

EXTENDED ABSTRACT

Laboratory Study of Compressive Strength, Shear Strength Parameters, and Durability Against Freeze-Thaw Cycles of Silty Sand Improved with Nano-Silica and Basalt Fibers

Hamid Alizadeh Kakroudi, Meysam Bayat*, Bahram Nadi

Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Received: 29 November 2022; Reviewed: 11 April 2023; Accepted: 19 August 2023

Keywords:

Compressive strength, Shear strength parameters, Sand, Nano-silica, Basalt fiber.

1. Introduction

Weak soils with unfavorable geotechnical characteristics cause many technical and economic problems in construction projects such as road construction. One of the solutions to the problem is soil improvement (Asgari et al., 2015; Bayat et al., 2021; Eshaghzadeh et al., 2021; Hadi Sahlabadi et al., 2021; Hakimelahi et al., 2023; Rezaei-Hosseiniabadi et al., 2022, 2022; Saadat and Bayat, 2022; Tavakol et al., 2023). Many materials such as fiber, cement, lime, nanomaterials etc. have been used to improve of soils. On the other hand, previous studies indicate that freeze-thaw cycles have an important effect on the mechanical behavior of geomaterials (Hadi Sahlabadi et al., 2021; Noroozi et al., 2022; Roustaei, 2021).

2. Methodology

This research investigates the compressive strength and shear strength parameters of sandy soil reinforced with basalt fibers and nano-silica as a new method of improving soils. For this purpose, a series of UCS and triaxial static tests have been conducted to investigate the effect of the content of basalt fibers, nano silica, and curing time.

3. Results and discussion

3.1. UCS results

Fig. 1 shows the effect of nano-silica content and curing time on the UCS values of nano-silica stabilized specimens. As shown from the results, the specimens containing 10% of nano-silica show the highest values of UCS. On the other hand, the UCS values of specimens increase with increasing curing time. Fig. 2 shows the effect of fiber content and curing time on the UCS values of stabilized specimens with 10% nano-silica. As shown from the results, the specimens containing 10% of nano-silica and 1% of basalt fiber exhibited the maximum UCS values for a given curing time.

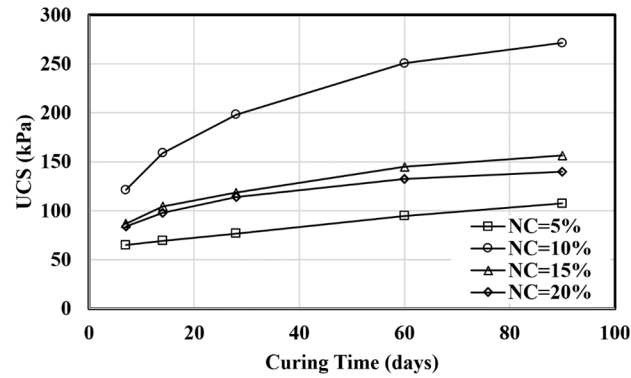


Fig. 1. Effect of nano-silica content and curing time on the UCS values of stabilized specimens

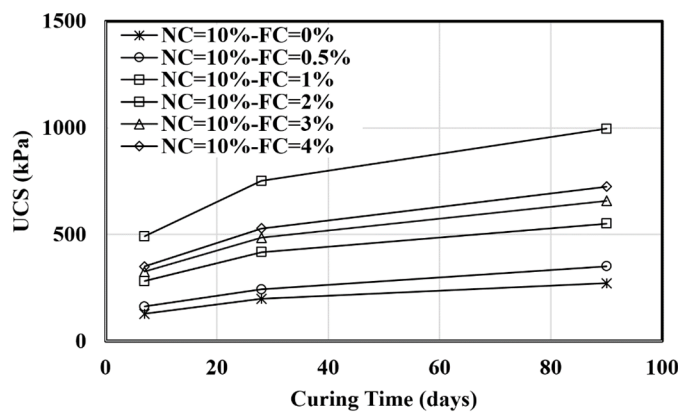


Fig. 2. Effect of fiber content and curing time on the UCS values of stabilized specimens with 10% nano-silica

3.2. Triaxial test results

Fig. 3 shows the Effect of fiber content on the maximum deviatoric stress and brittleness index. The results indicate that the reinforced specimen with 1% fiber has the highest value of deviatoric stress. On the other hand, adding fiber to the specimens resulted in a decrease in the brittle index. Fig. 4 shows the Effect of nano-silica content on the maximum deviatoric stress and brittleness index. The results indicate that the stabilized specimen with 10% nano-silica has the highest value of deviatoric stress. On the other hand, adding fiber to the specimens resulted in an increase in the brittle index. Fig. 6 shows the effect of freeze-thaw cycles on the shear strength parameters of improved specimens with 10% nano-silica and 1% basalt fiber. As you can see from the results, the shear strength parameters of specimens decrease with increasing freeze-thaw cycles.

