].

تولید حدود ۷ درصد CO_2 حاصل از فعالیت بشر ناشی از فرآیند تولید سیمان بوده که این مقدار به حدود یک تن در روز می‌رسد [۶]. از طرف دیگر، مصرف سیمان موجب افزایش رفتار ترد خاک و همچنین سبب گسیختگی ترد می‌شود. از این رو، جایگزینی بخشی از سیمان با موادی که مشکلات زیست‌محیطی کمتری دارند، می‌تواند بر کاهش اثر منفی استفاده از سیمان بسیار تأثیرگذار باشد [۷]. پوزولان‌ها ترکیبات سیلیسی و یا آلومینو-سیلیسی هستند که به‌تنهایی بدون چسبندگی یا دارای خاصیت چسبندگی پایین می‌باشند؛ اما طی واکنشی با هیدروکسید کلسیم و در حضور آب، فرآورده‌های چسباننده‌ی سیمانی تولید می‌کنند. پوزولان‌های طبیعی، میکروسیلیس، متاکاولین، خاکستر بادی، زئولیت، خاکسترهای ضایعات کشاورزی و صنعتی مانند سربراه‌ی صنایع تولید فلزات، خاکستر پوسته‌ی برنج، خاکستر ساقه نیشکر، خاکستر ذرت به‌عنوان رایج‌ترین مواد پوزولانی مورد استفاده شناخته می‌شوند. کلسیم هیدروکسید حاصل از فرآیند هیدراتاسیون، سبب افزایش PH آب حفره‌ای در خاک تثبیت‌شده شده و تولید آهک هیدراته می‌نماید. این محلول، باعث حل شدن سیلیکاها و آلومیناهای موجود در پوزولان می‌گردد. سپس این مواد حل‌شده با یون‌های کلسیم واکنش می‌دهند که به آن واکنش پوزولانی می‌گویند [۸-۱۳]. یکی از انواع پوزولان‌ها زئولیت بوده که خواص و تأثیرات آن بر خصوصیات خاک‌ها توسط پژوهشگران مختلفی بررسی شده [۱۳،۱۴].

مقاومت کششی بسیار ناچیز خاک یکی از نقاط ضعف آن به شمار می‌رود. هدف از تسلیح خاک با الیاف (مصنوعی و طبیعی)، کاهش میزان این ضعف می‌باشد؛ تا در نهایت مصالحی حاصل شود که از مقاومت فشاری و کششی مناسبی برخوردار باشد [۳،۴]. استفاده از الیاف در

خاک، سبب کاهش رفتار ترد حاصل از حضور موادی همچون سیمان می‌گردد [۷]. بهبود قابل ملاحظه در مقاومت، ظرفیت باربری، پتانسیل شکل‌پذیری و تغییرات حجم ماتریس خاک را می‌توان در خاک‌های مسلح‌شده با الیاف مشاهده نمود.

تا به امروز الیاف مختلفی از جمله از نوع طبیعی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. قوامی و همکاران با آزمایش‌های مختلف تأثیر حضور الیاف طبیعی نارگیل و گیاه سیسال را بر ویژگی‌های مکانیکی سه نوع خاک بررسی نمودند. نتایج نشان داد که مقدار نسبت بهینه آب به خاک جهت تولید یک مخلوط خاک با مقاومت بالا، برابر ۲۸ درصد است. در این شرایط افزودن ۴ درصد الیاف سیسال و یا نارگیل باعث بالارفتن قابل ملاحظه انعطاف‌پذیری و افزایش جزئی در مقاومت فشاری می‌گردد [۱۵].

محمد در سال ۲۰۱۳ تغییرات برخی خواص مکانیکی خاک رسی متورم شونده را هنگام افزودن الیاف یونجه با توزیع تصادفی بررسی نمود. از این‌رو، نمونه‌هایی از خاک رس حاوی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد الیاف یونجه با استفاده از درصد رطوبت بهینه و چگالی خاک خشک بیشینه ساخته گردید و آزمایش‌های حدود اتربرگ و انقباض، تورم آزاد، UCS، کشش برزیلی و برش مستقیم بر آن‌ها انجام شد. نتایج نشان دادند که افزودن این الیاف تغییر مشهودی در حدود اتربرگ نمونه‌ها ایجاد نمی‌کند. اما، افزودن تا ۱ درصد الیاف موجب کم‌شدن چگالی خاک خشک بیشینه و درصد رطوبت بهینه گردید. برای مقدار بیشتر این الیاف، پارامترهای مذکور روند افزایشی از خود نشان دادند. افزودن الیاف موجب کاهش UCS نمونه‌ها شد؛ اگرچه افزایش الیاف تا ۱ درصد باعث افزایش ۲۰ درصدی مقاومت برشی و ۳۰ درصدی مقاومت کششی نمونه‌ها گردید [۱۶]. تنگ و همکارانش در سال ۲۰۱۶ با استفاده از آزمایش بیرون‌کشش الیاف منفرد رفتار مکانیکی بین‌سطحی الیاف صاف و موج‌دار با ماتریس خاک را مورد بررسی قرار دادند. همچنین رفتار الیاف در ماتریس تحت تأثیر تغییرات رطوبت و چگالی خشک خاک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نمودارهای تنش-کرنش الیاف صاف دارای یک پیک بوده درحالی که در نمونه‌های با الیاف موج‌دار دارای پیک‌های متعددی بودند. همچنین الیاف موج‌دار مقاومت بین‌سطحی بیشینه بالاتری در مقایسه با الیاف صاف در ماتریس خاک از خود نمایش دادند. در ادامه آن‌ها بیان نمودند که مقاومت بین‌سطحی الیاف و ماتریس خاک با کاهش رطوبت نمونه به‌صورت خطی و با افزایش چگالی نمونه به‌صورت نمایی مرتبط است [۱۷].

ترن و همکارانش در سال ۲۰۱۸ امکان بهبود خواص مکانیکی خاک سیلت تثبیت‌شده با سیمان را به‌وسیله‌ی افزودن الیاف ابریشمی خوشه‌درت بررسی نمودند. نمونه‌هایی حاوی الیاف با مقدار ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد و سیمان به مقدار ۴، ۸ و ۱۲ درصد برای انجام آزمایش‌ها ساخته شده و برای مدت زمان ۷، ۱۴ و ۲۸ روز تحت عمل‌آوری قرار گرفتند. آن‌ها مشاهده کردند که افزودن الیاف سبب بهبود مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها به ترتیب به مقدار ۱۷۷ و ۸۸ درصد شد. همچنین، مقدار ۰/۲۵ تا ۰/۵ درصد الیاف برای استفاده در ترکیبات خاک و سیمان پیشنهاد گردید [۱۸].

لیو و همکارانش در سال ۲۰۲۰ آزمایش‌هایی را جهت بررسی تأثیر الیاف کتان بر خاک رس تحت چرخه‌های یخبندان-ذوب انجام دادند. انجام آزمایش UCS در چرخه‌های ۰، ۳، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ نشان داد که وجود الیاف موجب ارتقاء مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های غیرمسلح به الیاف گردید. کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری نسبت به تعداد چرخه‌های یخبندان-ذوب رفتاری نمایی از خود نشان داد. آن‌ها با توجه نتایج آزمایش بیرون‌کشش الیاف منفرد دریافتند که کم‌شدن مقاومت بین‌سطحی الیاف و ماتریس خاک عامل قابل توجهی در کاهش مقاومت فشاری خاک مسلح می‌باشد. مقایسه‌ی مقاومت فشاری نمونه‌ها و مقاومت بیشینه‌ی بین‌سطحی الیاف و ماتریس خاک نشان داد که هر دو مقاومت با روندی نمایی نسبت به چرخه‌های یخبندان-ذوب کاهش می‌یابند. اگرچه روند کاهش شدیدتری در مقاومت بیشینه‌ی بین‌سطحی الیاف و ماتریس خاک مشاهده گردید [۱۹].

هدف این پژوهش، ارزیابی اثر ماسه تثبیت‌شده با سیمان و جایگزینی ژئولیت همراه با افزودن الیاف کنف بر رفتار مقاومتی خاک می‌باشد. به این منظور آزمایش‌های مقاومت فشاری محصورنشده و برش مستقیم جهت بررسی خصوصیات مکانیکی و مقاومتی خاک انجام گردیده است.

۲- مواد و روش‌ها و مصالح مورد استفاده

خاک پایه در این تحقیق، ماسه بوده که از ساحل دریای خزر در منطقه بندر انزلی تهیه شده است. آزمایش دانه‌بندی بر روی این خاک با استفاده از الک مطابق با استاندارد ASTM D 4۲۲ [۲۰] انجام شد و این ماسه براساس سیستم طبقه‌بندی یونیفاید (UCSC) در رده‌ی SP قرار گرفت. برخی از ویژگی‌های فیزیکی ماسه دانه‌بندی شده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: ویژگی‌های فیزیکی ماسه مورد استفاده در تحقیق

γ_{dmin} (g/cm ³)	γ_{dmax} (g/cm ³)	D _{۱۰} (mm)	D _{۵۰} (mm)	D _{۳۰} (mm)	D _{۶۰} (mm)	Cu	Cc
۱/۲۷	۱/۵۸	۰/۴۴	۱/۷	۰/۹۷	۲/۱۸	۴/۹۹	۰/۹۹

از سیمان پرتلند تیپ دو در ساخت نمونه‌های این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. سیمان مذکور دارای وزن مخصوصی برابر ۳g/cm^۳ و ۳/۰۸ و زمان گیرش اولیه و نهایی آن به ترتیب ۱۲۰ و ۱۹۰ دقیقه است. برخی از مشخصات سیمان پرتلند تیپ دو در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به نتایج تحقیقات پیشین، مقدار سیمان در نظر گرفته شده جهت آزمایش در این تحقیق، ۸ درصد وزنی خاک خشک می‌باشد [۲۱].

جدول ۲: مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان مورد استفاده

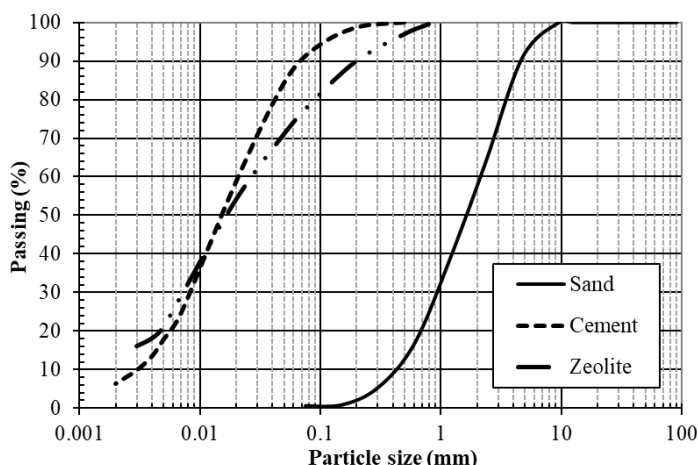
خصوصیات شیمیایی		خصوصیات فیزیکی	
درصد وزنی	اکسید موجود	۲۹۰۰	نرمی بلین (g/cm ^۳)
۰/۱۵	O _۲ Na	اولیه	زمان گیرش (دقیقه)
۴/۷۷	۳O _۲ Al	۱۲۰	نهایی
۲۲/۳	۲SiO	۱۹۰	۷ روزه
۲/۵	۳SO	۳۰ <	مقاومت فشاری (MPa)
۰/۴۵	O _۲ K	۳۸ <	۲۸ روزه
۶۶/۹	CaO		انبساط اتوکلاو (%)
۳/۶۷	۳O _۲ Fe		۰/۰۵
۴/۵	MgO		
۰/۷۸	LOI		

زئولیت ماده‌ای معدنی و جامدی بلورین است که با توجه به دارا بودن مواد سیلیسی یا سیلیسی-آلومینیومی خواص پوزولانی اعمال می‌کند. زئولیتی که در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفته از نوع کلیپوتیلولیت می‌باشد که زئولیتی طبیعی است. مشخصات زئولیت مورد استفاده در جدول ۳ ارائه شده است.

با توجه به جدول ۳، مقدار بالای LOI می‌تواند مربوط به سطح مخصوص بالای زئولیت و در نتیجه زیاد بودن قدرت جذب آب سطحی باشد. همچنین همانطور که مشاهده می‌شود مقدار درصد O_۲Na در زئولیت بیشتر از درصد O_۲K است که ترکیب شیمیایی و شرایط تشکیل زئولیت در منشا دلیل آن می‌باشد. در این پژوهش جهت بررسی تاثیر زئولیت، مقادیر ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد وزنی سیمان با زئولیت جایگزین می‌گردد.

جدول ۳: مشخصات شیمیایی زئولیت طبیعی مورد استفاده در تحقیق

ترکیب شیمیایی	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	S	*LOI
درصد	۶۸/۳	۱۱/۳	۰/۹	۱/۵۲	۰/۸۸	۲/۹۴	۱/۷	۰/۵۱	۱۲/۶



شکل ۱: منحنی دانه بندی ماسه، سیمان و زئولیت مورد استفاده در پژوهش

جهت تسلیح نمونه‌ها الیاف طبیعی بازیافتی کنف به کار گرفته شده است که دلیل آن دسترسی آسان، صرفه اقتصادی، مقاومت کششی مناسب و همچنین نوآوری در استفاده از این الیاف می‌باشد. این الیاف به طور وسیع در شمال ایران یافت می‌شود که غالباً در تولید پارچه کفنی و گونی، پوشاک، فرش و زیرفرشی از آنها استفاده می‌گردد. از جمله کاربردهای نوین الیاف کنف می‌توان به استفاده از آنها در کامپوزیت‌ها و ژئوتکستایل‌ها در جلوگیری از فرسایش خاک و لغزش اشاره نمود. این الیاف حاوی ۱۷ درصد لیگنین، حدود ۴۵ تا ۵۷ درصد سلولز و ۷ تا ۱۰ درصد آب می‌باشد (اخوت، ۱۳۸۸). مقاومت کششی کنف حدود ۶۰ تا ۷۰ مگاپاسکال بوده که نسبت به الیاف مصنوعی مقدار کمتری است اما سازگار با محیط زیست می‌باشد [۲۲].

