

Experimental investigation of the behavior of cemented-clay specimen reinforced with geotextile layers

Iman Hosseinpour Babaei^{1*}, Reza Rezvani Toochahi², Mahdi Kavoshmelli³

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Guilan, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, University of Guilan (Eastern Campus), Rudsar, Guilan, Iran.

3- MSc graduated, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Guilan, Iran.

ABSTRACT

This paper experimentally examines the effect of geotextile layers on the undrained behaviour of cement-stabilized clay specimens using unconfined compressive strength (UCS) tests. Accordingly, the low-plasticity clay specimens were remolded in three different moisture contents, including optimum moisture content and two other ones corresponding to 90% relative compaction. The clay specimens were also stabilized by cement with various percentages equal to 3, 5, and 7% of the dry weight of the soil. The stabilized clay specimens were then cured in 7, 14, and 21 days prior to performing the unconfined compressive tests. In order to investigate the effect of reinforcement type, the stabilized clay specimens were reinforced with two types of non-woven geotextiles with different values of tensile stiffness. Results of experiments showed that reinforcing cemented-clay specimens with geotextile sheets improves the mechanical properties such as maximum compressive strength, residual strength, and rupture strain of reinforced specimens compared to unreinforced ones. The greatest increase in compressive strength occurred in specimens reinforced with three geotextile layers, which had an average 37% increase in strength compared to non-reinforced specimens. The comparison between reinforced specimens with two different geotextiles showed that increasing the tensile strength of the geotextile increases the compressive strength, rupture strain, and residual stress of the reinforced specimens.

ARTICLE INFO

Receive Date: 16 October 2022

Revise Date: 04 December 2022

Accept Date: 05 January 2023

Keywords:

Geotextile

Cement stabilization

Clay

Unconfined compressive test

Reinforced soil

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.365452.2949>

*Corresponding author: Iman Hosseinpour.

Email address: Imanhp@guilan.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی رفتار رس تثبیت شده با سیمان و مسلح شده با ورقه های

ژئوتکستایل

ایمان حسین پور بابائی^{۱*}، رضا رضوانی توچاهی^۲، مهدی کاوش ملی^۳

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی شرق، دانشگاه گیلان، رودسر، ایران.

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیده

تثبیت و تسلیح خاکها از جمله روشهای مرسوم بهسازی انواع خاکهای مسئله دار همچون خاکهای رسی نرم می باشد. این پژوهش به بررسی تاثیر ورقه های ژئوتکستایل بر رفتار زهکشی نشده نمونه های رسی تثبیت شده با سیمان با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده می پردازد. نمونه های خاک رس در سه درصد رطوبت مختلف شامل درصد رطوبت بهینه (بدست آمده از آزمایش تراکم استاندارد) و درصد رطوبت های متناظر با تراکم نسبی ۹۰٪ در سمت تر و خشک رطوبت بهینه آماده شدند. نمونه ها با درصدهای مختلف سیمان شامل ۳، ۵ و ۷ درصد وزن خشک خاک تثبیت شده و در سه زمان عمل آوری شامل ۷، ۱۴ و ۲۱ روز تحت آزمایش تک محوری قرار گرفتند. به منظور بررسی تاثیر نوع تسلیح کننده، نمونه های رسی تثبیت شده با سیمان با دو نوع ژئوتکستایل بافته نشده با سختی کششی مختلف و سه حالت گوناگون یک لایه، دو لایه و سه لایه تسلیح شدند. نتایج نشان داد که تسلیح نمونه های رسی سیمانی شده با ورقه های ژئوتکستایل، باعث بهبود بیشتر مشخصه های مکانیکی از قبیل مقاومت فشاری، مقاومت باقیمانده و کرنش گسیختگی نمونه های مسلح نسبت به نمونه های غیرمسلح می شود. بیشترین افزایش مقاومت، در نمونه های مسلح شده با سه لایه ژئوتکستایل رخ داد که به طور متوسط ۳۷ درصد افزایش مقاومت نسبت به نمونه های مسلح نشده را داشتند. همچنین بر اساس نتایج به دست آمده، استفاده از ژئوتکستایل منجر به کاهش سختی و افزایش شکل پذیری نمونه های تثبیت شده گردیده و مانع انتشار بیشتر ترک های ایجاد شده در نمونه های خاک می شود.

کلمات کلیدی: ژئوتکستایل، تثبیت با سیمان، رس، مقاومت تک محوری، خاک مسلح

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۴۰۱/۰۷/۲۷	۱۴۰۱/۰۹/۱۳	۱۴۰۱/۱۰/۱۵	۱۴۰۱/۱۰/۱۵	۱۴۰۲/۰۷/۳۰	https://doi.org/10.22065/jsce.2023.365452.2949
*نویسنده مسئول:		ایمان حسین پور			
پست الکترونیکی:		imanhp@guilan.ac.ir			

۱- مقدمه

در اجرای پروژه‌های مهندسی عمران گاهی با خاک‌هایی مواجه می‌شویم که ظرفیت تحمل بار وارده از طرف سازه را به صورت طبیعی در حین ساخت و بهره‌برداری ندارند [۱]. یکی از دلایل اصلی وقوع گسیختگی در این خاک‌ها، مقاومت فشاری و کششی پایین آن‌هاست. همچنین تغییر خصوصیات مکانیکی خاک‌های مسئله‌دار مانند خاک‌های رسی در هنگام قرارگیری در معرض رطوبت هم می‌تواند از طریق انبساط جانبی و کاهش شدید مقاومت، باعث بروز چنین مشکلاتی شود. روش‌های مختلفی برای رفع این مشکلات خاک‌های مسئله‌دار وجود دارد که انتخاب آن‌ها بر اساس کاربری مناسب و همچنین هزینه بهینه صورت می‌پذیرد. به‌عنوان مثال جایگزینی خاک پروژه در صورت دور بودن قرضه از محل اجرا غیراقتصادی است [۲]. در چنین شرایطی استفاده از روش‌های دیگر مانند تثبیت شیمیایی و تسلیح توسط ژئوسنتتیک‌ها برای بهسازی خاک بسیار اقتصادی‌تر می‌باشد.

تثبیت شیمیایی که در واقع یک ترکیب از چند ماده با خواص مختلف می‌باشد، اغلب توسط مواد پوزولانی نظیر آهک و سیمان صورت می‌پذیرد که موجب افزایش ظرفیت باربری می‌شوند [۷-۳]. سیمان موجب افزایش مدول الاستیسیته خاک شده و همچنین زمان گیرش آن، تاثیر قابل‌ملاحظه‌ای روی مقاومت فشاری محصورنشده می‌گذارد [۸، ۹]. از طرفی دیگر رطوبت موجود در خاک تثبیت‌شده با سیمان بر روی مقاومت نهایی به‌دست‌آمده موثر است [۱۰]. افزودن سیمان بیش‌ازحد به خاک مسئله‌دار برای دستیابی به مقاومت فشاری و کششی بیشتر، موجب افزایش حرارت هیدراسیون شده و ممکن است در پی آن ترک‌های ریز ناشی از انقباض ایجاد گردد. این ترک‌های ریز در شرایط بارگذاری گسترش پیدا کرده و باعث به‌وجود آمدن ترک‌های بزرگتر می‌شوند و در نتیجه مقاومت کششی و شکل‌پذیری خاک را کاهش می‌دهند [۱۱]. از زمان‌های بسیار دور برای جلوگیری از ایجاد این ترک‌های ریز، خاک را توسط الیاف فولادی تسلیح می‌نمودند. اما به دلیل وجود رطوبت فراوان و همچنین کلرید در خاک که باعث خوردگی فولاد می‌شود، امروزه استفاده از آن‌ها محدود گشته‌است [۱۲]. از این رو، پیدا کردن جایگزین مناسب غیرخورنده برای افزایش مقاومت کششی خاک به جای الیاف فولادی دارای اهمیت زیادی است.

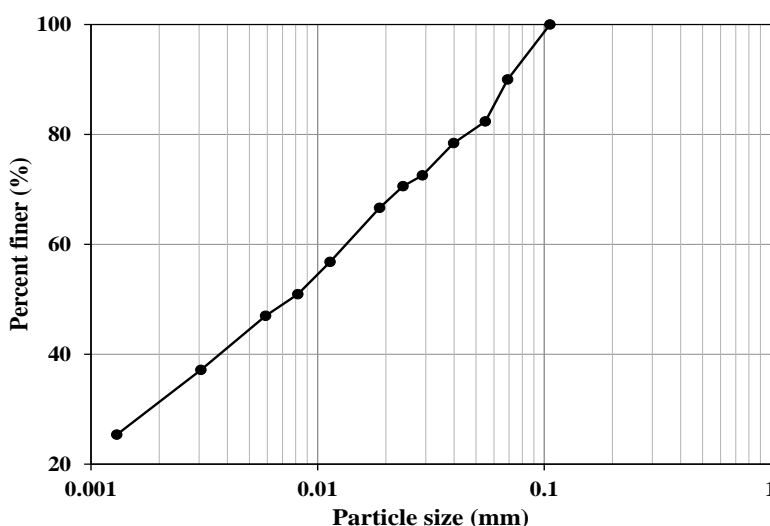
یکی از این مصالح غیرخورنده که از سال ۱۹۷۰ مورد استفاده قرار می‌گیرند، ژئوتکستایل‌ها هستند. ژئوتکستایل‌ها دارای کاربردهای چندمنظوره نظیر جداسازی، فیلتراسیون، زهکشی، آب‌بندی و تسلیح می‌باشند [۱۳-۱۵]. تسلیح خاک توسط ژئوتکستایل‌ها علاوه بر افزایش مقاومت نهایی خاک و کرنش گسیختگی، موجب بهبود رفتار تنش-کرنش خاک هم می‌شود [۱۶-۲۰]. نوع، سختی، تعداد و فاصله بین لایه‌های ژئوتکستایل بر افزایش مقاومت نهایی، شکل‌پذیری و همچنین تغییر شکل گسیختگی موثر هستند [۲۱-۲۳]. شوش‌پاشا و تجاتی‌نمین [۲۴] با استفاده از آزمایش سه‌محوری زهکشی‌نشده، به بررسی رفتار ماسه ساحلی خزر تثبیت‌شده با سیمان و تسلیح‌شده با رشته‌های الیاف پلی‌وینیل‌الکل پرداختند. نتایج تحقیقات نشان داد که افزودن مواد تسلیح‌کننده موجب افزایش تنش گسیختگی و کاهش تمایل به اتساع می‌گردد. افزایش تعداد لایه‌های مسلح‌کننده ژئوتکستایل در خاک‌های رسی منجر به افزایش مقاومت برشی و فشار آب حفره‌ای در لحظه گسیختگی می‌شود [۲۵]. همچنین نتایج آزمایش تراکم روی خاک رس مسلح با ژئوتکستایل نشان داد که افزایش تعداد لایه‌های مسلح‌کننده باعث افزایش چگالی خاک بدون تغییر در مقدار درصد رطوبت بهینه می‌شود [۲۶].