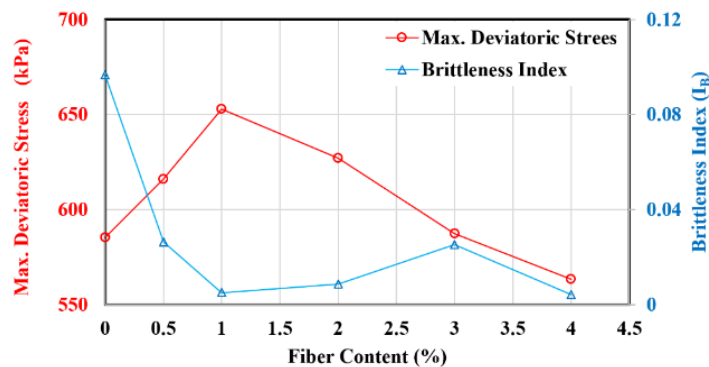


Fig. 3. Effect of fiber content on the maximum deviatoric stress and brittleness index

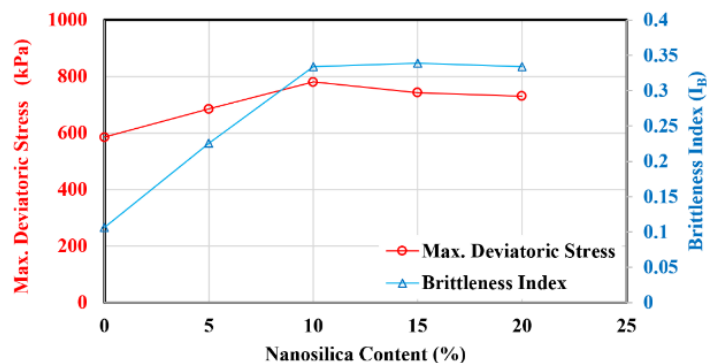


Fig. 4. Effect of nano-silica content on the maximum deviatoric stress and brittleness index

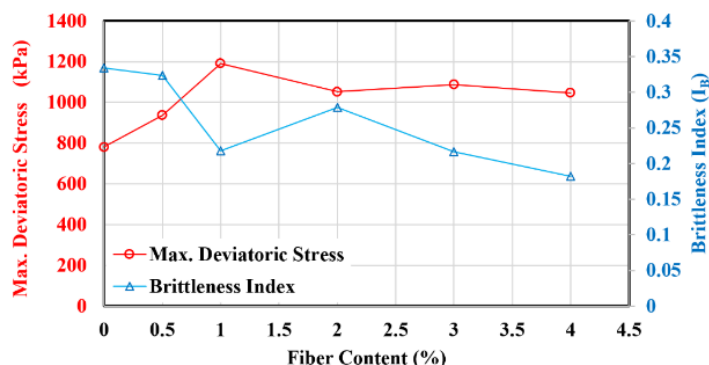


Fig. 5. Effect of fiber content on the maximum deviatoric stress and brittleness index of stabilized specimens with 10% nano-silica

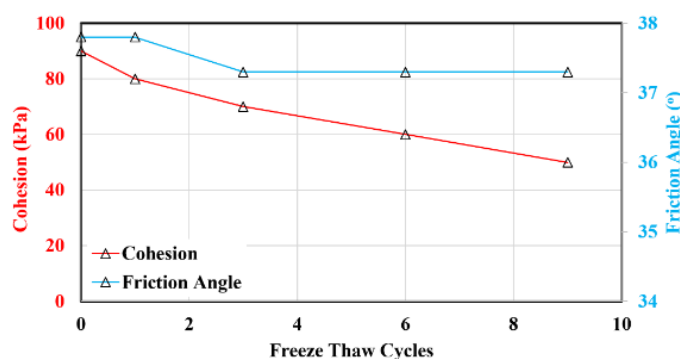


Fig. 6. Effect of freeze-thaw cycles on the shear strength parameters of improved specimens with 10% nano-silica and 1% basalt fiber

4. Conclusions

In this study, using UCS and triaxial static tests, compressive and shear strength parameters of sandy soil improved with basalt fibers and nano-silica were investigated. Based on the test results, the following results have been obtained:

1) Increasing the content of fibers from 0.5% to 1% increased the compressive strength of the sample, although after that, the compressive strength of the samples decreased with the increase of the content of fibers from 1% to 4%. However, increasing the content of fibers from 0.5% to 4% has increased the strain corresponding to the maximum compressive stress.