در این پژوهش، الیاف بازیافتی کنف در سه درصد وزنی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزن خشک خاک و در سه طول مختلف ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر به منظور بررسی خصوصیات مکانیکی و مقاومتی خاک تثبیت شده با سیمان و زئولیت در نظر گرفته شد. برای ساخت نمونه‌ها ابتدا نمونه ماسه جمع‌آوری شده به مدت ۲۴ ساعت داخل گرمخانه با دمای 110 ± 5 قرار گرفته تا کاملاً خشک شوند و سپس درصد رطوبت بهینه‌ی حاصل از آزمایش تراکم هر ترکیب خاک و افزودنی، به آن افزوده می‌شود. این امر به این دلیل است که رطوبت ذاتی خاک در حین عملیات برداشت و جابجایی از محل اصلی خود تا آزمایشگاه دستخوش تغییر می‌گردد. پس از اختلاط همگن ترکیبات خاک و افزودنی‌ها، نمونه‌های ساخته شده جهت عمل‌آوری در کیسه‌های پلاستیکی سربسته و در دمای اتاق قرار داده می‌شوند. همچنین محیط اطراف نمونه همواره مرطوب نگه داشته می‌شود تا از کاهش رطوبت لازم (درصد رطوبت بهینه) جهت انجام هیدراتاسیون و واکنس پوزولانی جلوگیری شود.

*Loss on Ignition

۳- روش انجام آزمایش‌ها

در ابتدا برای تعیین درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک بیشینه، آزمایش تراکم به روش پروکتور استاندارد بر روی نمونه‌های خاک ماسه‌ای با درصد‌های مختلف افزودنی مطابق با استاندارد ASTM D 698-12 [۲۳] انجام شد که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. برای انجام این آزمایش، ابتدا ۴ کیلوگرم ماسه با مقدار مشخصی آب مخلوط شده و در سه لایه با ارتفاع برابر داخل قالب استوانه‌ای فلزی تراکم با قطر مشخص ۴ اینچ و ارتفاع ۴/۶ اینچ ریخته شده و هر لایه توسط چکش استاندارد به وزن ۵/۵ پوند که از ارتفاع ۱۲ اینچ سقوط می‌کند با ۲۵ ضربه متراکم می‌شود. این رویه برای هر ترکیب خاک و افزودنی، برای ۵ درصد رطوبت متفاوت تکرار شد و در نهایتاً نمودار تراکم خاک ترسیم گردید.

جدول ۴: مقادیر چگالی خشکی بیشینه ترکیب‌های مورد آزمایش

F.C (%)	F.L (mm))MDD (kN/m ³)					
		%C	۸				
		%Z	۰	۱۰	۳۰	۵۰	
۰	۰	۱۵/۷	۱۷۴	۱۷/۱	۱۶/۸	۱۶/۴	
	۵	۱۵/۵	۱۷/۲	۱۶/۸	۱۶/۶	۱۶/۱	
	۰/۵	۱۰	۱۵/۴	۱۷	۱۶/۷	۱۶/۵	۱۵/۸
		۱۵	۱۵/۱	۱۶/۷	۱۶/۵	۱۶/۳	۱۵/۷
۱	۵	۱۵/۳	۱۶/۸	۱۶/۲	۱۵/۹	۱۵/۵	
	۱۰	۱۵/۱	۱۶/۵	۱۶/۱	۱۵/۷	۱۵/۲	
		۱۵	۱۴/۸	۱۶/۴	۱۵/۸	۱۵/۴	۱۵/۱
	۱/۵	۵	۱۴/۶	۱۶/۲	۱۵/۷	۱۵/۱	۱۴/۸
۱۰		۱۴/۴	۱۶	۱۵/۵	۱۴/۸	۱۴/۵	
		۱۵	۱۴/۱	۱۵/۸	۱۵/۳	۱۴/۶	۱۴/۳

جدول ۵: مقادیر درصد رطوبت بهینه ترکیب‌های مورد آزمایش

F.C (%)	F.L (mm)	OMC (%)					
		%C	۸				
		%Z	۰	۱۰	۳۰	۵۰	
۰	۰	۱۴/۶	۱۲/۹	۱۲/۵	۱۲/۱	۱۱/۸	
	۵	۱۵	۱۳/۶	۱۳/۳	۱۲/۹	۱۲/۶	
	۰/۵	۱۰	۱۴/۸	۱۳/۴	۱۳/۲	۱۲/۷	۱۲/۴
		۱۵	۱۴/۷	۱۳/۳	۱۲/۹	۱۲/۶	۱۲/۲
۱	۵	۱۵/۴	۱۳/۷	۱۳/۶	۱۳/۲	۱۲/۹	
	۱۰	۱۵	۱۳/۶	۱۳/۴	۱۲/۹	۱۲/۶	
		۱۵	۱۵	۱۳/۴	۱۳/۳	۱۲/۸	۱۲/۵
	۱/۵	۵	۱۵/۸	۱۴	۱۳/۸	۱۳/۶	۱۳/۳
۱۰		۱۵/۶	۱۳/۸	۱۳/۷	۱۳/۵	۱۳/۱	
		۱۵	۱۵/۴	۱۳/۷	۱۳/۵	۱۳/۲	۱۲/۹

مقاومت فشاری تک محوری هر نمونه مطابق با استاندارد ASTM D ۲۱۶۶-۱۶ [۲۴] برابر با بیشینه نیروی قائم وارد بر واحد سطح به هنگام گسیختگی نمونه در شرایط غیرمحصور و یا برابر با بیشینه نیروی قائم واحد بر سطح در کرنش محوری ۱۵ درصد می‌باشد. ساخت نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM D ۱۶۳۲ [۲۵] انجام شده است. ساخت نمونه‌ها در درصد رطوبت بهینه و در قالب‌های استوانه‌ای با قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر در سه لایه انجام شد. لازم به ذکر است که لایه‌های خاک با به‌کارگیری یک میله با انتهای مدور و با وارد کردن ضربات با نیروی کم و به صورت پیوسته متراکم شدند تا از به وجود آمدن حفرات در خاک جلوگیری شده و مقدار مشخص شده از ترکیب خاک و افزودنی‌ها، درون قالب جای گردد [۲۵]. پیش از ساخت نمونه‌ها، به دقت سطح داخلی قالب‌های استوانه‌ای روغن‌کاری شد تا نمونه‌های ساخته‌شده به آسانی و بدون آسیب از قالب خارج گردند. در این آزمایش، نمونه در داخل دستگاه بارگذاری و در مرکز صفحه بارگذاری قرار گرفت. سپس صفحه بالایی دستگاه بدون اعمال نیرو بر روی سطح نمونه مماس شد. مطابق با استاندارد سرعت بارگذاری در حدود ۰/۵ تا ۲ درصد کرنش محوری بر دقیقه در نظر گرفته و تغییرات بار وارده بر نمونه در بازه‌های زمانی مشخص یادداشت گردید. بارگذاری تا جایی ادامه پیدا کرد که با کم شدن بار، کرنش اضافه شود و یا ۱۵٪ کرنش در نمونه ایجاد گردد [۲۴]. مقاومت داخلی خاک در واحد سطح را مقاومت برشی خاک می‌گویند. به عبارت دیگر، مقاومتی را می‌گویند که خاک می‌تواند برای تاب آوردن در برابر گسیختگی و لغزش در امتداد هر صفحه‌ی دلخواه تحمل کند. آزمایش برش مستقیم غالباً برای بررسی لغزش و پایداری شیروانی‌ها، تعیین مقاومت برشی قرضه مصالح، دیوارهای حائل، احداث تونل، بررسی پدیده‌هایی همچون شکست‌های هیدرولیکی و روانگرایی و همچنین طراحی و تعیین ظرفیت باربری فونداسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمایش با استفاده از مدل موهر-کولمب، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک را تعیین می‌کند [۲۶]. ابعاد نمونه در این آزمایش ۱۰ در ۱۰ در ۲ سانتی‌متر می‌باشد که نمونه داخل قالب فلزی مربعی خاک در سه لایه مساوی با استفاده از چکش مخصوص متراکم می‌گردد. با توجه به استاندارد ASTM D ۳۰۸۰-۱۱ پس از اعمال تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال به نمونه، به نمونه نیروی افقی اعمال می‌گردد. سرعت آزمایش ۱ میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد [۲۶].

۴- نتایج آزمایش‌ها

۴-۱- آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده

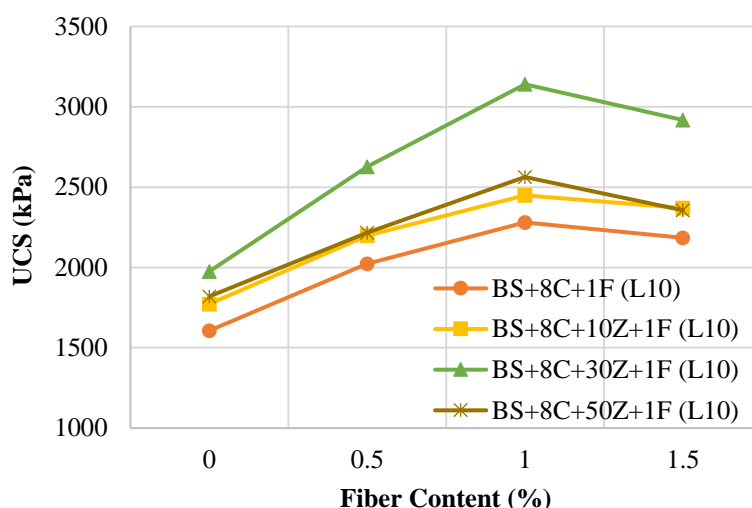
نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری محصورنشده نمونه‌های آزمایش‌شده در جداول ۶ و ۷ به ترتیب برای زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ و ۵۶ روز ارائه شده است. شکل ۲ نیز تغییرات UCS را در نمونه‌های دارای ۸ درصد سیمان، جایگزینی‌های گوناگون ژئولیت و طول الیاف ۱۰ میلی-متر برحسب مقادیر مختلف الیاف را نشان می‌دهد. می‌توان با بررسی این شکل دریافت که که افزودن الیاف کنف به ماسه تثبیت‌شده با سیمان در هر مقدار به طور موثر UCS نمونه‌ها را افزایش می‌دهد. افزایش محتوای الیاف از ۰/۵٪ به ۱٪ منجر به بالارفتن UCS نمونه‌های تثبیت‌شده شد. اما افزایش الیاف به ۱/۵٪، تاثیر منفی بر مقاومت نمونه‌ها داشت. روندهایی مشابه برای الیاف اضافه‌شده با طول‌های ۵ میلی‌متر و ۱۵ میلی‌متر مشاهده شد. دلیل رفتار ملاحظه‌شده در مقدار الیاف ۱٪ را می‌توان برهمکنش بهینه الیاف، ماسه و مواد سیمانی دانست که در سایر طرح‌های اختلاط آزمایش‌شده قابل دستیابی نبوده است. چوبیستی و همکاران [۲۷] نیز محتوای الیاف کناف ۱٪ را به عنوان درصدی که بیشینه UCS خاک ماسه‌ای را حاصل می‌کند، گزارش کردند. علاوه‌براین، در تحقیق قدک پور و همکاران [۲۸]، مقدار ۰/۷۵٪ الیاف کناف که بیشترین محتوای الیاف مورد مطالعه آنها بود، بالاترین UCS ماسه تثبیت‌شده با سیمان را حاصل نمود. لازم به ذکر است که بالاترین مقادیر UCS در نمونه‌های تقویت‌شده در جایگزینی ۳۰٪ سیمان با ژئولیت مشاهده گردید که می‌توان این درصد جایگزینی را به عنوان درصد بهینه ترکیب سیمان و ژئولیت در نظر گرفت. پژوهش‌های پیشین نیز این یافته را تصدیق می‌کنند [۲۹،۳۰].

جدول ۶: مقادیر مقاومت فشاری محصورنشده برای نمونه‌های ۲۸ روزه

F.C (%)	F.L (mm)	UCS (kPa)				
		%C	۸			
		%Z	۰	۱۰	۳۰	۵۰
۰	۰	۱۰۱/۶	۱۶۰۶/۴	۱۷۷۲/۸	۱۹۷۵/۲	۱۸۱۹/۶
	۵	۱۳۲/۳	۱۶۰۶	۱۸۶۷/۴	۲۱۵۸	۱۹۱۳
۰/۵	۱۰	۱۵۴	۲۰۲۲/۸	۲۱۹۸/۷	۲۶۲۵/۸	۲۲۱۶
	۱۵	۱۴۳/۴	۱۸۵۱/۹	۱۹۷۰/۸	۲۳۸۳/۶	۲۰۲۲
	۵	۱۵۶/۸	۱۹۲۷/۱	۱۹۷۵	۲۴۲۶	۲۱۴۵
	۱۰	۱۸۶/۲	۲۲۸۰/۲	۲۴۴۹	۳۱۴۰	۲۵۶۳
۱	۱۵	۱۷۸/۳	۲۰۹۸/۶	۲۲۳۲	۲۸۰۵	۲۳۶۴
	۵	۱۵۱/۳	۱۷۶۸/۳	۱۹۴۵/۷	۲۳۴۱/۵	۲۰۴۶
۱/۵	۱۰	۱۸۳/۷	۲۱۸۴/۸	۲۳۶۸/۹	۲۹۱۷	۲۳۵۶
	۱۵	۱۷۳/۷	۱۹۷۰/۳	۲۱۱۵	۲۶۱۷	۲۱۵۱