مطالعات نشان داده‌است که افزودن سیمان باعث افزایش سختی و افزودن مسلح‌کننده منجر به کاهش سختی نمونه خاک می‌گردد [۲۷]. مجموع مقاومت به‌دست‌آمده از تسلیح و تثبیت خاک به‌صورت جداگانه، کمتر از مقاومتی می‌باشد که این دو عمل در کنار هم ایجاد می‌کنند. زیرا مواد سیمانی به عنوان یک ماده چسبنده باعث چسبندگی بیشتر بین ذرات خاک و الیاف می‌شوند و همچنین الیاف هم به دلیل اثر پل‌زدگی مانع ایجاد و یا گسترش ترک‌های کششی می‌شود [۲۸]. تسلیح خاک‌های تثبیت‌شده با مواد پوزولانی باعث افزایش مقاومت فشاری محصورنشده، مقاومت برشی و کرنش محوری گسیختگی می‌شود. افزودن لایه‌های ژئوتکستایل منجر به افزایش تنش انحرافی، مدول الاستیسیته و پارامترهای مقاومت برشی زهکشی‌نشده خاک می‌گردد. همچنین قرارگیری ژئوتکستایل‌ها در قسمت میانی که بیشترین تنش و کرنش را تحمل می‌کند مقاومت حداکثر را افزایش می‌دهند. شکست در چنین نمونه‌هایی به‌صورت برجسته رخ می‌دهد بدین صورت که خاک بین لایه‌های ژئوتکستایل برجسته می‌شود. دلیل این امر جلوگیری از انبساط جانبی نمونه‌ها به‌خاطر لایه‌های ژئوتکستایل است [۲۹، ۳۰].

تاکنون، تحقیقات بسیار زیادی در زمینه رفتار مکانیکی خاک‌های ریزدانه رسی تثبیت‌شده با سیمان و همچنین تسلیح آن‌ها با ورقه‌های ژئوتکستایل به صورت جداگانه صورت پذیرفته است. با این وجود مطالعات اندکی به بررسی رفتار مقاومتی خاک‌های ریزدانه تحت اثر هم‌زمان تثبیت با سیمان و لایه‌های ژئوتکستایل پرداخته‌اند. همچنین بافت خاک‌های رسی می‌تواند تاثیر به‌سزایی در شرایط رفتاری داشته و عملکرد روش‌های بهسازی را تحت الشعاع قرار دهد. به همین منظور در این پژوهش سعی بر آن است که با استفاده از نتایج آزمایش‌های تک‌محوری به بررسی و تشریح نقش لایه‌های تسلیح‌کننده ژئوتکستایل بر رفتار مقاومتی رس تثبیت‌شده با سیمان در شرایط عمل-آوری و رطوبت‌های مختلف پرداخته شود و به نوعی با آماده‌سازی نمونه‌های خاک رس در سمت تر و خشک رطوبت بهینه، تاثیر بافت روی عملکرد و رفتار خاک مورد بررسی قرار گیرد.

۲- مشخصات مصالح و نمونه‌سازی

خاک رس مورد استفاده در پژوهش حاضر از منطقه سراوان در نزدیکی شهر رشت استان گیلان تامین شده است که منحنی دانه بندی آن در شکل ۱ ارائه شده است. بر اساس منحنی توزیع ذرات و همینطور نتایج آزمایشات شاخص ارائه شده در جدول ۱، خاک رس مورد نظر به عنوان CL در سیستم طبقه بندی متحد نام گذاری میشود. علاوه بر این نتایج آزمایشات شیمیایی صورت گرفته بر روی نمونه خاک رس مورد نظر دلالت بر این دارد که کانی رس عمدتاً از اکسید سیلیسیم SiO_2 و اکسید آلومینیوم Al_2O_3 تشکیل شده است. جدول ۲ درصد سایر عناصر تشکیل دهنده کانی رس مورد استفاده را به ترتیب فراوانی نشان میدهد.



شکل ۱: منحنی توزیع ذرات خاک رس مورد استفاده

جدول ۱: مشخصات شاخص خاک رس

مقدار	ویژگی‌ها
۴۴	حد روانی (I _p)
۲۶٫۵	حد خمیری (I _c)
۱۷٫۵	دامنه خمیری (I _p)
۲۱	رطوبت بهینه (I _p)
۱٫۶۲	جرم مخصوص خشک حداکثر (gr/cm^3)
۲٫۷۲	چگالی ویژه (G_s)
CL	طبقه‌بندی (متحد)

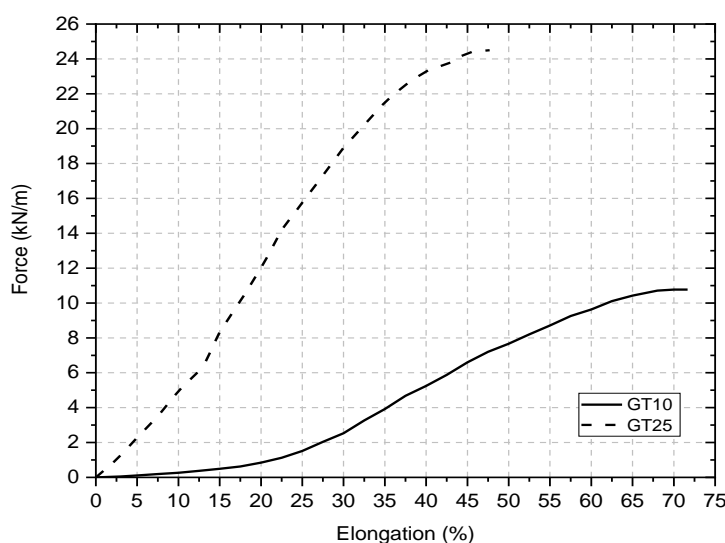
جدول ۲: عناصر تشکیل دهنده خاک رس مورد مطالعه بر اساس آنالیز شیمیایی

درصد تشکیل دهنده	ترکیب شیمیایی
۴۶,۷	اکسید سیلیسیم SiO_2
۱۸,۶	اکسید آلومینیوم Al_2O_3
۱۴,۳	اکسید آهن Fe_2O_3
۱۰,۹	اکسید کلسیم CaO
۷,۶	اکسید منیزیم MgO
۱,۹	انیدرید کربنیک CO_2

به منظور بررسی اثر تسلیح در این پژوهش، از دو نوع ژئوتکستایل بافته نشده پلی پروپیلن با مشخصات مکانیکی متفاوت استفاده گردید. لازم به ذکر است که آزمایش کشش عریض بر روی نمونه های ژئوتکستایل به ابعاد 10×20 سانتیمتر صورت گرفت و مشخصات مکانیکی آنها از قبیل مقاومت کششی و سختی کششی ژئوتکستایلها تعیین گشت. شکل ۲ منحنی بار-کش آمدگی ژئوتکستایلهای مورد استفاده در این پژوهش را نشان میدهد. بر این اساس و با توجه به مقاومت کششی نهایی برابر با ۱۰,۷ و ۲۴,۵ کیلونیوتن بر متر، ژئوتکستایلهای مورد استفاده به ترتیب GT10 و GT25 نام گذاری شده اند. جدول سایر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ژئوتکستایل های مورد استفاده را نشان می دهد. همچنین سیمان تپ دو شرکت سیمان خزر برای تثبیت خاک به کار گرفته شده است.

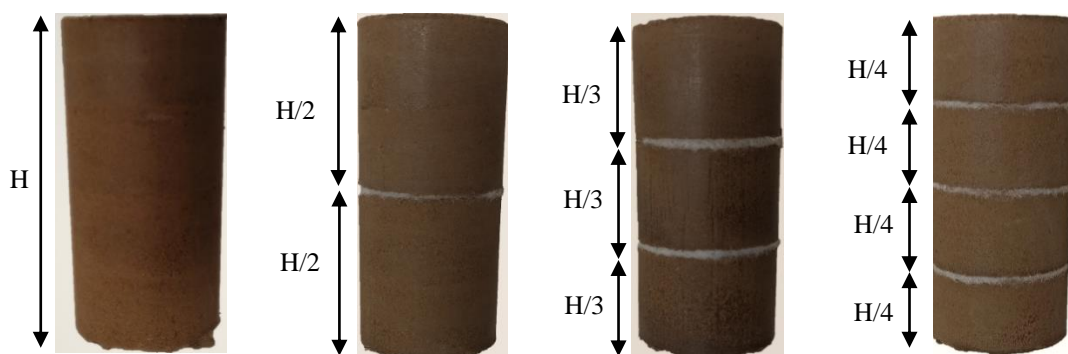
جدول ۳: مشخصات مکانیکی ژئوتکستایلها

GT25	GT10	نوع ژئوتکستایل
۵۰۰	۲۵۰	جرم واحد سطح (gr/m^2)
۴,۲	۲,۱	ضخامت (mm)
۲۴,۵	۱۰,۷	مقاومت کششی نهایی (kN/m)
۵۵,۴	۱۵,۷	سختی کششی (kN/m)
۸۵	۱۱۰	نفوذپذیری در واحد سطح ($l/m^2/s$)
۲۷۰۰	۱۴۰۰	مقاومت در برابر سوراخ شدگی (N)
۰,۱۵	۰,۲۱	قطر روزنه (mm)



شکل ۲: منحنی بار-کش آمدگی ژئوتکستایلهای مورد استفاده در این پژوهش

به منظور بررسی تاثیر درصد رطوبت و تراکم نسبی بر رفتار نمونه رسی تثبیت شده با سیمان و مسلح شده با ژئوتکستایل، خاک رس خشک رده شده از الک نمره ۴۰ در سه رطوبت مختلف شامل رطوبت بهینه ۲۱ درصد، رطوبت سمت خشک ۱۶ درصد و رطوبت سمت تر ۲۶ درصد آماده شدند. نمونه های دارای رطوبت بهینه در وزن مخصوص خشک بیشینه و نمونه های دارای رطوبت سمت خشک و تر، در تراکم نسبی ۹۰ درصد (بر اساس آزمایش تراکم استاندارد) آماده سازی شدند. برای اطمینان از همگن بودن نمونه، مخلوط خاک رس مرطوب به مدت ۲۴ ساعت در داخل کیسه های پلاستیکی دولایه غیرقابل نفوذ نگهداری شد تا از تبادل رطوبتی آن با محیط بیرون جلوگیری شود، سپس با ۳، ۵ و ۷ درصد وزن خشک خاک، توسط سیمان تثبیت گشت. نمونه سازی جهت انجام آزمایش فشاری محصور نشده، در قالب استوانه ای شکل فلزی به قطر ۳۸ میلی متر و ارتفاع ۱۱۰ میلی متر انجام شد. در ابتدا وزن مشخصی از خاک تثبیت شده که بیانگر درصد تراکم مورد نظر می باشد، در قالب استوانه ای ریخته شده و عملیات تراکم با اعمال فشار استاتیکی توسط جک هیدرولیکی به خاک رس مرطوب صورت گرفته است. نمونه های مسلح شده با دولایه ژئوتکستایل در سه لایه و سایر نمونه ها در چهار لایه مساوی داخل قالب ریخته شد. سپس هر لایه پس از کارگذاری ژئوتکستایل در تراز مورد نظر تحت تراکم استاتیکی قرار گرفت. در ادامه برای جلوگیری از تبخیر و از دست دادن رطوبت نمونه ها در زمان عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۱ روز، از دولایه نایلون استفاده شد و نمونه ها درون این لایه محافظتی نگهداری شدند. پس از آن نمونه های آماده شده تحت آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده قرار گرفتند. در مجموع در این پژوهش ۲۱۰ آزمایش تک محوری بر روی نمونه های خاک رس در شرایط مختلف انجام گردید. از این میان تعداد ۳۰ نمونه در حالت غیرمسلح و ۱۸۰ نمونه در شرایط مسلح شده (با دو نوع ژئوتکستایل و در ۳ حالت تک لایه، دولایه و سه لایه) ساخته شدند. همچنین تعداد ۲۱ نمونه در حالت تثبیت نشده و ۱۸۹ نمونه در حالت تثبیت شده با سیمان (با درصد وزنی ۳، ۵ و ۷٪ سیمان) بودند. تمامی آزمایش ها تحت شرایط کرنش-کنترل و با نرخ اعمال تغییر شکل ۳ میلی متر بر دقیقه صورت گرفت که پایین تر از حداکثر نرخ کرنش پیشنهادی استاندارد می باشد. آزمایش تا زمانی ادامه یافت که نمونه به گسیختگی برسد یا مقدار کرنش محوری از ۱۵ درصد تجاوز کند. شکل ۳ محل قرارگیری ژئوتکستایل را در نمونه های تسلیم شده نشان می دهد.