2) The results obtained for the samples stabilized with nano-silica show that the samples containing 10% nano-silica have the highest resistance. Increasing the content of nano-silica from 5 to 10% has increased the resistance, and then increasing the content of nano-silica from 10 to 20% has decreased the resistance. Increasing the curing time from 7 to 90 days has caused a significant increase in the compressive strength of the samples. The effect of the content of nano-silica has become more significant with the increase of curing days from 7 to 90 days, and it has also caused more brittle behavior of the samples.

3) Comparison of the results of samples improved with fibers and samples improved with nano-silica shows that the samples containing nano-silica have obtained higher compressive strength.

4) Based on the results, 1% of basalt fibers has been found as the optimal content, which has shown the highest compressive strength.

5) The results of triaxial static tests show that basalt fibers have increased all parameters of shear resistance, friction angle and adhesion. Although the increase in adhesion is greater than the friction angle. The addition of nano-silica compared to the pure sand sample has also increased the resistance. Nano-silica has caused a slight increase in the friction angle and a significant increase in cohesion, which is due to the phenomenon of cementation created by nano-silica particles between sand particles.

6) Increasing the freeze-thaw cycles has caused a significant decrease in the maximum stress. The freeze-thaw cycles have caused a significant decrease in the cohesion of the sample while the friction angle has changed much less.

پارامترهای مقاومت فشاری، برشی و داوم در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان ماسه لای‌دار بهسازی شده با نانوسیلیس و الیاف بازالت

حمید علیزاده کاکرودی¹، میثم بیات^{2*}، بهرام نادری³

¹ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی

² دانشیار گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی

³ استادیار گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی

دریافت: 1401/9/8، بازنگری: 1402/1/22، پذیرش: 1402/5/28، نشر آنلاین: 1402/5/28

چکیده

امروزه یکی از مشکلات اساسی در پروژه‌های عمرانی و ژئوتکنیک، مرتبط با خاک در محل پروژه می‌باشد که در آن خاک به‌عنوان یک مصالح طبیعی، مقاومت کافی برای تحمل بارهای وارده را نداشته باشد. خاک طبیعی موجود در محل پروژه‌ها در بعضی مناطق حتی اگر مناسب برای ساخت‌وساز نیست، با استفاده از روش‌های نوین می‌توان خصوصیات ژئوتکنیکی و فیزیکی آن ارتقا داد. در این مقاله، اثر الیاف بازالت و نانوسیلیس به‌عنوان یک مصالح جدید بر روی مقاومت فشاری و پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های ماسه‌ای لای‌دار با استفاده از آزمایش تک‌محوری و سه‌محوری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌های تک‌محوری نشان می‌دهد که اضافه‌شدن الیاف یا نانوسیلیس هر دو باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است، اگرچه اثر نانوسیلیس در افزایش مقاومت تک‌محوری با گذشت زمان بیشتر از اثر الیاف است. ترکیب الیاف بازالت و نانوسیلیس می‌تواند اثر مهم‌تری بر روی افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها داشته باشد. نتایج آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی افزایش پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها را به‌زای اضافه شدن الیاف و نانوسیلیس نشان می‌دهد. همچنین اعمال سیکل‌های ذوب و یخبندان تا حدودی باعث کاهش پارامترهای مقاومت فشاری شده است.

کلیدواژه‌ها: مقاومت فشاری، پارامترهای مقاومت برشی، ماسه، نانوسیلیس، الیاف بازالت.

1- مقدمه

افزایش مقاومت کششی و برشی ایفا کند (Salehi و همکاران، 2021؛ ShahriarKian و همکاران، 2021؛ Ghanizadeh و همکاران، 2022؛ Bayat و همکاران، 2021).

به‌دلیل ویژگی‌های مطلوب الیاف، استفاده از آن در حال افزایش است. خاک تقویت شده با الیاف به‌عنوان یک توده خاک تعریف شده است که شامل عناصر گسسته توزیع شده به‌صورت تصادفی، یعنی الیاف‌ها است که موجب بهبود رفتار مکانیکی توده خاک می‌شود (Hejazi و همکاران، 2012؛ Ghanbari و همکاران، 2022). به‌طور کلی، الیاف گسسته تصادفی رفتاری مشابه ریشه-های گیاهان را ایجاد می‌کند که باعث افزایش مقاومت برشی به خاک‌های سطحی می‌شود و در نهایت به پایداری توده خاک کمک می‌کند (Hejazi و همکاران، 2012). تاکنون مطالعه‌های زیادی برای تعیین تأثیر الیاف بر رفتار خاک با تمرکز بر مقاومت مصالح