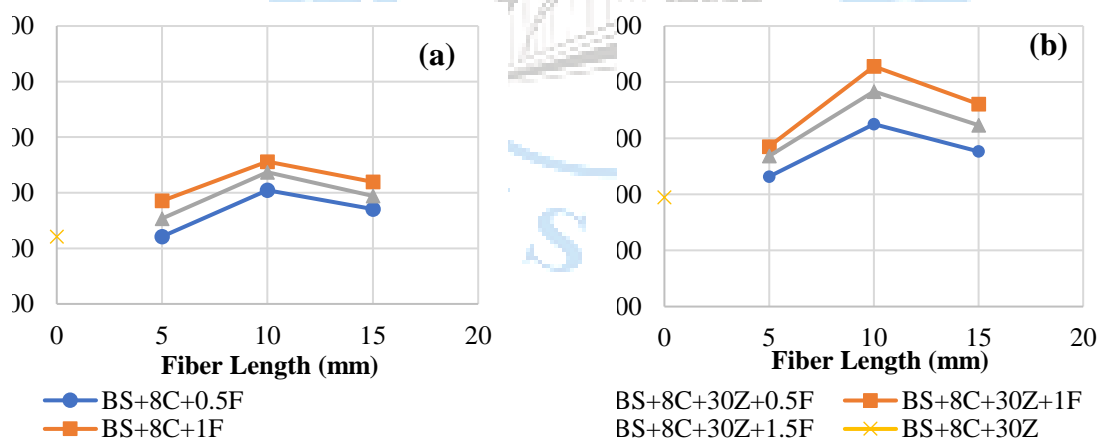
جدول ۷: مقادیر مقاومت فشاری محصورنشده برای نمونه‌های ۵۶ روزه

F.C (%)	F.L (mm)	UCS (kPa)				
		%C	۸			
		%Z	۰	۱۰	۳۰	۵۰
۰	۰	۱۰۶	۱۹۲۰	۲۰۵۰	۲۳۱۹	۱۹۸۶
	۵	۱۳۷	۲۰۹۱	۲۲۴۹	۲۷۴۰	۲۳۳۵
۰/۵	۱۰	۱۶۷/۹	۲۶۵۱	۲۷۵۷	۳۴۴۰	۲۷۴۱
	۱۵	۱۵۱/۶	۲۴۱۰	۲۴۶۸	۳۱۳۶	۲۴۵۵
	۵	۱۷۰/۴	۲۱۸۸	۲۵۰۰	۲۷۶۲	۲۶۲۶
	۱۰	۲۰۵/۶	۲۲۶۷	۳۱۸۲	۴۰۵۹	۳۲۰۸
۱	۱۵	۱۹۲/۷	۲۵۹۸	۲۸۸۸	۳۰۹۱	۲۹۳۶
	۵	۱۶۴/۵	۲۱۴۵	۲۳۹۴	۲۸۸۵	۲۴۹۳
۱/۵	۱۰	۲۰۲/۱	۲۶۹۸	۲۹۴۱	۳۷۵۴	۲۹۳۲
	۱۵	۱۸۷/۸	۲۴۸۹	۲۶۲۸	۳۳۶۸	۲۶۱۲



شکل ۲: تغییرات UCS نمونه‌های حاوی ۸ درصد سیمان و جایگزینی زئولیت مختلف برحسب تغییر مقدار الیاف

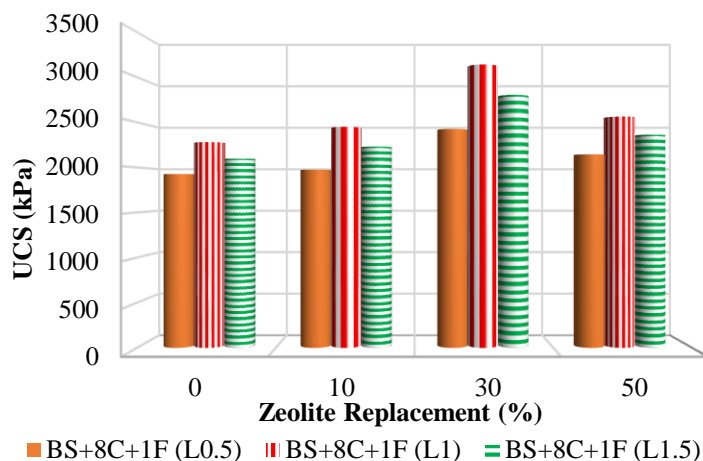
شکل ۳ (الف) و (ب) تغییرات UCS نمونه‌های تثبیت‌شده با ۸٪ سیمان، ۰٪ و ۳۰٪ جایگزینی سیمان با زئولیت را برای مقادیر گوناگون الیاف برحسب تغییر در طول الیاف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش طول الیاف از ۵ میلی‌متر به ۱۰ میلی‌متر به طور قابل ملاحظه‌ای UCS نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان و نمونه‌های با ۳۰٪ جایگزین زئولیت را افزایش داد. اما افزایش بیشتر از ۱۰ میلی‌متر به ۱۵ میلی‌متر سبب کاهش UCS نمونه‌ها شد. با این وجود، نمونه‌های حاوی الیاف ۱۵ میلی‌متری UCS بیشتری نسبت به نمونه‌های ۵ میلی‌متری نشان دادند. همچنین، رفتار مشابهی برای جایگزینی زئولیت مشاهده شد. چنین ارتقایی در نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف ۱۰ میلی‌متری را می‌توان به توزیع مناسب الیاف در ماتریس خاک و در نتیجه اثر متقابل بهتر ماسه و مواد سیمانی در طول بدنه الیاف نسبت داد. کلارا و وتورلمو [۳۱] نیز در افزودن الیاف مصنوعی به خاک ماسه‌ای، طول الیاف ۱۰ میلی را به عنوان مقدار بهینه گزارش نمودند.



شکل ۳: تغییرات UCS نمونه‌های حاوی ۸ درصد سیمان برحسب تغییر طول الیاف برای (الف) صفر درصد و (ب) جایگزینی زئولیت ۳۰ درصد

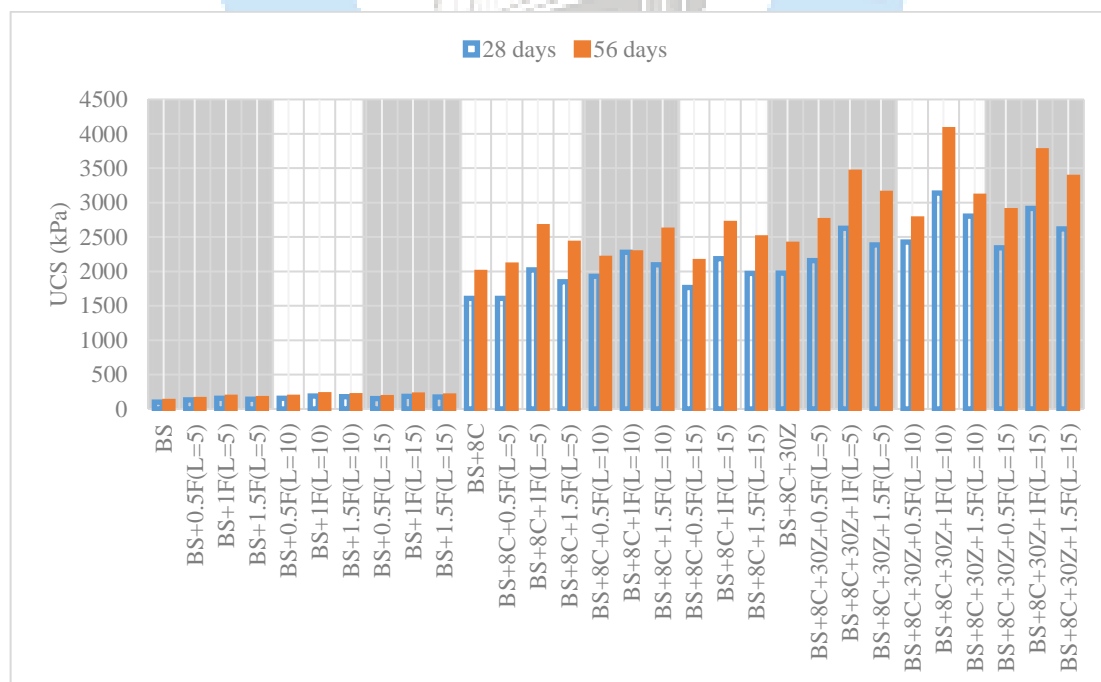
شکل ۴ تغییرات UCS را در نمونه‌های دارای ۸ درصد سیمان و ۱ درصد الیاف در سه طول مختلف الیاف برحسب تغییرات جایگزینی زئولیت نشان می‌دهد. همانطور که می‌توان مشاهده کرد، در هر طول مشخص الیاف، جایگزینی زئولیت سبب افزایش UCS نمونه‌های تقویت‌شده گردید. افزایش جایگزینی زئولیت از ۱۰٪ به ۳۰٪ موجب افزایش UCS به بالاترین مقدار شد. اما افزایش بیشتر جایگزینی زئولیت تا ۵۰٪ سبب کاهش UCS در مقایسه با نمونه با جایگزینی ۳۰٪ گردید. با افزودن آب به مخلوط خاک و تثبیت‌کننده‌ها، سیمان واکنشی شیمیایی به نام هیدراتاسیون را شروع می‌کند که دارای دو محصول اصلی است. ماده سیمانی که هنگام واکنش هیدراتاسیون به وجود می‌آید ژل کلسیم-سیلیکات-هیدرات (C-S-H) و محصول جانبی دیگر هیدروکسید کلسیم (Ca(OH)_2) است. زمانی که سیمان با

زئولیت جایگزین گردد، SiO_2 و Al_2O_3 موجود در زئولیت با Ca(OH)_2 (واکنش پوزولانی) واکنش داده و ژل C-S-H بیشتری تولید می-کند [۲۹]. دلیل بهینه بودن جایگزینی ۳۰ درصد زئولیت این است که مقدار Ca(OH)_2 ، SiO_2 و Al_2O_3 در وضعیت متعادلی قرار گرفته و منجر به واکنش پوزولانی بهینه و بالاترین مقاومت شده است.



شکل ۴: تغییرات UCS نمونه‌های حاوی ۸ درصد سیمان و ۱ درصد الیاف در طول‌های مختلف الیاف بر حسب تغییر در جایگزینی زئولیت

شکل ۵ نشان‌دهنده تغییرات مقاومت فشاری محصورنشده نمونه‌های حاوی الیاف و بدون افزودنی شیمیایی، با ۸٪ سیمان، و با ۸٪ سیمان و جایگزینی ۳۰٪ زئولیت تحت تاثیر افزایش زمان عمل‌آوری از ۲۸ به ۵۶ روز می‌باشد. با بررسی این نمودار می‌توان بیان نمود که افزایش زمان عمل‌آوری برای نمونه‌های بدون سیمان و زئولیت و حاوی الیاف کف ارتقاء چشمگیری را در مقاومت فشاری محصورنشده به وجود نمی‌آورد. این در حالی است که تاثیر افزایش زمان عمل‌آوری در بهبود خواص مقاومتی نمونه‌های مسلح سیمانی بارز است. با جایگزینی ۳۰٪ سیمان با زئولیت اثر افزایش زمان عمل‌آوری به بیشینه مقدار خود رسید. همچنین لازم به ذکر است که این افزایش زمان برای نمونه حاوی ۱٪ الیاف با طول ۱۰ میلی‌متر بیشترین مقاومت فشاری محصورنشده را حاصل می‌کند.



شکل ۵: تغییر مقاومت فشاری محصورنشده در نمونه‌های بدون افزودنی شیمیایی، دارای سیمان و دارای جایگزینی سیمان با زئولیت تحت تاثیر افزایش زمان عمل‌آوری از ۲۸ به ۵۶ روز

۴-۲- تغییر مدول الاستیسیته سکانت (۵۰E)

جداول ۸ و ۹ مقادیر ۵۰E بدست آمده از منحنی های تنش- کرنش آزمایش های UCS انجام شده در این مطالعه را برای زمان های عمل آوری به ترتیب ۲۸ و ۵۶ روز نشان می دهد. ۵۰E را می توان با تقسیم تنش در نصف کرنش شکست بر کرنش مربوطه حساب نمود. در ادامه، چندین شکل برای نمایش دادن تغییرات ۵۰E ناشی از متغیرهای این پژوهش ارائه شده است.

جدول ۸: نتایج آزمایش ۵۰E نمونه های با $Rc=100\%$ به مدت ۲۸ روز عمل آوری.

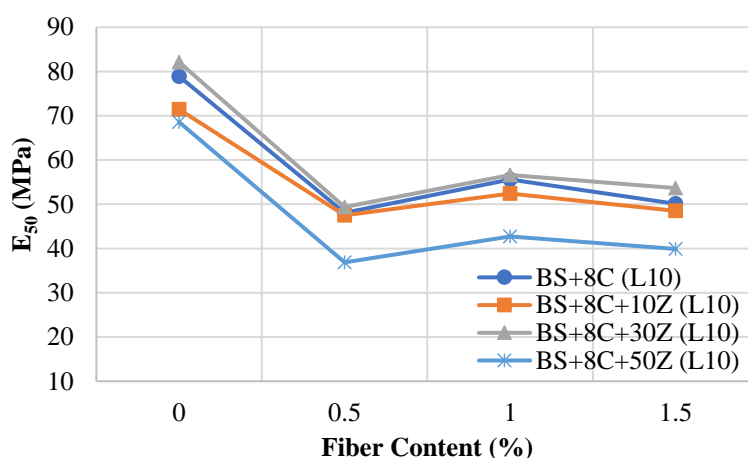
F (%)	L (mm)	$(MPa)_{\Delta E}$					
		%C	۰	۸			
				%Z	۰	۱۰	۳۰
۰	۰		۱۰/۲۵	۷۸/۹۰	۷۱/۴۳	۸۲/۱۰	۶۸/۵۶
	۵		۶/۵۲	۳۸/۹۲	۳۸/۵۸	۴۱/۱۱	۳۲/۸۴
۰/۵	۱۰		۷/۱۹	۴۸/۰۷	۴۷/۵۰	۴۹/۳۷	۳۶/۸۶
	۱۵		۶/۵۴	۴۰/۶۲	۴۱/۱۶	۴۳/۶۸	۳۳/۴۶
۱	۵		۷/۲۴	۴۴/۰۴	۴۲/۴۱	۴۸/۶۹	۳۶/۲۲
	۱۰		۸/۸۹	۵۵/۶۱	۵۲/۴۵	۵۶/۶۱	۴۲/۷۰
	۱۵		۷/۸۶	۴۷/۷۹	۴۶/۰۵	۵۳/۶۲	۳۸/۸۹
۱/۵	۵		۶/۷۶	۴۰/۲۸	۴۰/۱۷	۴۲/۶۴	۳۴/۲۷
	۱۰		۷/۴۱	۵۰/۰۷	۴۸/۵۱	۵۳/۶۱	۳۹/۹۳
	۱۵		۶/۹۹	۴۲/۵۲	۴۲/۴۳	۴۵/۵۲	۳۵/۰۳

جدول ۹: نتایج آزمایش ۵۰E نمونه های با $Rc=100\%$ به مدت ۲۸ روز عمل آوری.