شکل ۳: محل قرارگیری لایه ها در نمونه های: (الف) بدون ژئوتکستایل، (ب) تسلیم شده با یک لایه، (پ) تسلیم شده با دولایه، (ت) تسلیم شده با سه لایه ژئوتکستایل

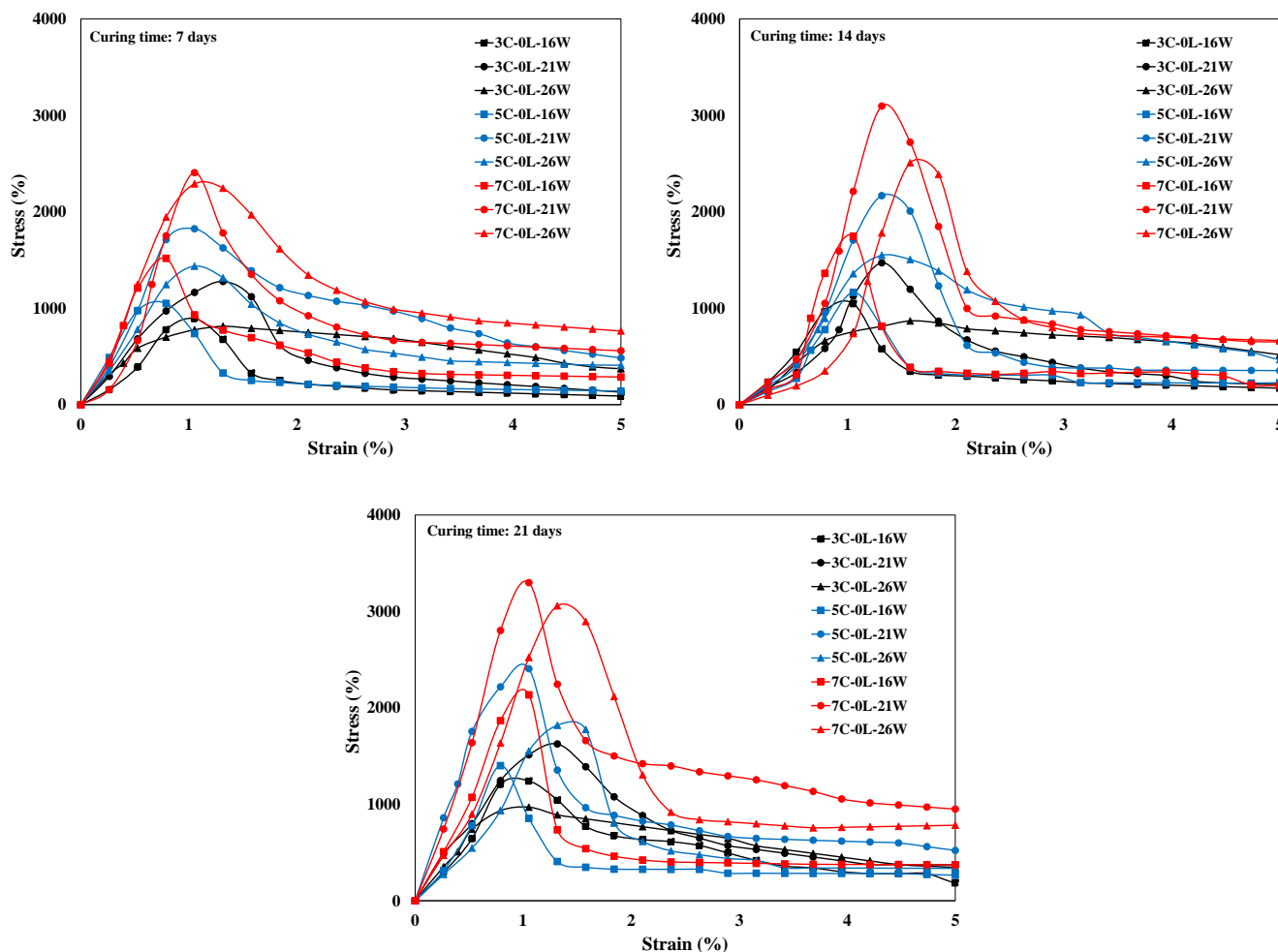
۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- مقاومت فشاری محصور نشده^۱

شکل ۴ نمودار تنش-کرنش مربوط به نمونه های تثبیت شده با درصد های مختلف سیمان بدون تسلیم کننده را نشان می دهد. همان گونه که مشخص است، افزایش درصد سیمان منجر به سخت تر شدن نمونه رسی و در نتیجه افزایش مقاومت زهکشی نشده می گردد.

^۱ Unconfined compression stress (UCS)

همچنین با افزایش عمر نمونه‌های تثبیت‌شده و پیشرفت فرآیند هیدراسیون، مقاومت نمونه‌ها افزایش می‌یابد. مقایسه منحنی‌های تنش- کرنش نمونه‌های تثبیت‌شده و تثبیت‌نشده نشان می‌دهد که سیمان باعث رفتار تردشونگی شده و کرنش گسیختگی را کاهش می‌دهد.



شکل ۴: رفتار تنش-کرنش خاک رس تثبیت‌شده با سیمان

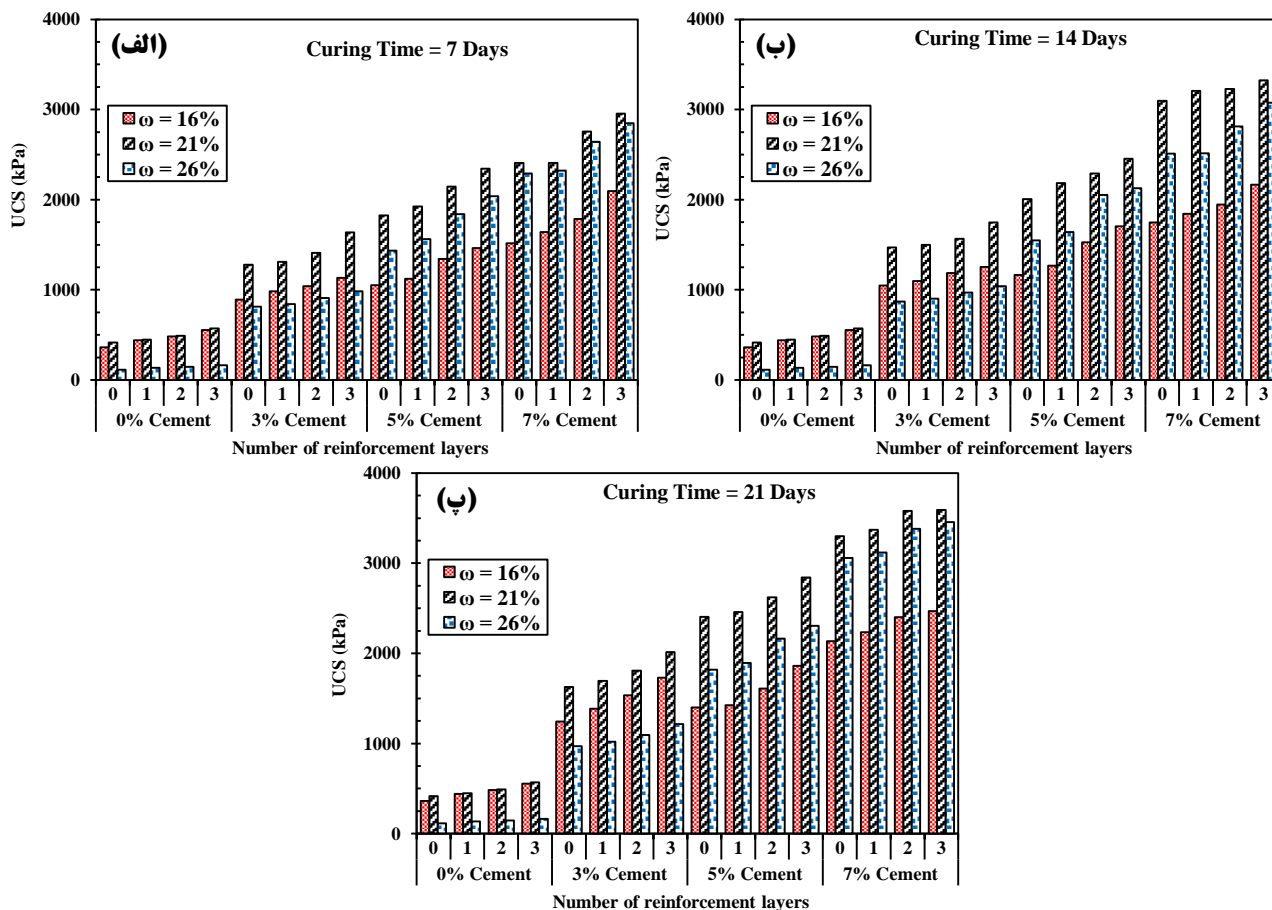
تاثیر افزودن سیمان و ورقه‌های ژئوتکستایل تسلیح‌کننده بر مقاومت فشاری محصورنشده نمونه‌های رسی برای هر دو نوع ژئوتکستایل GT10 و GT25 به ترتیب در شکل ۵ و شکل ۶ نشان داده شده است. این شکل‌ها حداکثر مقاومت برشی برای درصدی متفاوت سیمان و تعداد لایه‌های مختلف ژئوتکستایل را ارائه می‌کنند. با توجه به شکل ۵ و شکل ۶ در یک رطوبت و تعداد لایه ژئوتکستایل ثابت، با افزایش درصد سیمان، مقاومت نمونه‌های تثبیت‌شده در هر سه زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۱ روزه افزایش می‌یابد که این موضوع می‌تواند به دلیل افزایش ژل‌های سیلیکات کلسیم هیدراته^۲ حاصل از واکنش پوزولانی سیمان باشد.

بیشترین مقاومت فشاری در نمونه‌هایی که با سه لایه ژئوتکستایل مسلح‌شده بودند، حاصل شده است. به‌طور متوسط افزایش تعداد لایه‌ها از صفر به سه لایه باعث افزایش ۲۵ درصدی مقاومت فشاری در نمونه‌های تسلیح‌شده با GT10 و ۳۷ درصدی در نمونه‌های تسلیح‌شده با GT25 می‌گردد که به دلیل افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها در پی استفاده از ژئوتکستایل می‌باشد.

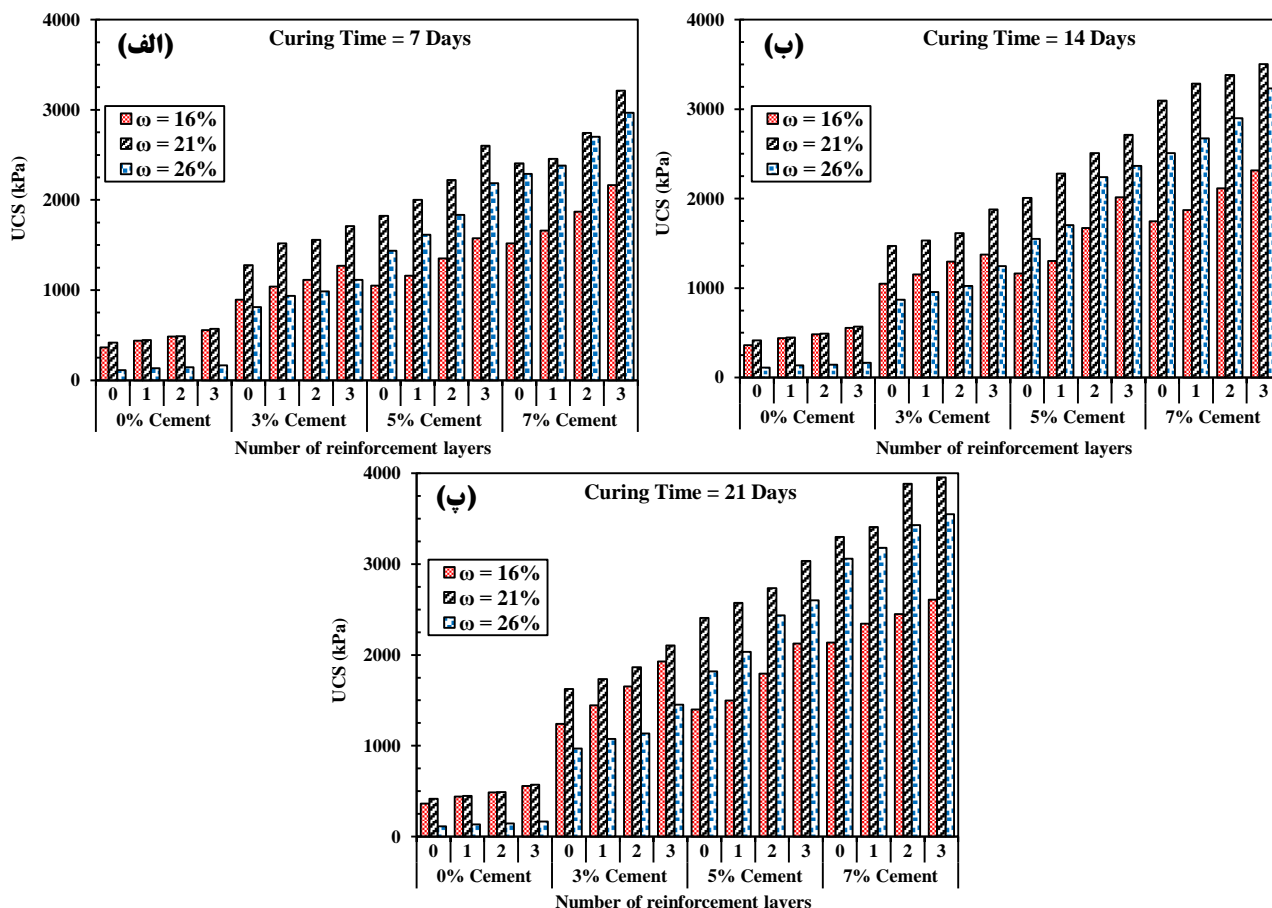
² Calcium silicate hydrate (C-S-H)

برای شرایط درصد سیمان و تعداد لایه‌های تسلیح‌کننده یکسان، با افزایش رطوبت نمونه از سمت خشک رطوبت بهینه (یعنی رطوبت ۱۶٪) به رطوبت بهینه (یعنی رطوبت ۲۱٪) مقدار مقاومت فشاری بهبود می‌یابد. با این حال، زمانی که درصد رطوبت از رطوبت بهینه به رطوبت سمت تر (یعنی رطوبت ۲۶٪) افزایش پیدا می‌کند، مقدار مقاومت فشاری نمونه‌های مسلح‌شده در درصد سیمان صفر و ۳ درصد به طرز چشم‌گیری کاهش پیدا می‌کند. در واقع تراکم نمونه‌ها در سمت تر رطوبت بهینه باعث ایجاد ساختار موازی (پراکنده) در نمونه‌های رسی و تثبیت شده با ۳٪ سیمان شده و در نتیجه قفل و بست کمتری بین ذرات خاک و روزه‌های ژئوتکستایل در درصد رطوبت‌های بالاتر از رطوبت بهینه ایجاد می‌گردد و همچنین بر اساس مشخصات پلاستیسیته خاک رس مورد استفاده، نمونه‌های با درصد رطوبت ۲۶٪، در آستانه رفتار خمیری بوده و در نتیجه شکل‌پذیری بیشتری نسبت به نمونه‌های ساخته شده با درصد رطوبت کمتر دارند. اما در درصد سیمان‌های ۵ و ۷ درصد مقاومت فشاری دچار افت کمتری نسبت به درصد سیمان صفر و ۳٪ می‌شود که به دلیل افزایش مقدار چسبندگی است که به واسطه سیمان بیشتر بین ذرات خاک و ژئوتکستایل ایجاد می‌شود. همچنین افزایش زمان عمل‌آوری نیز باعث افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌های با درصد سیمان، رطوبت و تعداد لایه‌های ژئوتکستایل ثابت می‌شود. دلیل این امر می‌تواند واکنش‌های طولانی مدت پوزولانی ناشی از افزودن سیمان به نمونه‌ها باشد.

به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت، بیشترین مقاومت مربوط به نمونه‌های رسی آماده شده در رطوبت بهینه تثبیت شده با ۵٪ سیمان و تسلیح شده با ۳ لایه ژئوتکستایل از نوع GT25 می‌باشد که در عمر عمل‌آوری ۲۱ روز تحت آزمایش تک‌محوری قرار گرفتند.



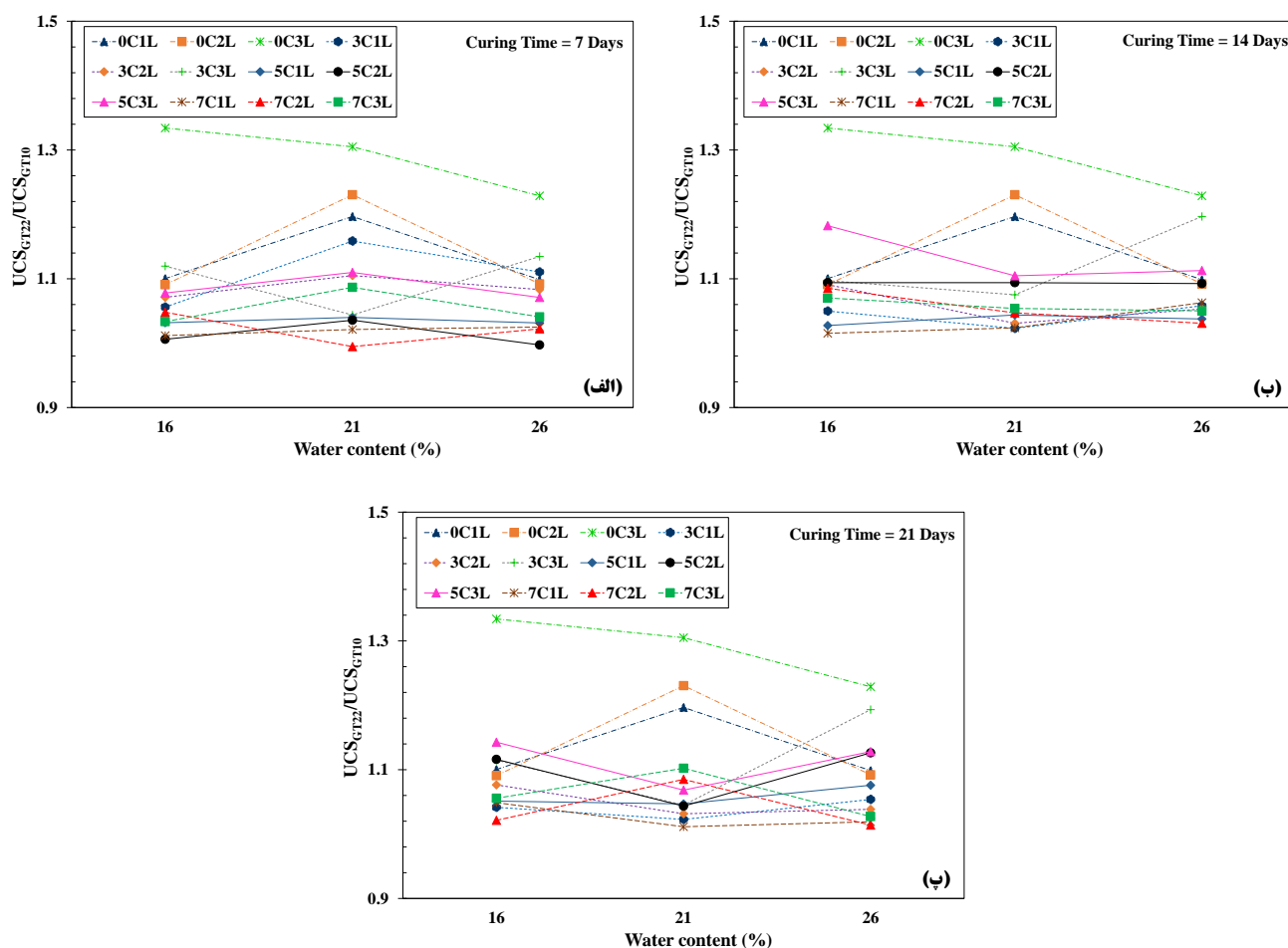
شکل ۵: تغییرات UCS با توجه به درصد سیمان و تعداد لایه‌های ژئوتکستایل GT10 در پایان زمان عمل‌آوری (الف) ۷ روزه، (ب) ۱۴ روزه و (پ) ۲۱ روزه



شکل ۶: تغییرات UCS با توجه به درصد سیمان و تعداد لایه‌های ژئوتکستایل GT25 در پایان زمان عمل‌آوری (الف) ۷ روزه، (ب) ۱۴ روزه و (پ) ۲۱ روزه

مقادیر بی بعد شده مقاومت فشاری محصورنشده نمونه‌های تسلیح شده با ژئوتکستایل GT25 به نمونه‌های تسلیح شده با ژئوتکستایل GT10 در شکل ۷ نشان داده شده است (لازم به ذکر است اعداد نوشته شده قبل از C نشان‌دهنده درصد وزنی سیمان و اعداد نوشته شده قبل از L نشان‌دهنده تعداد لایه‌های مسلح‌کننده است). بر اساس شکل ۷ نمونه‌هایی که به ژئوتکستایل GT25 مسلح گشته‌اند، مقاومت فشاری بیشتری از خود نسبت به نمونه‌های مسلح به ژئوتکستایل GT10 نشان دادند. در یک درصد رطوبت و سیمان ثابت، با افزایش تعداد لایه‌ها مقاومت فشاری نمونه‌های تسلیح شده با ژئوتکستایل GT25 بیشتر از مقاومت فشاری نمونه‌های تسلیح شده با ژئوتکستایل GT10 افزایش می‌یابد. همچنین بیشترین اختلاف بین مقاومت فشاری این دو نوع ژئوتکستایل در تمامی رطوبت‌ها در نمونه‌های مسلح شده با ۳ لایه ژئوتکستایل رخ داده است. مقاومت کششی بیشتر ژئوتکستایل‌های GT25 نسبت به ژئوتکستایل‌های GT10 توجه‌کننده این موضوع می‌باشد. لازم به ذکر است در اکثر موارد با افزایش ۱٫۵ برابری مقاومت کششی تسلیح‌کننده، مقاومت تک‌محوری نمونه‌های رسی کمتر از ۱٫۲ برابر شده است.