F.C (%)	F.L (mm)	$(MPa)_{\Delta E}$					
		%C	۰	۸			
				%Z	۰	۱۰	۳۰
۰	۰		۱۱/۴۰	۹۹/۰۱	۹۶/۱۷	۱۱۴/۱۳	۸۳/۸۲
	۵		۷/۲۹	۵۰/۱۰	۵۰/۱۹	۵۵/۳۱	۳۹/۲۵
۰/۵	۱۰		۸/۴۰	۵۸/۱۲	۵۶/۵۳	۷۱/۶۹	۴۶/۷۹
	۱۵		۷/۳۳	۵۳/۳۰	۵۱/۷۳	۵۸/۲۵	۴۱/۸۰
۱	۵		۸/۹۳	۵۳/۱۴	۴۲/۴۱	۵۰/۹۸	۴۵/۲۰
	۱۰		۹/۹۳	۶۴/۹۷	۶/۱۸	۸۴/۱۷	۵۴/۸۹
	۱۵		۸/۳۲	۵۷/۸۱	۵۸/۵۸	۶۵/۸۵	۴۹/۶۹
۱/۵	۵		۷/۸۰	۴۹/۷۷	۵۳/۶۱	۵۱/۰۵	۴۲/۳۲
	۱۰		۸/۷۰	۶۲/۵۶	۵۹/۴۰	۶۸/۲۴	۴۸/۷۷
	۱۵		۷/۹۵	۵۳/۳۰	۵۲/۰۶	۵۷/۱۸	۴۳/۳۵

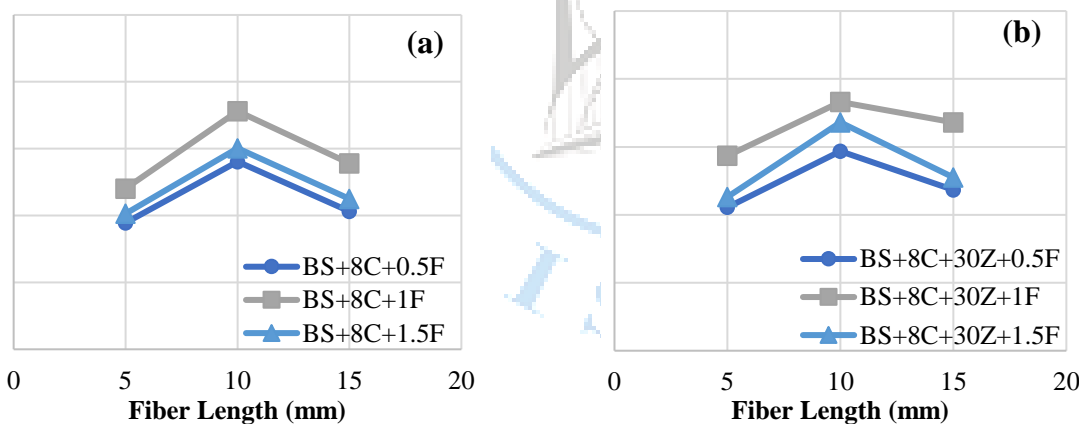
شکل ۶ چگونگی تغییر ۵۰E را بر حسب تغییر مقدار الیاف ۱۰ میلی متری در نمونه هایی با جایگزین های مختلف سیمان با ژئولیت نشان می دهد. همانطور که قابل مشاهده است، افزودن الیاف به ماسه سیمانی سبب کاهش ۵۰E کلی نمونه ها گردید. علاوه بر این، افزایش مقدار الیاف از ۰/۵٪ به ۱٪ موجب پدیدار شدن یک روند افزایشی در ۵۰E نمونه های ارتقاء یافته شد. با این حال، هنگامی که محتوای الیاف تا ۱/۵٪ افزایش یافت، موجب بروز روندی کاهشی در ۵۰E گردید. چنین رفتاری در هر جایگزینی ژئولیت و همچنین برای نمونه های تقویت شده با

الیاف ۵ میلی‌متر و ۱۵ میلی‌متر، مطابق جداول ۸ و ۹ بارز است. کاهش E_{50} در حین افزودن الیاف نیز توسط قذک پور و همکاران [۲] و علاوه بر این، روندی مشابه تغییر E_{50} توسط ده‌ار و حسین [۳۲] هنگام افزایش مقدار الیاف پلاستیکی در خاک رس گزارش گردید.



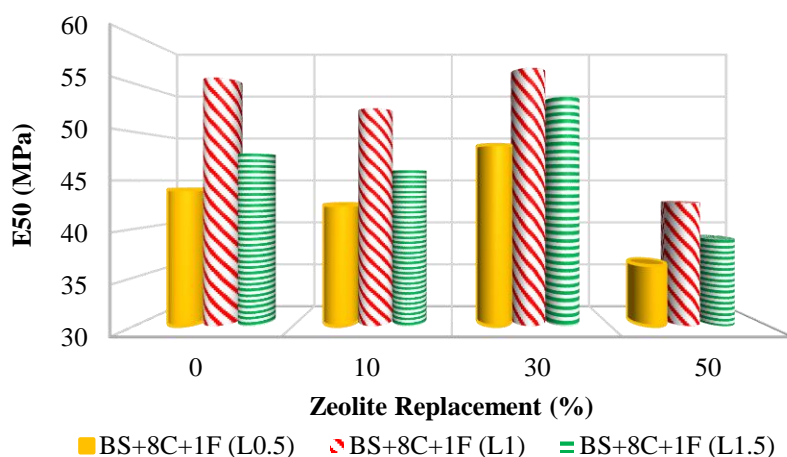
شکل ۶: تغییر E_{50} نمونه‌های حاوی ۸ درصد سیمان و جایگزینی‌های مختلف ژئولیت برحسب تغییر محتوای الیاف

تغییر در E_{50} نمونه‌های تثبیت‌شده با ۸ درصد سیمان حاوی مقادیر مختلف الیاف برحسب تغییر طول آن برای جایگزینی ژئولیت ۰ درصد و ۳۰ درصد در شکل‌های ۷ (الف) و (ب) به ترتیب نشان داده شده‌است. همانطور که در شکل ۷ (a) قابل مشاهده است، در هر مقدار مشخص الیاف، افزایش طول الیاف به ۱۰ میلی‌متر E_{50} نمونه‌ها را افزایش داد و پس از آن، با افزایش طول الیاف به ۱۵ میلی‌متر، کاهش در E_{50} مشاهده گردید. در شکل ۷ (ب) روند مشابهی برای نمونه‌های سیمان با ۳۰ درصد ژئولیت قابل ملاحظه است.



شکل ۷: تغییرات E_{50} نمونه‌های حاوی ۸٪ سیمان و محتوای الیاف مختلف برحسب تغییر طول الیاف برای الف) ۰٪ و ب) جایگزینی ژئولیت ۳۰٪

رفتار پارامتر E_{50} نمونه‌های تثبیت‌شده ۸٪ سیمان و حاوی ۱٪ الیاف برحسب تغییر در جایگزینی ژئولیت را می‌توان در شکل ۸ مورد تحلیل قرار داد. همانطور که واضح است، در مرحله اول جایگزینی ژئولیت، E_{50} به صورت جزئی کاهش یافت و پس از آن، جایگزینی ژئولیت تا ۳۰٪ تأثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش E_{50} نمونه‌های مسلح‌شده با الیاف ۱٪ داشت. همچنین، افزایش جایگزینی ژئولیت به ۵۰ درصد تأثیر منفی بر E_{50} نمونه‌ها گذاشت. برای نمونه‌های مسلح‌شده با ۰/۵٪ و ۱/۵٪، همین روند مشاهده شد.



شکل ۸: تغییرات E50 نمونه‌های حاوی ۸ درصد سیمان و ۱ درصد الیاف در طول‌های مختلف الیاف بر حسب تغییر در جایگزینی زئولیت

کاهش E50 نمونه‌های حاوی الیاف نسبت به نمونه‌های سیمانی را می‌توان به رفتار E50 ناشی از تغییر سفتی مواد نسبت داد. در پژوهش حاضر، ابتدا تاثیر افزودن الیاف است که از نظر سختی کمتر از ذرات خاک و مواد حاصل از واکنش هیدراتاسیون می‌باشد. دلیل دیگر این است که الیاف در ماتریس نمونه‌ها به اندازه‌ای تغییر شکل نیاز دارند تا به اندازه کافی با ذرات ماسه سیمانی اندرکنش حاصل کنند و از این رو بر خواص مکانیکی تأثیر بگذارند. چنین رخدادی سبب کاهش بیشتر E50 ماتریس حاوی الیاف می‌شود. همچنین لازم به ذکر است که روند کاهش E50 را در حضور الیاف در خاک توسط چندین محقق دیگر گزارش شده است [۲۷، ۲۸].

۴-۳- آزمایش برش مستقیم

از مرسوم‌ترین آزمون‌های آزمایشگاهی برای بررسی پارامترهای برشی مانند چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی ذرات خاک (ϕ) آزمایش برش مستقیم می‌باشد. تغییرات مقادیر C و ϕ نمونه‌های تثبیت‌شده با مقدار مختلف سیمان، همچنین جایگزینی ۳۰٪ سیمان با زئولیت، مقدار الیاف ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪ در اندازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر در دو زمان عمل‌آوری ۲۸ و ۵۶ روز در جداول ۱۰ و ۱۱ نمایش داده شده است. همچنین، شکل ۹ روند تغییرات مقادیر C را نمایش می‌دهند. با توجه به شکل‌ها می‌توان بیان نمود که افزودن ۸٪ سیمان موجب افزایش قابل توجه مقدار C پس از ۲۸ روز عمل‌آوری گردید. از سویی دیگر، جایگزینی تا ۳۰ درصد از سیمان با زئولیت هم سبب افزایش بیشتر مقدار C نمونه‌ها بعد از مدت‌زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه گردید.

ارزیابی شکل ۱۰ نمایان‌گر آن است که در نمونه‌های تثبیت‌شده، تغییرات پارامتر ϕ رفتاری مشابه تغییرات پارامتر C در زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ روز داشتند. رفتار مشابه افزایشی در پارامترهای C و ϕ با افزودن مواد پوزولانی خاکستر سبوس برنج و ضایعات کربید کلسیم به خاک رس متورم‌شونده در پژوهش ليو و همکارانش (۲۰۱۹) نیز مشاهده گردید (Liu et al., ۲۰۱۹).

دلیل بهبود مقدار پارامترهای C و ϕ در فاز بدون الیاف به هنگام اضافه کردن و افزایش در مقدار سیمان پس از ۲۸ روز عمل‌آوری به وجود آمدن ژل C-S-H در واکنش هیدراتاسیون سیمان و افزایش مقدار آن به نسبت افزایش مقدار این افزودنی می‌باشد. افزایش میزان جایگزینی سیمان با زئولیت تا ۳۰٪ موجب افزایش واکنش پوزولانی شد. افزایش مقدار پارامترهای برشی C و ϕ و بدست آمدن مقادیر بیشینه‌ی آن‌ها هنگام با بالارفتن مقدار جایگزینی ۳۰٪ سیمان با زئولیت در نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری به دلیل اثر مثبت زمان عمل‌آوری در افزایش مقاومت نمونه‌ها و رسیدن به تعادل در میزان تولید Ca(OH)_2 در واکنش هیدراتاسیون سیمان و مقادیر سیلیکا و آلومینای موجود در زئولیت برای تولید بیشترین مقدار محصول واکنش پوزولانی می‌باشد [۲۹].

بررسی شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان می‌دهد که افزودن ۰/۵٪ الیاف کنف به طور کلی موجب افزایش C و ϕ نمونه‌های تثبیت‌نشده، تثبیت‌شده با سیمان، و همچنین تثبیت‌شده با سیمان و زئولیت گردید. افزایش مقدار الیاف تا ۱٪ فارغ از مقدار افزودنی‌های شیمیایی، سبب حاصل-شدن مقدار بیشینه پارامترهای برشی نمونه‌های تسلیح‌شده گردید. اما، افزایش بیشتر مقدار الیاف تا ۱/۵٪ موجب کاهش تاثیر الیاف بر

مقاومت برشی خاک شد. لازم به ذکر است که بیشترین تاثیر الیاف کنف بر پارامترهای برشی در نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان و جایگزینی ۳۰٪ با زئولیت مشاهده گردید. افزایش مقادیر پارامترهای برشی در زمان افزایش مقدار الیاف تا ۱٪ به دلیل توزیع مناسب الیاف در سرتاسر ماتریس نمونه و حصول بهترین اندرکنش بین الیاف، ذرات خاک، و مواد چسباننده (C-S-H) حاصل از واکنش‌های شیمیایی هیدراتاسیون و پوزولانی می‌باشد. از سویی دیگر، کاهش مقدار پارامترهای مقاومت برشی مذکور هنگام تسلیح نمونه‌ها با ۱/۵٪ الیاف کنف به دلیل زیاده‌بودن مقدار الیاف و در نتیجه، توزیع نامناسب الیاف و تجمع آن‌ها در ماتریس خاک و در نهایت کاهش اندرکنش الیاف با ذرات جامد خاک و مواد چسباننده است. پژوهشگران دیگری نیز رفتار برشی مستقیم مشابهی در افزودن الیاف مختلف به خاک مشاهده نموده‌اند [۳۳-۳۵].