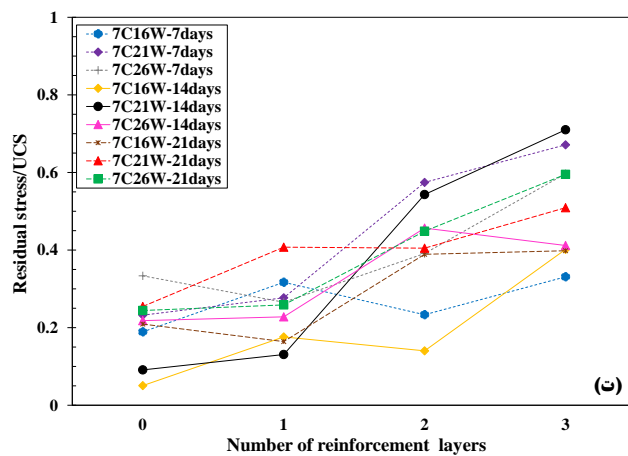
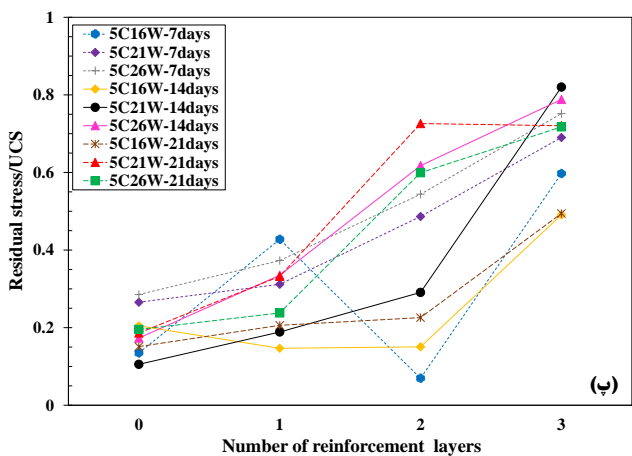
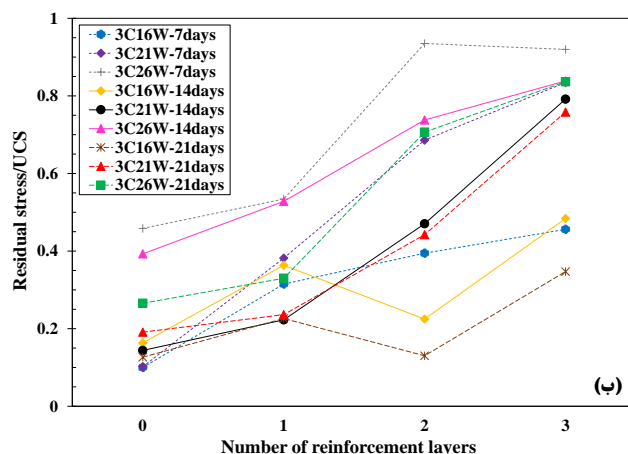
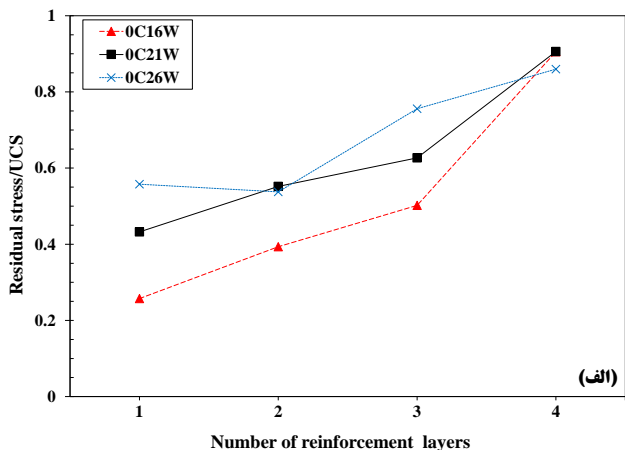
به منظور کنترل پاره شدگی تسلیح‌کننده‌ها، مقدار نیروی کششی بیشینه ایجاد شده در ژئوتکستایل‌ها محاسبه شده و مقدار آن با مقاومت کششی نهایی مقایسه می‌گردد. از آنجاییکه ضریب پواسون نمونه رسی تحت بارگذاری زهکشی نشده تقریباً برابر با ۰٫۵ می‌باشد، مقدار کرنش شعاعی بیشینه در وسط ارتفاع نمونه برابر با ۰٫۷۵٪ خواهد بود. بنابراین مقدار نیروی کششی بیشینه ایجاد شده در تسلیح‌کننده میانی T_{mob} برای هر دو نوع ژئوتکستایل برابر با $T_{mob} = J \times \epsilon_r$ خواهد بود. با استفاده از مقدار سختی کششی بدست آمده از آزمایش کشش و همین‌طور در نظر گرفتن کرنش شعاعی ۰٫۷۵٪، مقدار نیروی کششی بیشینه ایجاد شده در ژئوتکستایل GT10 و GT25 به ترتیب برابر با ۱٫۱۸ و ۴٫۱۵ کیلونیوتن بر متر خواهد بود که بسیار کمتر از مقاومت کششی ارائه شده در جدول ۳ می‌باشد.



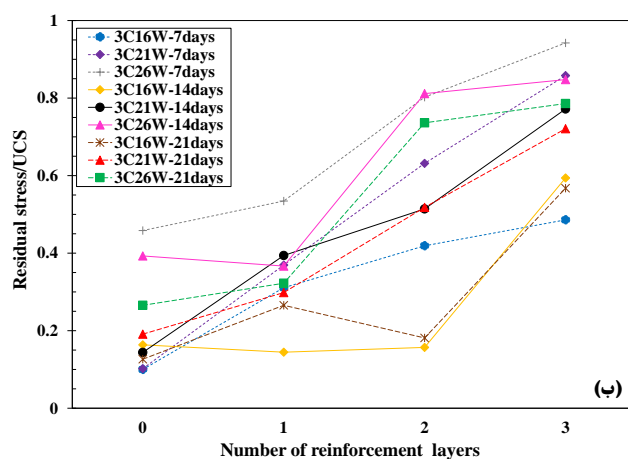
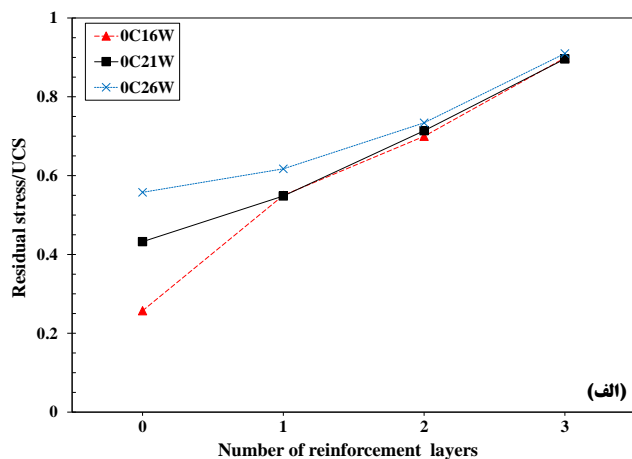
شکل ۷: نسبت UCS نمونه‌های تسلیح شده با GT25 به GT10 با عمل‌آوری (الف) ۷ روزه، (ب) ۱۴ روزه، (پ) ۲۱ روزه

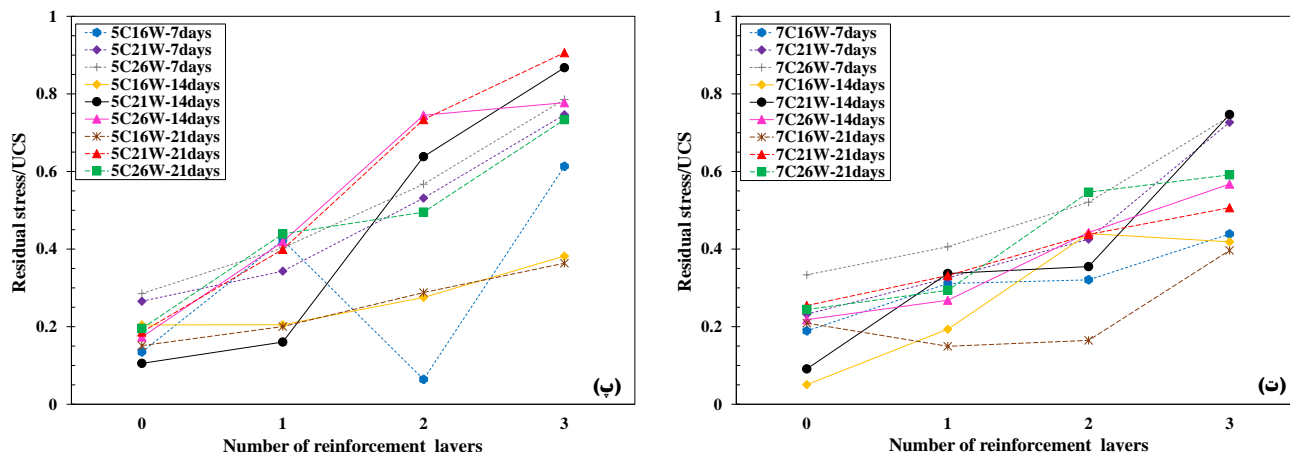
۲-۳- مقاومت باقیمانده

نسبت بی‌بعد شده مقاومت باقیمانده (که نشان‌دهنده مقدار مقاومت نمونه رسی در کرنش‌های بزرگ می‌باشد) به مقاومت فشاری محصورنشده نمونه‌های مسلح شده با ژئوتکستایل GT10 و GT25 به ترتیب در شکل ۸ و شکل ۹ نشان داده شده است (لازم به ذکر است اعداد نوشته شده قبل از W نشان‌دهنده درصد رطوبت نمونه‌های رسی است). همان‌گونه که مشخص است، در شرایط درصد سیمان و رطوبت و زمان عمل‌آوری ثابت، افزایش تعداد لایه‌های ژئوتکستایل موجب افزایش نسبت مقاومت باقیمانده به UCS شده که دلیل آن، افزایش شکل‌پذیری نمونه‌های تسلیح شده و در پی آن بهبود مقاومت باقیمانده است. به عبارت دیگر، استفاده از ژئوتکستایل باعث کاهش افت مقاومت باقیمانده نمونه‌ها نسبت به مقاومت بیشینه می‌گردد. همچنین در نمونه‌های با درصد سیمان و تعداد لایه‌های ژئوتکستایل مشخص، هر چه رطوبت از سمت خشک به سمت تر حرکت می‌کند، این نسبت افزایش می‌یابد. این یعنی نمونه‌های مسلح با تعداد لایه‌های ژئوتکستایل و رطوبت بیشتر، دارای سختی کمتر و شکل‌پذیری بیشتری هستند. این موضوع پیشتر در تسلیح خاک‌های ماسه‌ای نیز گزارش شده است [۲۴]. از طرفی افزایش درصد سیمان هم باعث افت نسبت مقاومت باقیمانده به مقاومت فشاری تک‌محوری در نمونه‌ها شده است. دلیل این موضوع می‌تواند افزایش تردی نمونه‌ها در پی افزایش واکنش‌های پوزولانی باشد. شکننده‌تر شدن رفتار خاک با افزودن مواد سیمانی در تحقیقات گذشته نیز دیده شده است [۲۴، ۲۷، ۳۱].