پارامتر تعیین‌کننده دیگر در تغییر پارامترهای برشی نمونه‌های مسلح‌شده، طول الیاف می‌باشد. ارزیابی مجدد شکل‌های ۹ تا ۱۰ نشان‌دهنده این است که افزودن الیاف با طول ۵ میلی‌متر موجب افزایش مقاومت برشی و پارامترهای آن نسبت به نمونه‌های بدون الیاف شد. افزایش طول الیاف از ۵ میلی‌متر به ۱۰ میلی‌متر موجب بیشتر شدن پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های حاوی الیاف کنف گردید. اما، افزایش طول الیاف از ۱۰ میلی‌متر به ۱۵ میلی‌متر سبب کاهش قابل‌ملاحظه‌ی مقاومت برشی نمونه‌های تسلیح‌شده با الیاف شد.

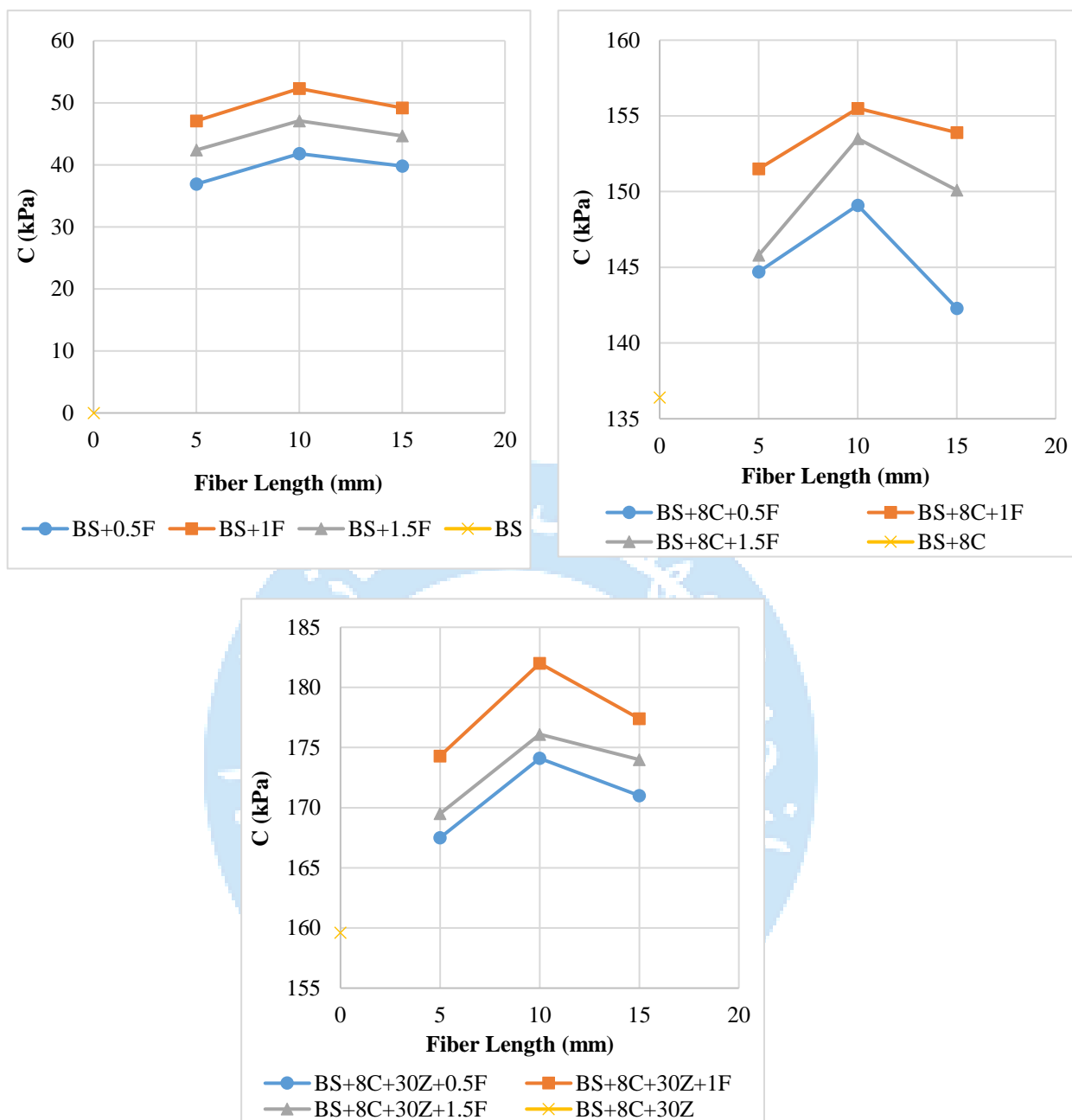
شکل ۱۱ تا ۱۳ مقایسه‌ی تنش گسیختگی نمونه با ۸٪ سیمان و همچنین نمونه با جایگزینی ۳۰٪ سیمان با زئولیت پس از ۲۸ روز عمل‌آوری تحت بارهای عمودی ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال را نمایش می‌دهد. با ارزیابی این نمودارها می‌توان به این نتیجه رسید که افزایش بار عمودی از ۵۰ تا ۲۰۰ کیلوپاسکال موجب بالارفتن تنش گسیختگی در نمونه‌ی تثبیت‌شده گردید. نمونه‌ی با جایگزینی ۳۰٪ تحت هر سه بار عمودی ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال، تنش گسیختگی بیشتری در مقایسه با نمونه‌ی سیمانی از خود نشان داد. این پدیده مشابه آنچه در آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده بیان گردید، به دلیل پیشرفت واکنش پوزولانی پس از مدت عمل‌آوری ۲۸ روزه است. در مقایسه با نمونه‌های بدون الیاف، افزودن ۰/۵٪ الیاف به نمونه‌های آزمایش برش مستقیم سبب افزایش تنش گسیختگی نمونه‌ها تحت هر سه بار عمودی گردید. افزایش مقدار الیاف از ۰/۵٪ به ۱٪ موجب افزایش مقاومت نمونه‌ها و بالارفتن تنش گسیختگی نمونه‌ها شد. اما افزایش بیشتر مقدار الیاف کنف تا ۱/۵٪ سبب کاهش تنش گسیختگی شد. دستیابی به بهترین اندرکنش میان ذرات خاک، مواد چسباننده و الیاف در زمان وجود ۱٪ الیاف در نمونه مسلح‌شده را می‌توان دلیل پیدایش بیشترین تنش گسیختگی دانست.

جدول ۱۰: پارامترهای حاصل از آزمایش‌های برش مستقیم بر نمونه‌های ۲۸ روزه

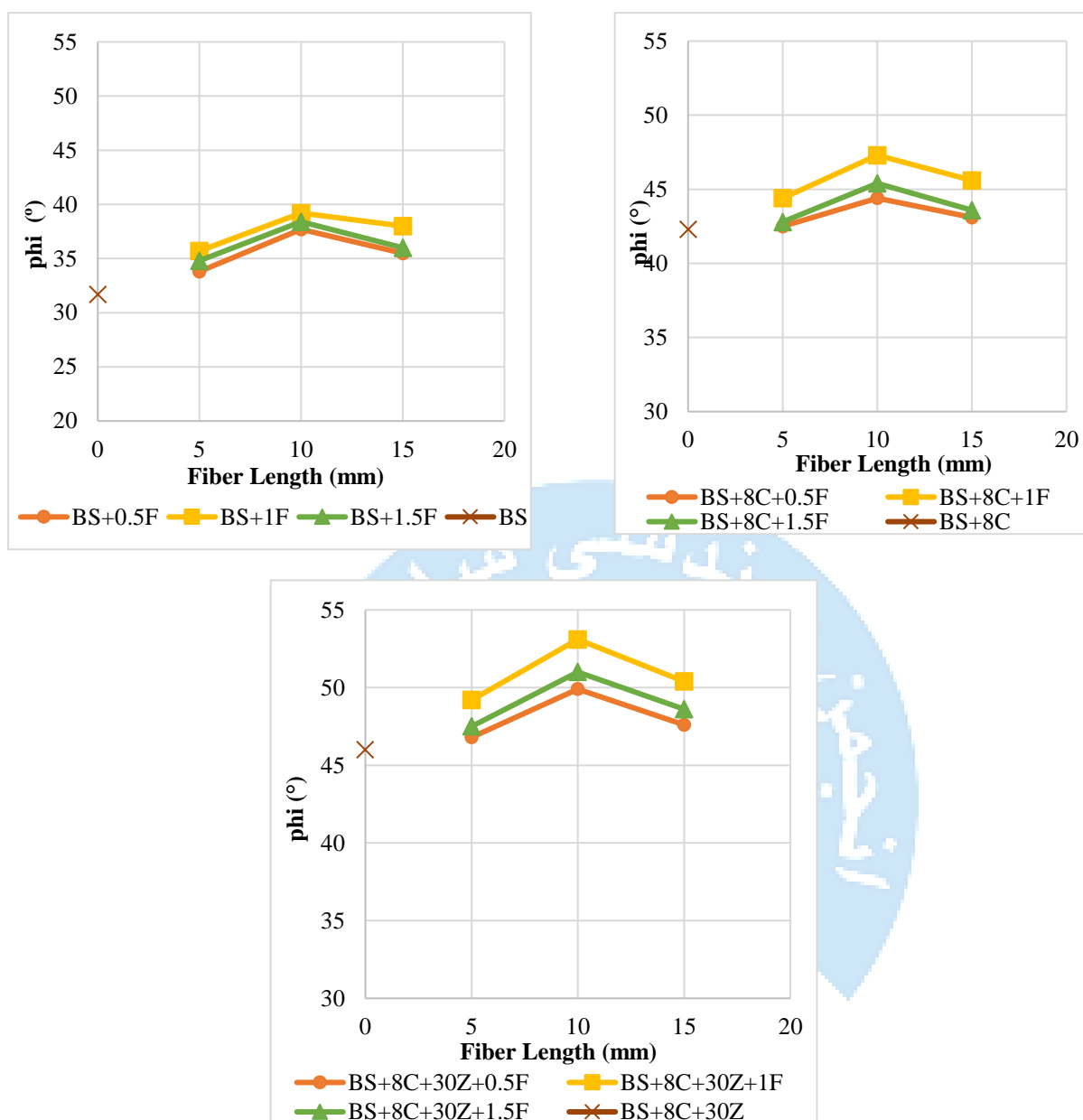
Cement (%)	Zeolite replacement (%)	Fiber content (%)	Fiber length (mm)	C	phi	Shear at Failure kPa ^{۵۰}	Shear at Failure kPa ^{۱۰۰}	Shear at Failure kPa ^{۲۰۰}	
Sand	۸	۰	۰	۰	۳۲	۳۱	۶۳	۱۲۴	
			۵	۳۷	۳۴	۶۸	۱۰۵	۱۶۹	
			۱۰	۴۲	۳۸	۷۹	۱۱۸	۱۹۴	
		۰/۵	۱۵	۴۰	۳۶	۷۲	۱۱۳	۱۸۰	
			۵	۴۷	۳۶	۸۰	۱۱۸	۱۸۸	
			۱۰	۵۲	۳۹	۹۴	۱۲۸	۲۱۴	
		۱	۱۵	۴۹	۳۸	۸۸	۱۲۲	۲۰۴	
			۵	۴۲	۳۵	۷۶	۱۱۰	۱۷۹	
			۱۰	۴۷	۳۸	۸۱	۱۲۹	۲۰۱	
		۱/۵	۱۵	۴۵	۳۶	۷۹	۱۱۵	۱۸۸	
			۰	۰	۱۳۶	۴۲	۱۷۶	۲۳۰	۳۱۳
			۵	۱۴۵	۴۳	۱۸۳	۲۳۸	۳۲۲	
		۰/۵	۱۰	۱۴۹	۴۴	۱۹۳	۲۴۵	۳۲۹	
			۱۵	۱۴۲	۴۳	۱۸۶	۲۴۰	۳۲۶	
			۵	۱۵۲	۴۴	۱۹۶	۲۴۵	۳۴۱	
		۱	۱۰	۱۵۶	۴۷	۲۰۴	۲۶۰	۳۶۵	
			۱۵	۱۵۴	۴۶	۱۹۶	۲۵۴	۳۵۰	
			۵	۱۴۶	۴۳	۱۸۸	۲۲۹	۳۲۶	
		۱/۵	۱۰	۱۵۴	۴۵	۲۰۱	۲۴۳	۳۵۰	
			۱۵	۱۵۰	۴۴	۱۹۳	۲۳۷	۳۳۴	
			۰	۰	۱۶۰	۴۶	۲۱۲	۲۵۰	۳۶۲
		۰/۵	۵	۱۶۸	۴۷	۲۱۹	۲۶۴	۳۷۶	
			۱۰	۱۷۴	۵۰	۲۲۸	۲۸۷	۴۰۴	
			۱۵	۱۷۱	۴۸	۲۱۷	۲۷۸	۳۸۱	
۱	۵	۱۷۴	۴۹	۲۲۴	۲۸۴	۳۹۷			
	۱۰	۱۸۲	۵۳	۲۳۹	۳۰۹	۴۳۷			
	۱۵	۱۷۷	۵۰	۲۲۹	۲۹۰	۴۰۸			
۱/۵	۵	۱۷۰	۴۸	۲۰۹	۲۷۸	۳۷۴			
	۱۰	۱۷۶	۵۱	۲۲۷	۲۹۰	۴۱۱			
	۱۵	۱۷۴	۴۹	۲۲۰	۲۷۹	۳۸۸			