شکل ۸: نسبت مقاومت باقیمانده به UCS با توجه به تعداد لایه‌های GT10 در نمونه‌های (الف) تثبیت نشده و تثبیت شده با (ب) ۳، (پ) ۵ و (ت) ۷ درصد سیمان

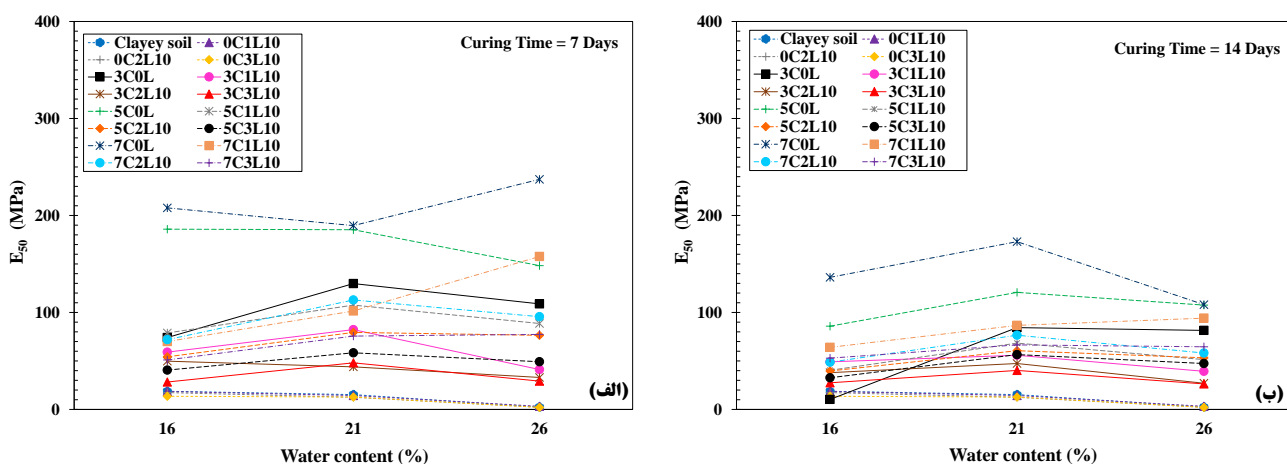


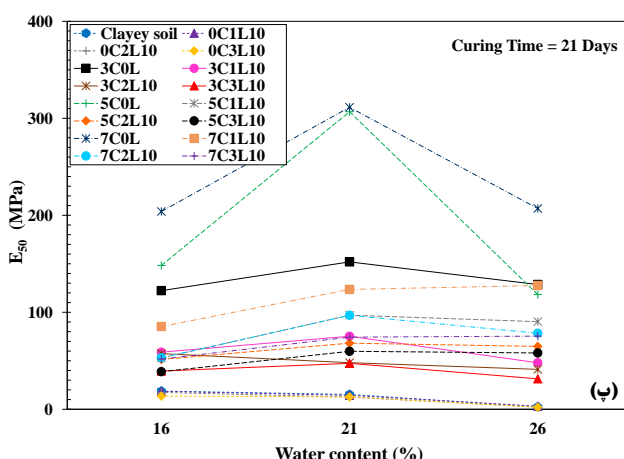


شکل ۹: نسبت مقاومت باقیمانده به UCS با توجه به تعداد لایه‌های GT25 در نمونه‌های تثبیت‌شده با (الف) صفر، (ب) ۳، (پ) ۵ و (ت) ۷ درصد سیمان

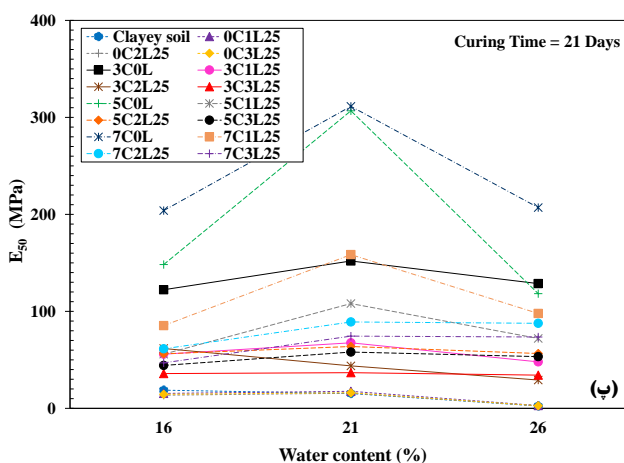
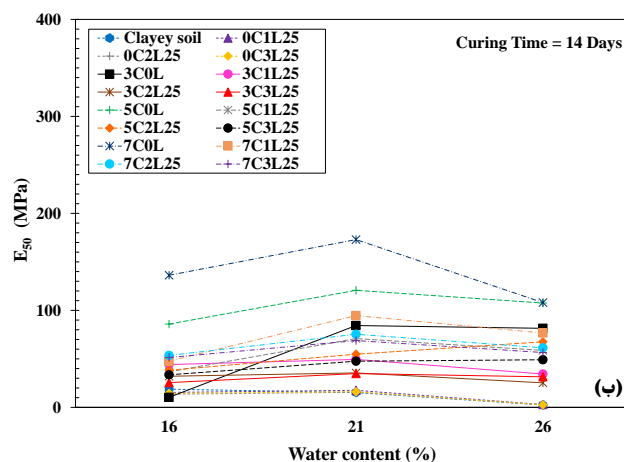
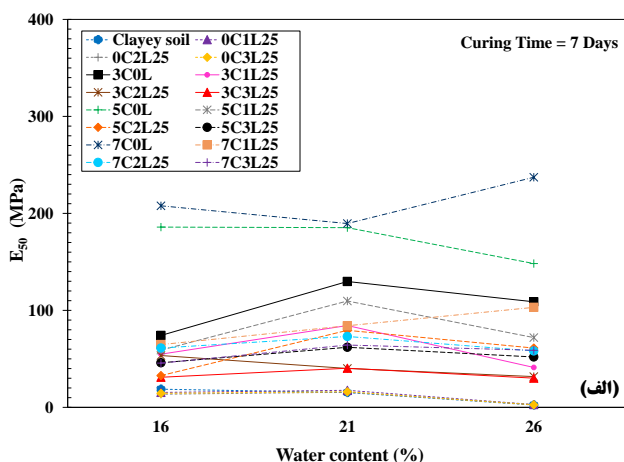
۳-۳- مدول الاستیسیته (سختی محوری)

شکل ۱۰ و شکل ۱۱ به ترتیب تغییرات مدول الاستیسیته در نمونه‌های مختلف تسلیح‌شده با ورقه‌های ژئوتکستایل GT10 و GT25 را نشان می‌دهند. نمونه‌های حاوی بیشترین درصد سیمان و کمترین تعداد ورقه‌های ژئوتکستایل دارای مدول الاستیسیته بیشتر می‌باشند. به‌طور کلی هر چه تعداد لایه‌های ژئوتکستایل در یک درصد سیمان و رطوبت ثابت افزایش یافته، مدول الاستیسیته متعاقب آن کاهش پیدا کرده‌است. همچنین در نمونه‌هایی با درصد سیمان و تعداد لایه مشخص، با افزایش رطوبت تا ۲۱٪ مدول افزایش پیدا می‌کند که دلیل آن می‌تواند، صورت پذیرفتن بهتر واکنش‌های پوزولانی سیمان در حضور آب کافی و همچنین افزایش تراکم خاک در رطوبت بهینه باشد. از طرف دیگر با افزایش بیشتر رطوبت، مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد و علت آن، وجود آب مازاد از نیاز سیمان برای ایجاد واکنش‌های پوزولانی و همچنین تغییر ساختار خاک رس از حالت مجتمع به حالت پراکنده است. به‌طور کلی، سختی خاک رس در حالت ساختار مجتمع بیشتر از ساختار پراکنده می‌باشد [۳۲].





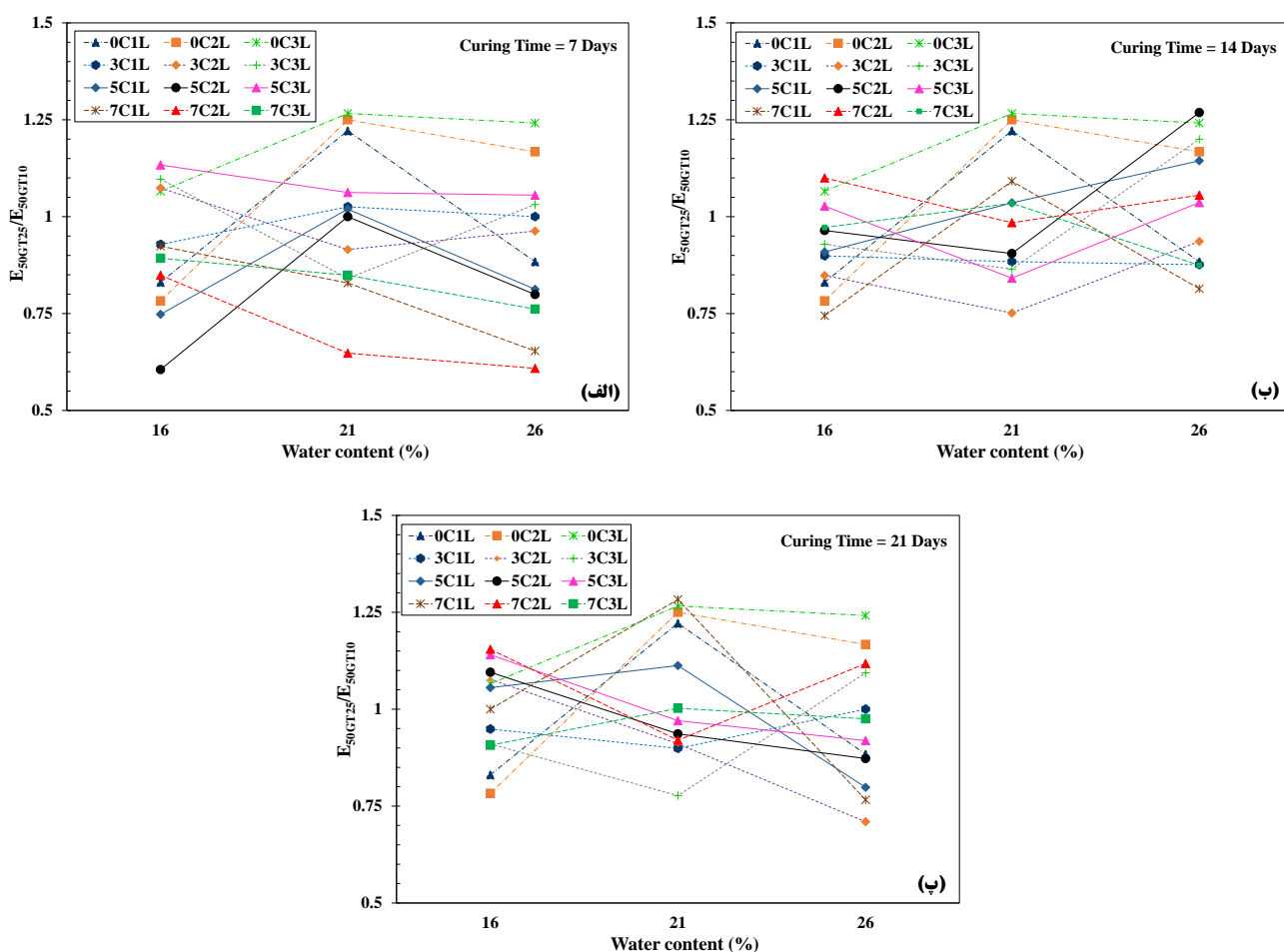
شکل ۱۰: تغییرات مدول الاستیسیته E_{50} بر حسب رطوبت نمونه‌های تسلیح شده با GT10 با زمان عمل‌آوری (الف) ۷ روزه، (ب) ۱۴ روزه و (پ) ۲۱ روزه



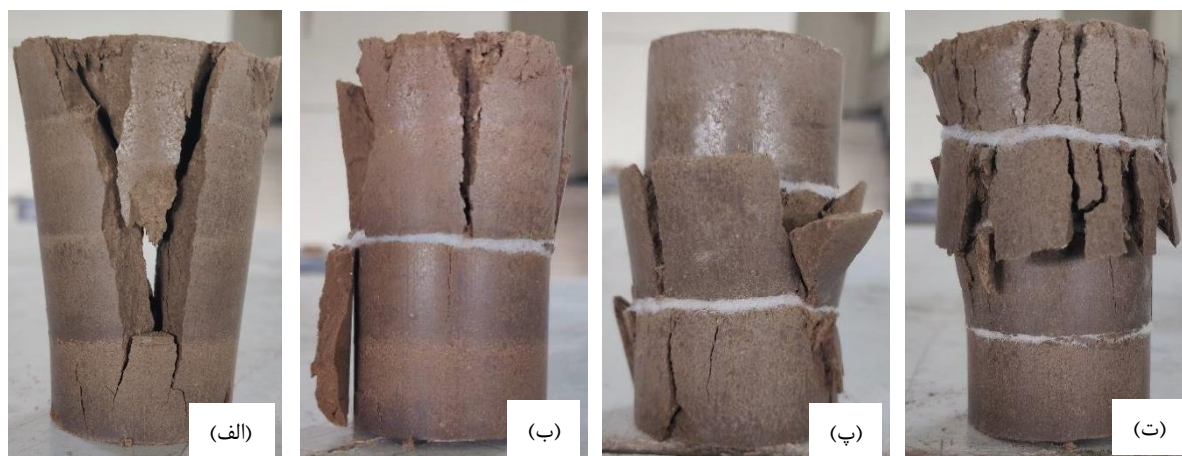
شکل ۱۱: تغییرات مدول الاستیسیته E_{50} به توجه به رطوبت نمونه‌های تسلیح شده با GT25 با زمان عمل‌آوری (الف) ۷ روزه، (ب) ۱۴ روزه و (پ) ۲۱ روزه

شکل ۲ نسبت مدول الاستیسیته نمونه‌های تثبیت شده با سیمان با درصدهای مختلف و تسلیح شده با ژئوتکستایل‌های GT25 به GT10 را نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۲ مشاهده می‌گردد که صرف‌نظر از مقدار رطوبت نمونه و درصد سیمان، در اکثر موارد مقدار نسبت مدول الاستیسیته برای نمونه‌های تسلیح شده با ژئوتکستایل GT25 به نمونه‌های تسلیح شده با ژئوتکستایل GT10 کمتر از ۱ می‌باشد. این

مشاهده بدین معناست که نمونه‌های سیمانی مسلح‌شده با ژئوتکستایل GT25 دارای مدول الاستیسیته کمتری نسبت به نمونه‌های سیمانی مسلح شده با ژئوتکستایل GT10 می‌باشند که در واقع باعث شکل‌پذیری بیشتر و همچنین سختی کمتر نمونه‌های مسلح‌شده با این ژئوتکستایل می‌گردد. تصویر ترک‌های ایجادشده در نمونه‌های مسلح‌شده با تعداد لایه‌های مختلف ژئوتکستایل در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. براین اساس به‌وضوح مشاهده می‌شود که استفاده از تعداد لایه‌های بیشتر ژئوتکستایل باعث عدم انتشار ترک‌های گسیختگی در طول نمونه می‌گردد که این امر خود دلیلی بر تاثیر مثبت ژئوتکستایل تسلیح‌کننده در کنترل و کاهش تغییرشکل‌های کلی در شرایط گسیختگی در نمونه‌های مسلح نسبت به نمونه‌های غیرمسلح می‌باشد.



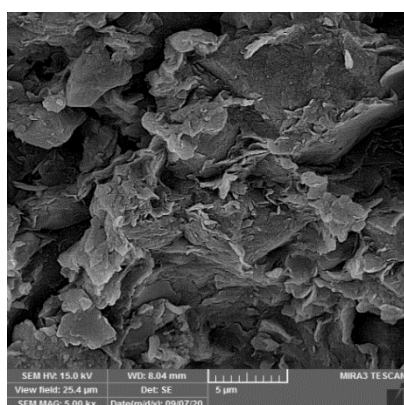
شکل ۱۳: نسبت E_{50} نمونه‌های تسلیح‌شده با GT25 به GT10 با زمان عمل‌آوری (الف) ۷ روزه، (ب) ۱۴ روزه و (پ) ۲۱ روزه



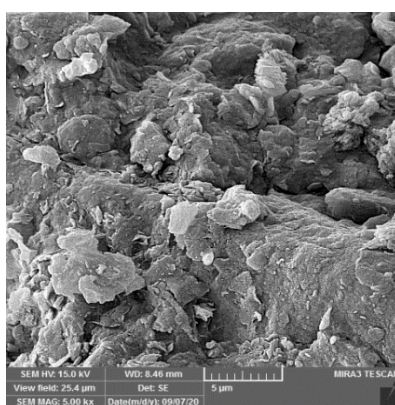
شکل ۱۳: نمونه‌های ۲۱ روزه تثبیت شده با ۷٪ سیمان و ۲۱٪ رطوبت و (الف) تسلیح نشده و تسلیح شده با (ب) یک لایه، (پ) دو لایه و (ت) سه لایه ژئوتکستایل.

۴-۳- آنالیز تصاویر میکروسکوپ الکترونی^۳

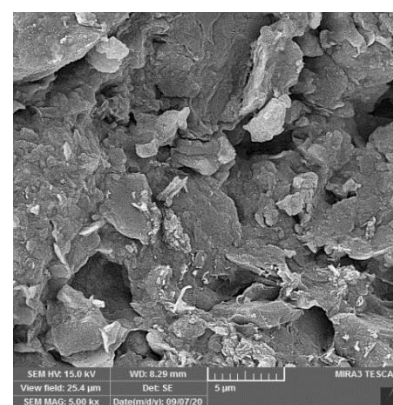
برای درک بهتر تاثیر سیمان بر کاهش خلل و فرج نمونه‌های تثبیت شده در زمان‌های عمل‌آوری مختلف، بررسی‌های ریزساختاری توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) مورداستفاده قرار گرفتند. شکل ۴ تصویر SEM خاک تثبیت شده با درصد سیمان‌های مختلف را در رطوبت ۱۶٪ نشان می‌دهد. با افزایش درصد سیمان، ژل C-S-H تشکیل شده ناشی از واکنش‌های پوزولانی افزایش یافته و در نتیجه ساختار خاک یکپارچه‌تر و مقاوم‌تر می‌گردد. تصاویر SEM خاک تثبیت شده با ۵٪ سیمان با رطوبت‌های ۱۶، ۲۱ و ۲۶ درصد، به ترتیب در شکل ۵ الف، ب و پ نشان داده شده است. مقایسه اشکال ۱۵-الف و ۱۵-ب نشان می‌دهد که افزایش رطوبت از سمت خشک رطوبت بهینه به رطوبت بهینه، باعث انسجام بیشتر در بافت خاک شده است. دلیل این امر وجود آب کافی برای تکمیل واکنش‌های پوزولانی و تشکیل ژل C-S-H می‌باشد. با این وجود وقتی رطوبت به ۲۶٪ افزایش می‌یابد، افزایش آب مازاد باعث ایجاد حفره در بافت و ساختار خاک می‌گردد (۱۵-پ). تاثیر زمان عمل‌آوری بر ریزساختار خاک تثبیت شده با ۷٪ سیمان توسط تصاویر SEM در شکل ۶ نشان داده شده است. شکل ۶-ب نشان دهنده افزایش ژل C-S-H به موجب وقوع واکنش‌های طولانی مدت پوزولانی و همچنین افزایش انسجام بافت خاک در عمل‌آوری ۲۱ روزه نسبت به ۷ روزه می‌باشد.



(الف)



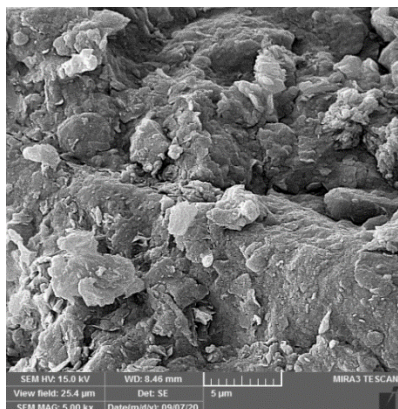
(ب)



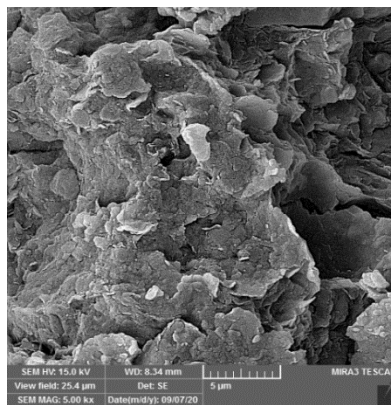
(پ)

شکل ۱۴: تصاویر SEM نمونه‌های حاوی رطوبت ۱۶ درصد و تثبیت شده با سیمان (الف) ۳ درصد، (ب) ۵ درصد و (پ) ۷ درصد

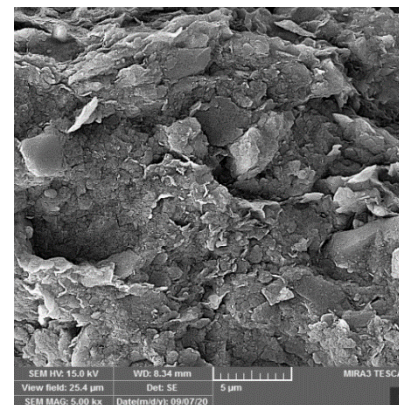
³ Scanning electron microscope (SEM)



(الف)