جدول ۱۱: نتایج آزمایش برش مستقیم با عمل آوری ۵۶ روزه

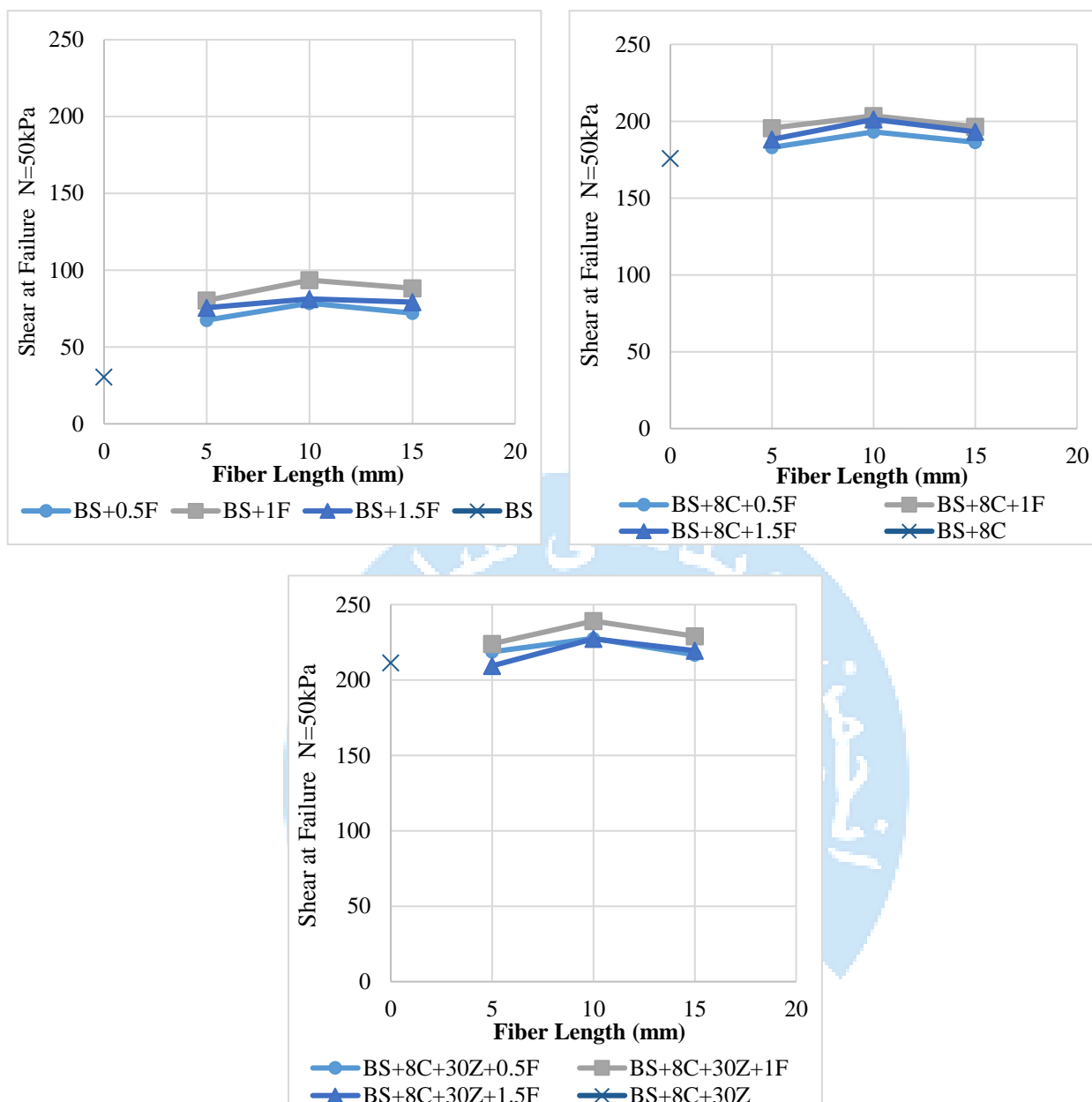
Cement (%)	Zeolite replacement (%)	Fiber content (%)	Fiber length (mm)	C	phi	Shear at Failure kPa ^{۵۰}	Shear at Failure kPa ^{۱۰۰}	Shear at Failure kPa ^{۲۰۰}																
Sand	۰	۰	۰	۰	۴۰	۴۲	۸۶	۱۶۹																
									۰/۵	۵	۵۰	۴۲	۹۲	۱۴۳	۲۲۹									
										۱۰	۵۷	۴۶	۱۰۷	۱۶۱	۲۶۵									
										۱۵	۵۴	۴۴	۹۸	۱۵۴	۲۴۵									
									۱	۵	۶۳	۴۴	۱۰۹	۱۶۱	۲۵۷									
										۱۰	۷۱	۴۸	۱۲۷	۱۷۴	۲۹۱									
										۱۵	۶۶	۴۷	۱۲۰	۱۶۶	۲۷۷									
									۱/۵	۵	۵۷	۴۳	۱۰۳	۱۴۹	۲۴۴									
										۱۰	۶۴	۴۷	۱۱۱	۱۷۶	۲۷۴									
										۱۵	۵۸	۴۶	۱۰۸	۱۵۷	۲۶۲									
									۸	۰	۰	۰	۱۸۶	۵۱	۲۳۹	۳۱۳	۴۲۶							
																		۰/۵	۵	۱۹۶	۴۹	۲۴۹	۳۰۵	۴۱۹
																			۱۰	۲۰۳	۵۳	۲۶۳	۳۳۳	۴۶۲
																			۱۵	۱۹۹	۵۲	۲۵۴	۳۲۶	۴۴۳
																		۱	۵	۲۰۶	۵۳	۲۶۶	۳۳۳	۴۶۵
۱۰	۲۱۱	۵۶	۲۷۷	۳۵۴	۴۹۷																			
۱۵	۲۰۸	۵۴	۲۶۷	۳۴۵	۴۷۷																			
۱/۵	۵	۱۹۷	۵۲	۲۵۶	۳۱۲	۴۴۴																		
	۱۰	۲۰۹	۵۴	۲۷۴	۳۳۱	۴۷۷																		
	۱۵	۲۰۴	۵۲	۲۶۳	۳۲۲	۴۵۵																		
۳۰	۰	۰	۰	۲۱۶	۵۴	۲۸۸	۳۴۱	۴۹۳																
																		۰/۵	۵	۲۳۰	۵۵	۲۹۸	۳۶۰	۵۰۵
																			۱۰	۲۳۷	۵۸	۳۱۰	۳۹۱	۵۵۱
																			۱۵	۲۳۲	۵۶	۲۹۵	۳۷۹	۵۱۹
																		۱	۵	۲۳۴	۵۸	۳۰۵	۳۸۷	۵۴۱
									۱۰	۲۴۸	۷۲	۳۲۶	۴۲۰	۵۹۵										
									۱۵	۲۴۱	۵۸	۳۱۲	۳۹۵	۵۵۵										
									۱/۵	۵	۲۲۸	۵۶	۲۸۵	۳۷۸	۵۰۹									
										۱۰	۲۳۷	۵۹	۳۱۰	۳۹۴	۵۶۰									
										۱۵	۲۳۵	۵۷	۲۹۹	۳۸۰	۵۲۹									



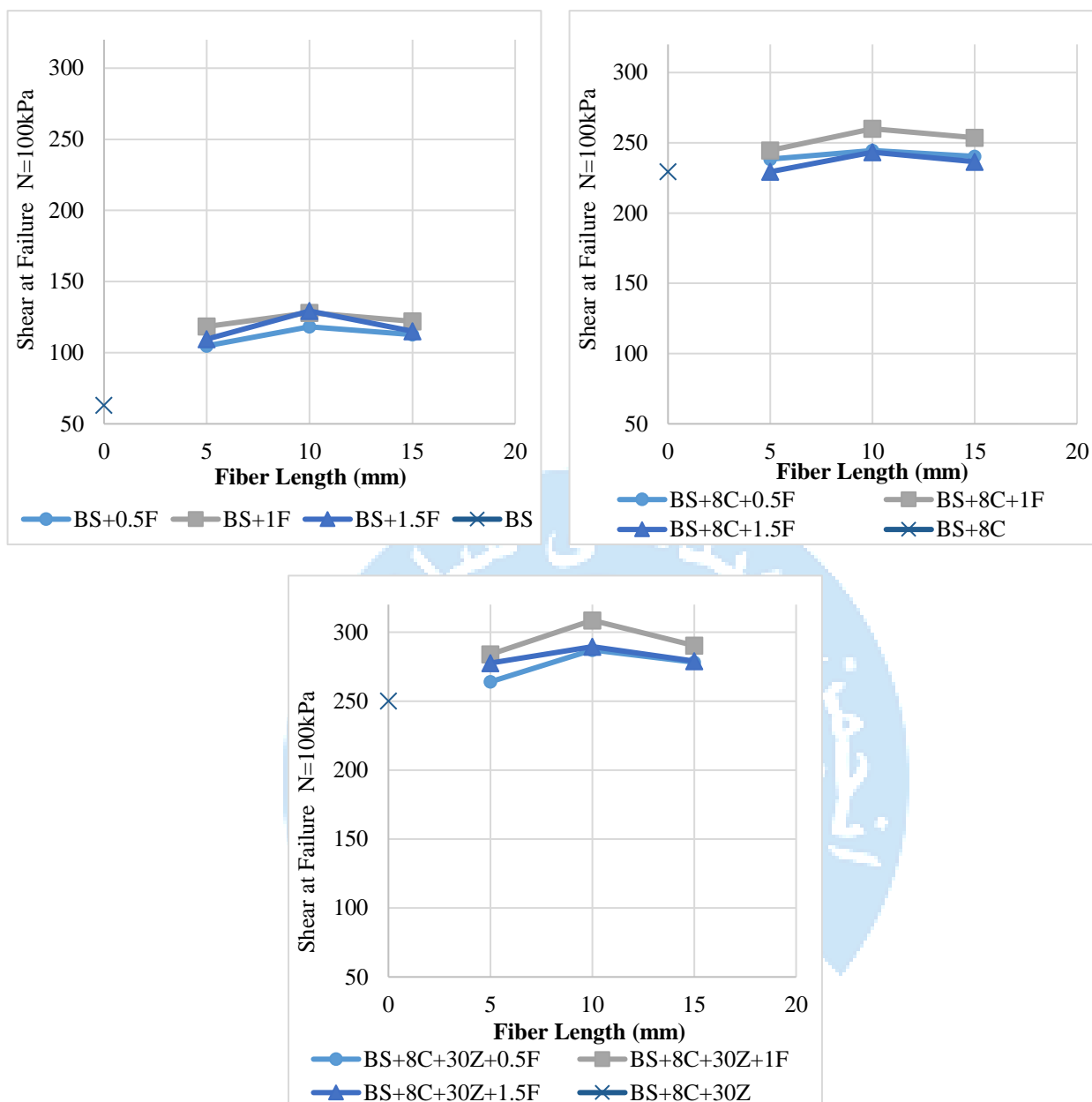
شکل ۹: نمودار چسبندگی ماسه، سیمان، زئولیت و الیاف با درصدها و طول‌های مختلف با ۲۸ روز عمل‌آوری



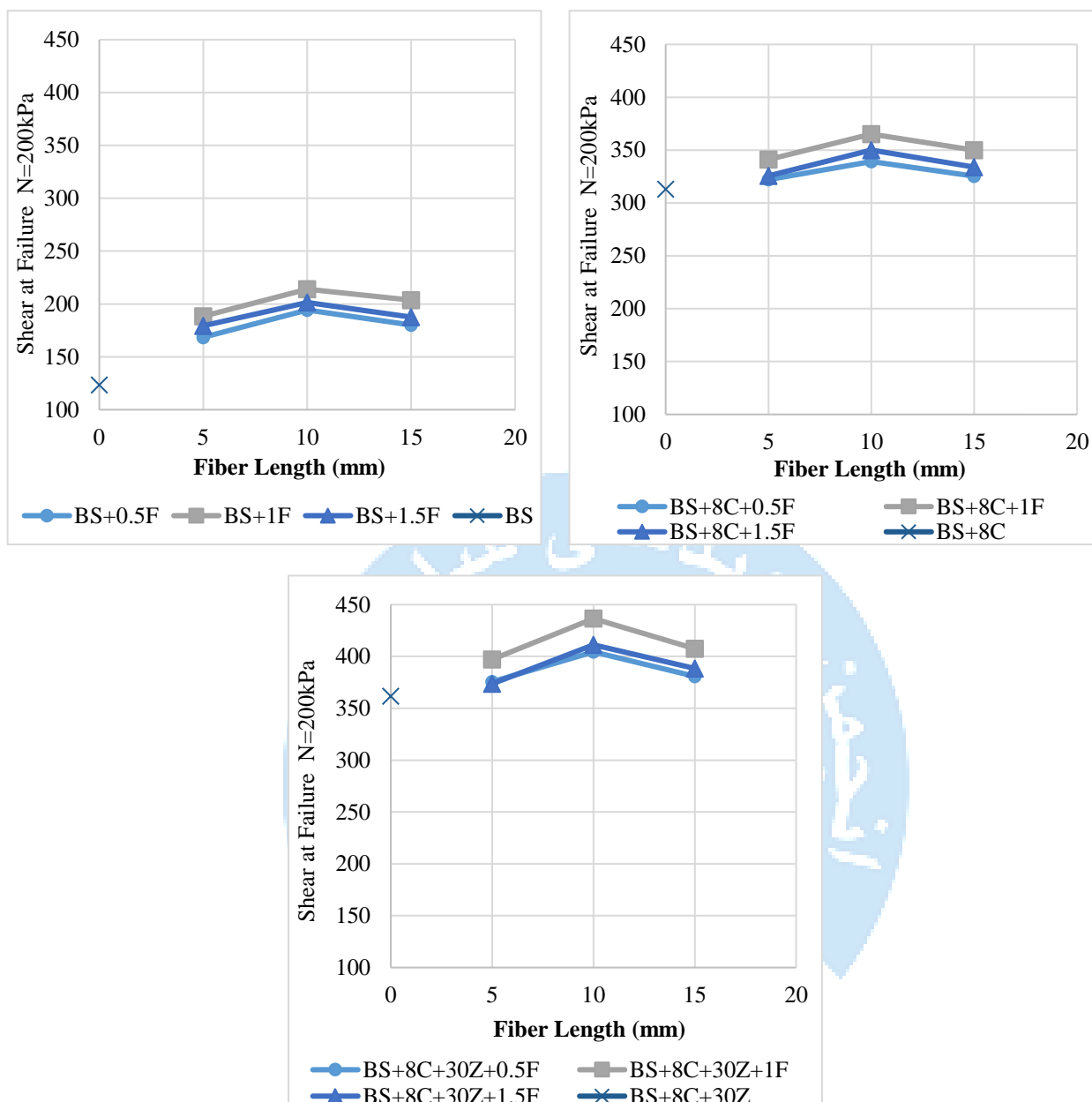
شکل ۱۰: نمودار زاویه اصطکاک داخلی ماسه، سیمان، زئولیت و الیاف با درصدها و طول‌های مختلف با ۲۸ روز عمل‌آوری و تراکم نسبی ۱۰۰ درصد