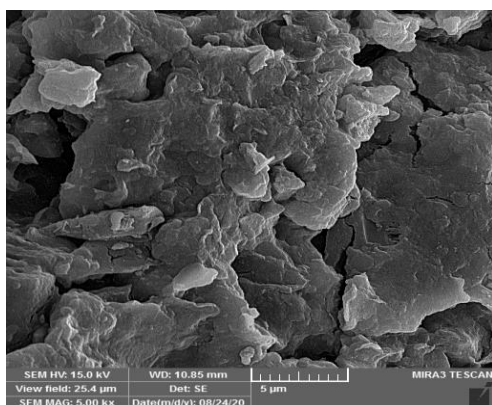


(ب)

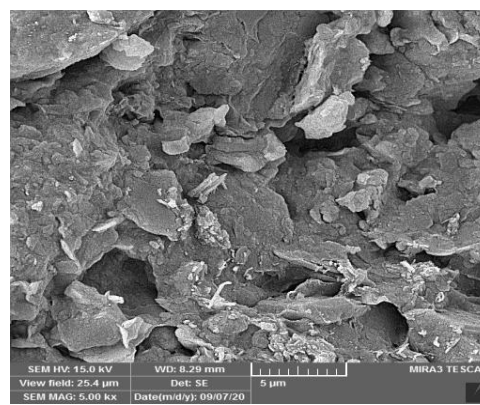


(پ)

شکل ۱۵: تصاویر SEM نمونه‌های تثبیت‌شده با ۵ درصد سیمان در رطوبت (الف) ۱۶٪، (ب) ۲۱٪ و (پ) ۲۶٪



(الف)



(ب)

شکل ۱۶: تصاویر SEM نمونه‌های تثبیت‌شده با ۷٪ سیمان در زمان‌های عمل‌آوری (الف) ۷ روزه و (ب) ۲۱ روزه

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق رفتار فشاری محصورنشده نمونه‌های رسی تثبیت‌شده با سیمان و مسلح‌شده با دو نوع ژئوتکستایل GT10 و GT25 بررسی شده است و تاثیر عواملی همچون درصد سیمان و رطوبت نمونه‌های رسی، تعداد و نوع ورقه‌های ژئوتکستایل و همچنین زمان عمل‌آوری مورد ارزیابی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج بدست‌آمده از آزمایش‌ها به شرح زیر ارائه می‌شوند:

- (۱) افزایش درصد سیمان در نمونه‌ها منجر به بهبود مقاومت فشاری، افزایش مدول الاستیسیته و کاهش کرنش گسیختگی و نیز کاهش مقاومت باقیمانده نسبت به مقاومت فشاری نهایی (رفتار شکننده‌تر) گردید.
- (۲) افزایش رطوبت تا ۲۱٪ در نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان و تسلیح‌شده با ژئوتکستایل، مقادیر مقاومت نهایی، مقاومت باقیمانده، کرنش گسیختگی، مدول الاستیسیته و نسبت مقاومت باقیمانده به مقاومت نهایی را افزایش داد. اما با افزایش رطوبت تا ۲۶٪ فقط مقاومت باقیمانده نسبت به مقاومت نهایی و کرنش گسیختگی روند صعودی خود را حفظ کرده و مقاومت نهایی، مقاومت باقیمانده و مدول الاستیسیته افت کردند.
- (۳) تسلیح نمونه‌های رسی سیمانی‌شده با ورقه‌های ژئوتکستایل باعث بهبود مشخصه‌های مکانیکی از قبیل مقاومت فشاری بیشینه، مقاومت باقیمانده و کرنش گسیختگی نمونه‌های مسلح نسبت به نمونه‌های غیرمسلح شد. باین‌حال استفاده از ورقه‌های ژئوتکستایل،

مدول الاستیسیته نمونه‌های تثبیت شده را کاهش داده است. در واقع از سختی نمونه‌ها کاسته شده و به شکل پذیری آن‌ها افزوده شده است. همچنین بر اساس مشاهدات، استفاده از ورقه‌های ژئوتکستایل مانع انتشار بیشتر ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌های گسیخته شده گردید.

(۴) برای نمونه‌های مسلح و غیرمسلح، افزایش زمان عمل‌آوری باعث بهبود مشخصه‌های مقاومتی نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و تسلیح شده با ژئوتکستایل شده است. به عنوان مثال مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه رسی تثبیت شده با ۳٪ سیمان در عمر عمل‌آوری ۲۱ روزه نسبت به عمر عمل‌آوری ۷ روزه، افزایش ۲۷٪ را نشان داد. همچنین مقاومت تک‌محوری همین نمونه در حالت مسلح شده با ۳ لایه ژئوتکستایل GT25، پس از گذشت ۲۱ روز نسبت به نمونه ۷ روزه، ۲۳٪ افزایش داشته است.

(۵) نتایج به دست آمده برای مقاومت نمونه‌های سیمانی تسلیح شده با دو ژئوتکستایل GT10 و GT25 نشان دادند که نمونه‌هایی که با ژئوتکستایل GT25 تسلیح شدند، علاوه بر مقاومت بیشتر، دارای شکل‌پذیری بیشتر و سختی کمتری نسبت به نمونه‌های سیمانی تسلیح شده با ژئوتکستایل GT10 بوده‌اند.

مراجع

- [1] Naeini, S.A., Naderinia, B. and Izadi, E. (2012). Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16 (6), 943-949.
- [2] Basha, E.A., Hashim, R., Mahmud, H.B. and Muntohar, A.S. (2005) Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. *Construction and Building Materials*, 19 (6), 448-453.
- [3] Ji-ru, Z. and Xing, C. (2002). Stabilization of expansive soil by lime and fly ash. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 17 (4), 73-77.
- [4] Yin, C.-Y., Mahmud, H.B. and Shaaban, M.G. (2006). Stabilization/solidification of lead-contaminated soil using cement and rice husk ash. *Journal of Hazardous Materials*, 137 (3), 1758-1764.
- [5] Dash, S.K. and Hussain, M. (2012). Lime stabilization of soils: reappraisal. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24 (6), 707-714.
- [6] Kalantari, B. and Huat, B.B.K. (2008). Peat soil stabilization, using ordinary portland cement, polypropylene fibers, and air curing technique. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 13, 1-13.
- [7] Nguyen, M.-D., Le, A.-T., Nguyen, T.-A., Thach, N.-T. and Phan, T.-K. (2020). The Influence of Water Content and Compaction on the Unconfined Compression Strength of Cement Treated Clay. 2020 5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD), 175-179.
- [8] Sariosseiri, F. and Muhunthan, B. (2009). Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils. *Engineering Geology*, 104 (1-2), 119-125.
- [9] Xiao, H.W. and Lee, F.H. (2008). Curing time effect on behavior of cement treated marine clay. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 43, 71-78.
- [10] Asgari, M.R. , Dezfuli, A.B. and Bayat, M. (2015). Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with cement/lime. *Arabian Journal of Geoscience*, 8 (3), 1439-1452.
- [11] Khattak, M.J. and Alrashidi, M. (2006). Durability and mechanistic characteristics of fiber reinforced soil-cement mixtures. *Int. Journal of Pavement Engineering*, 7 (1), 53-62.
- [12] Maslehuddin, M., Al-Zahrani, M.M., Ibrahim, M., Al-Mehthel, M.H. and Al-Idi, S.H. (2007). Effect of chloride concentration in soil on reinforcement corrosion. *Construction and Building Materials*, 21 (8), 1825-1832.
- [13] Agrawal, B.J. (2011). Geotextile: It's application to civil engineering-overview. In: *National Conference on Recent Trends in Engineering & Technology*, 2011, Gujarat, India, pp. 1-6.
- [14] Söylemez, M. and Arslan, S. (2020). "Experimental investigation of influence of clay in soil on interface friction between geotextile and clayey soil." *Arabian Journal of Geosciences* 13(10): 342.
- [15] Rashidian, V., Naeini, S.A. and Mirzakanlari, M. (2018). "Laboratory testing and numerical modelling on

- bearing capacity of geotextile-reinforced granular soils." *International Journal of Geotechnical Engineering* 12(3): 241-251.
- [16] Nguyen, M.D., Yang, K.H., Lee, S.H., Wu, C.S. and Tsai, M.H. (2013). Behavior of nonwoven-geotextile-reinforced sand and mobilization of reinforcement strain under triaxial compression. *Geosynthetics International*, 20 (3), 207-225.
- [17] Abdelkader, B., Arab, A., Sadek, M. and Shahrour, I. (2018). Laboratory investigation of the influence of geotextile on the stress-strain and volumetric change behavior of sand. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36 (4), 2077-2085.
- [18] Rezvani, R. (2020). Shearing response of geotextile-reinforced calcareous soils using monotonic triaxial tests. *Marine Georesources and Geotechnology*, 38 (2), 238-249.
- [19] Negi, M.S. and Singh, S.K. (2021). "Experimental and numerical studies on geotextile reinforced subgrade soil." *International Journal of Geotechnical Engineering* 15(9): 1106-1117.
- [20] Tseng, S.-C., Yang, K.-H., Tsai, Y.-K. and Teng, F.-C. (2022) Investigation of the blast-resistance performance of geotextile-reinforced soil. *Geosynthetics International* 0(0): 1-18.
- [21] Latha, G.M. and Murthy, V.S. (2007). Effects of reinforcement form on the behavior of geosynthetic reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 25 (1), pp. 23-32.
- [22] Chen, X., Zhang, J. and Li, Z. (2014). Shear behaviour of a geogrid-reinforced coarse-grained soil based on large-scale triaxial tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 42 (4), 312-328.
- [23] Noorzad R. and Mirmoradi, S.H. (2010). Laboratory evaluation of the behavior of a geotextile reinforced clay. *Geotextiles and Geomembranes*, 28 (4), 386-392.
- [24] Shooshpasha, I. and Nejati Namin, H. (2020). An Experimental Study on the Combined Effect of Reinforcement and Stabilization on the Shear Behavior of Babolsar Sand. *Journal of Civil and Environmental Engineering* 49.4(97): 83-91.
- [25] Yang, K.-H., Nguyen, M. D., Yalaw, W. M., Liu, C.-N. and Gupta, R. (2016). Behavior of geotextile-reinforced clay in consolidated-undrained tests: reinterpretation of porewater pressure parameters. *Journal of GeoEngineering* 11(2): 45-57.
- [26] Nguyen, M.-D., Yang, K.-H. and Yalaw, W. M. (2020). Compaction behavior of nonwoven geotextile-reinforced clay. *Geosynthetics International* 27(1): 16-33.
- [27] Kutanaei S.S., Choobbasti A.J. (2016). Triaxial behavior of fiber-reinforced cemented sand. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 30, 6, 579-593.
- [28] Jayawardane, V.S., Anggraini, V., Li-Shen, A.T., Paul, S.C. and Nimbalkar, S. (2020). Strength Enhancement of Geotextile-Reinforced Fly-Ash-Based Geopolymer Stabilized Residual Soil. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 6 (40), 1-15.
- [29] Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F. and Cai, Y. (2007). Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 25 (3), 194-202.
- [30] Changizi, F. and Haddad, A. (2015). Strength properties of soft clay treated with mixture of nano-SiO₂ and recycled polyester fiber. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7 (4), 367-378.
- [32] Mitchell, J.K. and Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*. 3rd Edition John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, May, 577 pp.