شکل ۱۱: نمودار برش حین گسیختگی ماسه، سیمان، زئولیت و الیاف با درصدها و طول‌های مختلف با ۲۸ روز عمل‌آوری - $kPa \cdot N = 50$

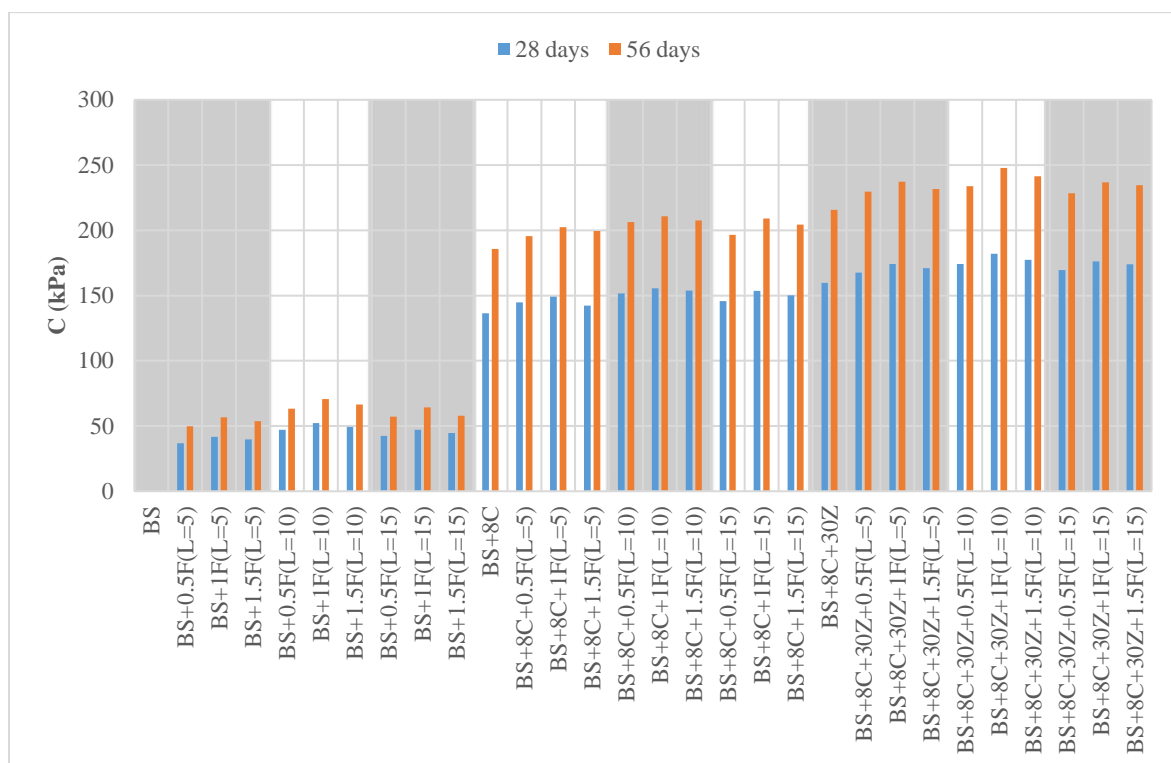


شکل ۱۲: نمودار برش حین گسیختگی ماسه، سیمان و الیاف با درصدها و طول‌های مختلف با ۲۸ روز عمل‌آوری - $N=100 \text{ kPa}$

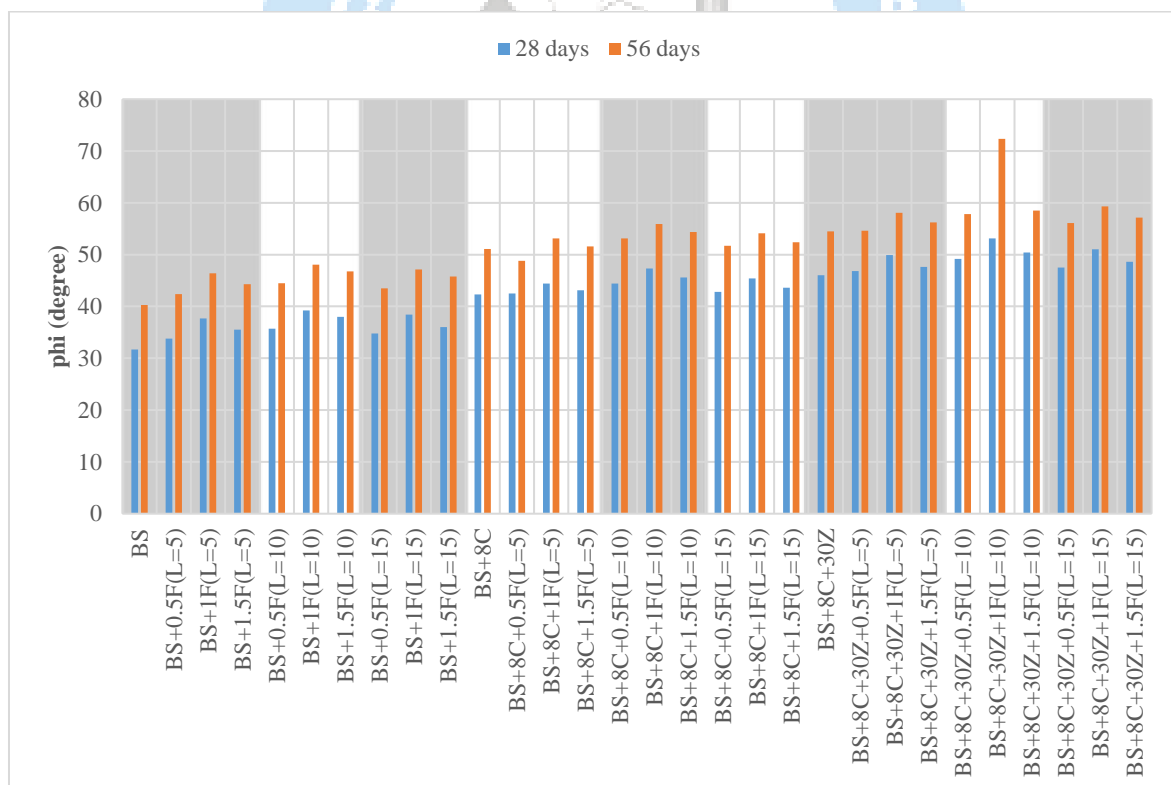


شکل ۱۳: نمودار برش حین گسیختگی ماسه، سیمان، زئولیت و الیاف با درصدها و طول‌های مختلف با ۲۸ روز عمل‌آوری و تراکم نسبی ۱۰۰ درصد - $kPa \cdot 200N =$

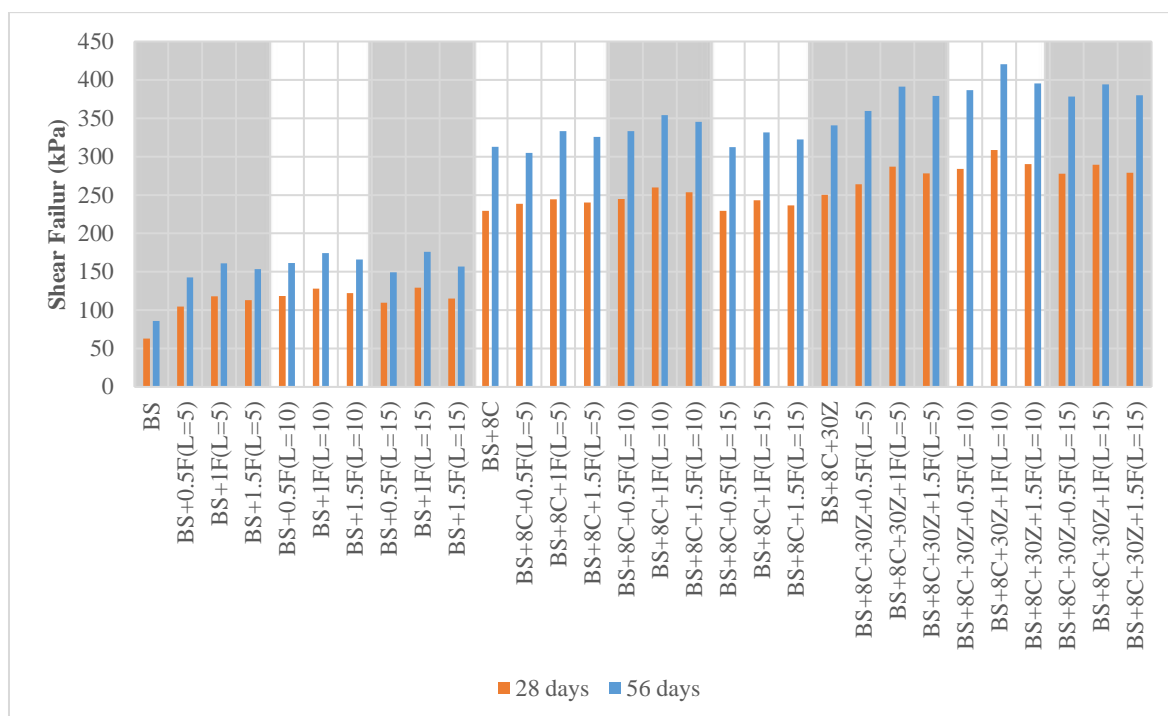
تغییرات خصوصیات برشی مستقیم نمونه‌های تثبیت‌شده و همچنین مسلح‌شده به الیاف کنف برحسب زمان عمل‌آوری را می‌توان در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ مشاهده نمود. با توجه به این شکل‌ها می‌توان دریافت که افزایش زمان عمل‌آوری از ۲۸ به ۵۶ روز موجب ارتقاء چشمگیر چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و تنش گسیختگی نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان و زئولیت و همچنین مسلح‌شده به الیاف کنف گردید. این افزایش پارامترهای مقاومتی به دلیل وجود زمان کافی برای پیشرفت واکنش پوزولانی بین فرآورده‌های واکنش هیدراتاسیون و اکسید‌های سیلیس و آلومینیوم حاضر در زئولیت می‌باشد. پس از ۵۶ روز عمل‌آوری، مقدار C نمونه‌ی تثبیت‌شده با ۰.۸٪ سیمان افزایش بیشتری یافت و همچنین روند افزایشی مقدار C در نمونه‌های با جایگزینی تا ۰.۳٪ سیمان با زئولیت همانند نمونه‌های ۲۸ روزه مشاهده شد.



شکل ۱۴: تغییرات C نمونه‌های تثبیت شده و همچنین مسلح شده به الیاف کف تحت اثر زمان عمل آوری



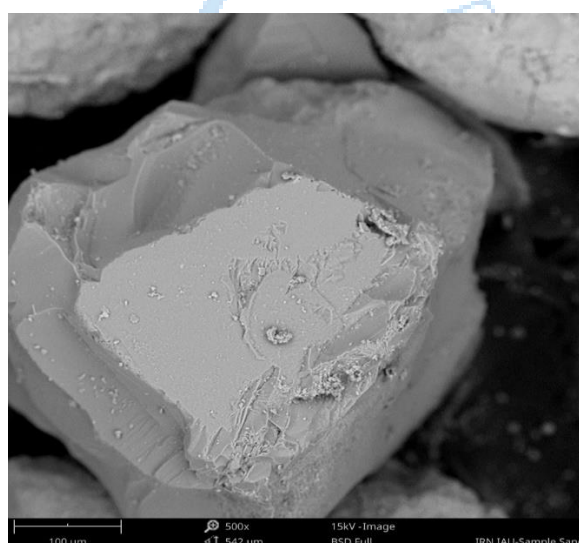
شکل ۱۵: تغییرات phi نمونه‌های تثبیت شده و همچنین مسلح شده به الیاف کف تحت اثر زمان عمل آوری



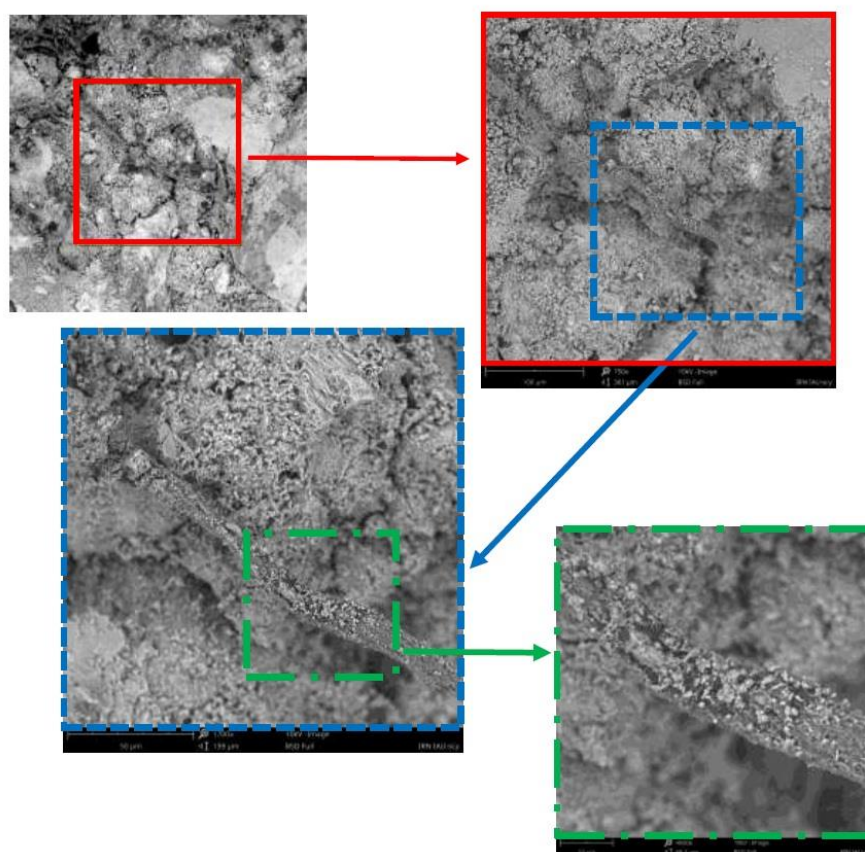
شکل ۱۶: تغییرات برش گسیختگی نمونه‌های تثبیت‌شده و همچنین مسلح‌شده به الیاف کف تحت اثر زمان عمل‌آوری

۴-۴- بررسی ریزساختاری

شکل ۱۷ نمای تهیه‌شده از میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM) از خاک ماسه را نشان می‌دهد. همچنین، تصاویر ریزساختاری نمونه‌ی بهینه تثبیت‌شده و حاوی الیاف کف در شکل ۱۸ نشان داده شده است. با توجه به تصاویر قابل درک است که افزودن سیمان و ژئولیت منجر به تشکیل ژل چسبنده (کلسیم-سیلیکات-هیدرات) و کاهش تخلخل می‌شود. بعلاوه، در تصاویر شکل ۱۸ به وضوح نشان داده شده است که الیاف بین ماسه و مواد سیمانی در اندرکنش بوده و عاملی برای انتقال نیرو بر روی سطوح دارای ترک است. الیاف به دلیل داشتن استحکام کششی قابل توجه کشیده شده‌اند اما پاره نشده‌اند و این امر سهم بسزایی در انسجام فاز جامد نمونه در لحظه گسیختگی و یکپارچه نگاه‌داشتن ذرات و افزایش استحکام کششی و برشی دارد.



شکل ۱۷: تصویر SEM از خاک ماسه



شکل ۱۸: تصاویر SEM از نمونه‌ی تثبیت‌شده‌ی حاوی الیاف کنف

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی تاثیر ماسه تثبیت‌شده با سیمان، ژئولیت و حاوی الیاف کنف بر رفتار مقاومتی خاک ماسه‌ای پرداخته شد. به این جهت، آزمون‌های آزمایشگاهی مقاومت فشاری محصورنشده و برش مستقیم برای ارزیابی خواص مقاومتی خاک ماسه‌ای تقویت‌شده با سیمان، ژئولیت و الیاف کنف انجام گردیده است. نتایج زیر خلاصه موارد حاصل از پژوهش حاضر است:

- ۱- مقدار UCS نمونه‌های ماسه تقویت‌شده با هر مقدار سیمان با افزودن الیاف کنف به طور موثر را افزایش پیدا می‌کند.
- ۲- افزایش مقدار الیاف از ۰/۵٪ به ۱٪ منجر به بیشتر شدن UCS نمونه‌های تقویت‌شده گردید.
- ۳- اما تاثیر منفی افزایش الیاف به ۱/۵٪ بر مقاومت نمونه‌ها مشهود بود.
- ۴- بهبود قابل توجه UCS نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان و نمونه‌های با ۳۰٪ جایگزین ژئولیت هنگام با افزایش طول الیاف از ۵ میلی‌متر به ۱۰ میلی‌متر مشهود بود.
- ۵- بهبود قابل توجه UCS نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان و نمونه‌های با ۳۰٪ جایگزین ژئولیت هنگام با افزایش طول الیاف از ۵ میلی‌متر به ۱۰ میلی‌متر مشهود بود. اما افزایش بیشتر طول الیاف از ۱۰ به ۱۵ میلی‌متر سبب کاهش UCS نمونه‌ها گردید.
- ۶- دستیابی به بالاترین مقدار UCS هنگام افزایش جایگزینی ژئولیت از ۱۰٪ به ۳۰٪ موجب حاصل گردید. اما بیشتر شدن جایگزینی ژئولیت تا ۵۰٪ موجب کاهش UCS در مقایسه با نمونه با جایگزینی ۳۰٪ شد.
- ۷- مقدار E ۵۰E نمونه‌ها هنگام افزودن الیاف به طور کلی کاهش یافت.

- ۸- افزایش مقدار الیاف از ۰/۵٪ به ۱٪ سبب بروز یک رویه افزایشی در E۵۰ نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان و زئولیت گردید و در ادامه، افزایش محتوای الیاف تا ۱/۵٪ روندی کاهشی در E۵۰ نمونه‌ها نسبت به نمونه با ۱٪ الیاف به وجود آورد.
- ۹- افزایش E۵۰ نمونه‌ها را هنگام افزایش طول الیاف از ۵ به ۱۰ میلی‌متر مشهود بود. اما با افزایش بیشتر آن به ۱۵ میلی‌متر، کاهش در مقدار E۵۰ مشاهده شد.
- ۱۰- پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، اضافه‌کردن ۸٪ سیمان سبب افزایش قابل‌ملاحظه مقدار C و ϕ نمونه تثبیت‌شده شد. جایگزینی سیمان با زئولیت و افزایش آن تا ۳۰ درصد هم موجب افزایش بیشتر مقدار C و ϕ نمونه‌های تثبیت‌شده گردید.
- ۱۱- افزودن الیاف کنف تا ۰/۵٪ سبب بهبود C و ϕ نمونه‌های ماسه پایه و همچنین تثبیت‌شده گردید. افزایش مقدار الیاف تا ۱٪ موجب به‌دست‌آمدن بیشترین مقدار پارامترهای برشی نمونه‌های تسلیح‌شده گردید. اما، افزایش تا ۱/۵٪ مقدار الیاف سبب بروز اثر کاهشی بر مقاومت برشی خاک شد.
- ۱۲- وجود الیاف با طول ۵ میلی‌متر در نمونه‌ها سبب بالارفتن و پارامترهای مقاومت برشی نسبت به نمونه‌های بدون الیاف گردید. بیشترشدن پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های حاوی الیاف کنف با بیشترشدن طول الیاف از ۵ میلی‌متر به ۱۰ میلی‌متر رویت شد. اما، بیشترشدن طول الیاف تا ۱۵ میلی‌متر موجب کم‌شدن مقاومت برشی نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف گردید.
- ۱۳- افزایش بار عمودی بر نمونه‌های برش مستقیم از ۵۰ تا ۲۰۰ کیلوپاسکال موجب بیشترشدن تنش گسیختگی در نمونه‌ی ارتقاءیافته گردید.
- ۱۴- بیشترشدن زمان عمل‌آوری از ۲۸ به ۵۶ روز تاثیر مشهودی بر چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و تنش گسیختگی نمونه‌های بهبودیافته گذاشت.
- ۱۵- تاثیر تقویتی حضور مواد تثبیت‌کننده سیمان و زئولیت و همچنین الیاف کنف در تصاویر ریزساختار نمونه‌ی بهینه قابل مشاهده بود.

مراجع

- [1] Das, B.M. and Sobhan, K. (2013) *Principles of Geotechnical Engineering*. 8th Edition, CL Engineering, Ad Dikwani.
- [2] Ghadakpour, M., Choobasti, A.J., Kutanaei, S.S., (2020). Investigation of the Kenaf fiber hybrid length on the properties of the cement-treated sandy soil. *Transp. Geotech.* 22, 100-301. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100301>
- [3] Consoli, N.C., Festugato, L., Heineck, K.S., (2009). Strain-hardening behaviour of fibre-reinforced sand in view of filament geometry. *Geosynth. Int.* 16, 109–115. <https://doi.org/10.1680/gein.2009.16.2.109>
- [4] Kumar, A., Walia, B.S., Bajaj, A., (2007). Influence of Fly Ash, Lime, and Polyester Fibers on Compaction and Strength Properties of Expansive Soil. *J. Mater. Civ. Eng.* 19, 242–248. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2007\)19:3\(242\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2007)19:3(242))
- [5] Schnaid, F., Prietto, P.D.M., Consoli, N.C., (2001). Characterization of cemented sand in triaxial compression. *J. Geotech. geoenvironmental Eng.* 127, 857–868.
- [6] Thomas, B.S., (2018). Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material – A comprehensive review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82, 3913–3923. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.081>
- [7] Ghadakpour, M., Choobasti, A.J., Soleimani, S., (2019a). Investigation of the deformability properties of fiber reinforced cemented sand. *J. Adhes. Sci. Technol.* 0, 1–26. <https://doi.org/10.1080/01694243.2019.1619224>
- [8] Apampa, O.A., (2019). Environmental benefits of corn cob ash in lateritic soil cement stabilization for road works. *African J. Sci. Technol. Innov. Dev.* 11, 427–431. <https://doi.org/10.1080/20421338.2017.1399533>
- [9] Cokca, E., 2001. Use of Class C Fly ashes for the Stabilization of an Expansive Soil. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 127(7), 568–573.
- [10] Hatmoko, J.T., Suryadharma, H., (2017). Shear Behavior of Calcium Carbide Residue - Bagasse Ash Stabilized Expansive Soil. *Procedia Eng.* 171, 476–483. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.359>

- [11] Khadka, S.D., Jayawickrama, P.W., Senadheera, S., Segvic, B., (2020). Stabilization of highly expansive soils containing sulfate using metakaolin and fly ash based geopolymer modified with lime and gypsum. *Transp. Geotech.* 23, 100-327. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100327>
- [12] Kordnaeij, A., Moayed, R.Z., Soleimani, M., (2019). Unconfined compressive strength of loose sandy soils grouted with zeolite and cement. *Soils Found.* 59, 905-919. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.03.012>
- [13] MolaAbasi, H., Khajeh, A., Semsani, S.N., Kordnaeij, A., (2019). Prediction of Zeolite-Cemented Sand Tensile Strength by GMDH type Neural Network. *J. Adhes. Sci. Technol.* 33, 1611-1625. <https://doi.org/10.1080/01694243.2018.1493020>
- [14] Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C., Lin, Z.S., (1999). A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes. *Constr. Build. Mater.* 13, 427-432. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(99\)00048-3](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(99)00048-3)
- [15] Ghavami, S., Farahani, B., Jahanbakhsh, H., & Moghadas Nejad, F. (2018). Effects of silica fume and nano-silica on the engineering properties of kaolinite clay. *AUT Journal of Civil Engineering*, 2(2), 135-142. <https://doi.org/10.22060/ajce.2018.14203.5462>
- [16] Mohamed, A.E.M.K., (2013). Improvement of swelling clay properties using hay fibers. *Constr. Build. Mater.* 38, 242-247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.031>
- [17] Tang, C.S., Li, J., Wang, D.Y., Shi, B., (2016). Investigation on the interfacial mechanical behavior of wave-shaped fiber reinforced soil by pullout test. *Geotext. Geomembranes.* 44, 872-883. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2016.05.001>
- [18] Tran, K.Q., Satomi, T., Takahashi, H., (2018). Effect of waste cornsilk fiber reinforcement on mechanical properties of soft soils. *Transp. Geotech.* 16, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.07.003>
- [19] Liu, J., Bai, Y., Song, Z., Kanungo, D.P., Wang, Y., Bu, F., Chen, Z., Shi, X., (2020). Stabilization of sand using different types of short fibers and organic polymer. *Constr. Build. Mater.* 253, 119-164. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119164>
- [20] ASTM International, (1998). ASTM D422-63 - (Reapproved 2007) *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.* *ASTM Int.* 63, 1-8. <https://doi.org/10.1520/D0422-63R07E02.2>
- [21] ACI, (2009). American Concrete Institute - *Report on Soil Cement, Byulleten Eksperimentalnoi Biologii i Meditsiny.*
- [22] Akil, Hm., Omar, M.F., Mazuki, A.A.M., Safiee, S., Ishak, Z.A.M., Bakar, A.A., (2011). Kenaf fiber reinforced composites: A review. *Mater. Des.* 32, 4107-4121.
- [23] ASTM D698 - 12, (2012). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)).* *ASTM Int.* 3, 1-13. <https://doi.org/10.1520/D0698-12E01.1>
- [24] ASTM, (2013). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil 1. *ASTM Int.* i, 1-7. <https://doi.org/10.1520/D2166>
- [25] ASTM, (2007). Standard Practice for Making and Curing Soil-Cement Compression and Flexure Test Specimens in the Laboratory. *Annu. B. ASTM Stand.* i, 1-7. <https://doi.org/10.1520/D1632-07.2>
- [26] D3080, A.S. for testing and M. (ASTM), 2011. 3080-03 (2003) Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions (D 3080-03). *Annu. B. ASTM Stand.* 04, 1-7.
- [27] Janalizadeh Choobbasti, A., Soleimani Kutanaei, S., (2017). Effect of fiber reinforcement on deformability properties of cemented sand. *J. Adhes. Sci. Technol.* 31, 1576-1590. <https://doi.org/10.1080/01694243.2016.1264681>
- [28] Ghadakpour, M., Janalizadeh Choobbasti, A., Soleimani Kutanaei, S., (2019b). Investigation of the deformability properties of fiber reinforced cemented sand. *J. Adhes. Sci. Technol.* 33, 1913-1938. <https://doi.org/10.1080/01694243.2019.1619224>
- [29] Ahmadi, H., Hamid, S., Molaabasi, H., Zeighami, E., (2020.) The effect of zeolite and cement stabilization on the mechanical behavior of expansive soils. *Constr. Build. Mater.* c, 121630. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121630>
- [30] Mola-Abasi, H., Kordtabar, B., Kordnaeij, A., (2017). Parameters controlling strength of zeolite-cement-sand mixture. *Int. J. Geotech. Eng.* 11, 72-79. <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1186412>

- [31] Claria, J. J., & Vettorelo, P. V. (2016). Mechanical behavior of loose sand reinforced with synthetic fibers. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 53(1), 12-18. <https://doi.org/10.1007/s11204-016-9357-9>
- [32] Dhar, S., Hussain, M., (2019). The strength behaviour of lime-stabilised plastic fibre-reinforced clayey soil. *Road Mater. Pavement Des.* 20, 1757–1778. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1468803>
- [33] Cui, H., Jin, Z., Bao, X., Tang, W., Dong, B., (2018). Effect of carbon fiber and nanosilica on shear properties of silty soil and the mechanisms. *Constr. Build. Mater.* 189, 286–295. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.181>
- [34] Pradhan, P.K., Kar, R.K., Naik, A., (2012). Effect of Random Inclusion of Polypropylene Fibers on Strength Characteristics of Cohesive Soil. *Geotech. Geol. Eng.* 30, 15–25. <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9445-6>
- [35] Yetimoglu, T., Salbas, O., (2003). A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers. *Geotext. Geomembranes.* 21, 103–110. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(03\)00003-7](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(03)00003-7)