خاک‌های ضعیف با مشخصات فنی نامطلوب مشکلات فراوانی را از نظر فنی و اقتصادی در پروژه‌های عمرانی همچون راه‌سازی ایجاد می‌کند و ممکن است امکان تغییر مسیر راه و یا تعویض خاک در محل پروژه نباشد که در این صورت اصلاح و بهبود خاک باید مورد توجه قرار گیرد (Asgari و همکاران، 2015؛ Gholipoor Norozi و همکاران، 2015؛ Rezaei-Hosseinabadi و همکاران، 2021؛ Hakimelahi و همکاران، 2023؛ Salehi و همکاران، 2023؛ Eshaghzadeh و همکاران، 2021؛ Maleki و همکاران، 2021).

تثبیت به کلیه عملیاتی گفته می‌شود که برای بهینه‌کردن مشخصات ژئوتکنیکی خاک برای هدف مشخصی انجام می‌شود. الیاف می‌تواند به تنهایی و یا به‌صورت مکمل نقش مهمی در



به نسبت الیاف شیشه‌ای‌الخصوص در محیط‌های بازی قوی غیرسمی، غیرقابل احتراق و مقاوم در برابر دماهای بالا هست (Lin و همکاران، 2021؛ Gao و Ma، 2018؛ Wang و همکاران، 2010).

علاوه بر این مصالح، یکی دیگر از مواد جدید مورد استفاده در بهسازی خاک نانومواد هستند. استفاده از نانومواد در زمینه‌های مختلف علمی، پیشرفت چشمگیری داشته است. دلیل اصلی استفاده از مواد نانو در ژئوتکنیک مربوط به ارتقای رفتار مکانیکی و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک است (Cui و همکاران، 2018؛ Hejazi و همکاران، 2012؛ Iranpour و Haddad، 2016؛ Sarli و همکاران، 2020). بررسی‌های گذشته این محققین نشان داد که نانومواد مانند نانوالومینا و نانوسیلیس تأثیر مهمی در ارتقا خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های ضعیف دارند.

Taha و Taha (2012) اظهار داشتند که افزودن نانوالومینا به خاک باعث کاهش رفتار اتساعی و انقباضی خاک‌ها می‌شود. LV و همکاران (2018) بهبود مؤثری در خواص ژئوتکنیکی خاک دانه-ای سست را با افزودن نانوسیلیس به خاک گزارش دادند. Tabarsa و همکاران (2018) همچنین نتایج مشابه را با افزودن دو درصد نانورس به خاک دانه‌ای نشان دادند. Cui و همکاران (2018) با استفاده از آزمون برش مستقیم و تجزیه و تحلیل عکس‌های میکروسکوپی، اثر الیاف کربن و نانوسیلیس بر رفتار مکانیکی و تغییرات ریزساختاری ماسه لای‌دار بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها در این تحقیق نشان داد که پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های بهسازی شده به‌طور قابل توجهی بالاتر از نمونه‌های بهسازی نشده بودند. نتایج تحقیق، الیاف کربن را به‌عنوان ابزاری کلیدی در افزایش زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت نشان داد. از طرف دیگر، نانوسیلیس برای بهبود انسجام مؤثر بوده است.

Changizi و Haddad (2017) گزارش دادند که افزودن نانوسیلیس به خاک رس نرم در بهبود خواص مکانیکی خاک مؤثر است و منجر به افزایش UCS و مقدار CBR شده است.

Sarli و همکاران (2020) رفتار مکانیکی خاک رس بهسازی شده را با افزودن نانوسیلیس و الیاف پلی‌استر بازیافتی مطالعه کردند. نتایج آزمایش‌های تراکم نشان داد که افزودن پلی‌استر بازیافت شده و نانوسیلیس در خاک سست دانه‌ای منجر به کاهش حداکثر دانسیته خشک و افزایش رطوبت بهینه می‌شود. نتایج آزمایش برش مستقیم نشان داد که مقاومت برشی به‌دلیل افزایش الیاف پلی‌استر بازیافت شده یا نانوسیلیس افزایش می‌یابد.

Taha (2018) پژوهشی پیرامون توسعه نانومواد در مهندسی ژئوتکنیک و ژئوزیست محیط انجام داد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در حال حاضر پیشرفت ژئوتکنولوژی و نانومواد در زمینه مهندسی ژئوتکنیک محدود به کاربرد آن به‌عنوان ماده بهبوددهنده بوده است. نتایج مطالعات مرور شده در این تحقیق

تقویت شده انجام شده است. اثر الیاف بر بهبود رفتار مقاومتی خاک به‌شدت وابسته به خصوصیات تغییر شکل ماتریس خاک و همچنین خصوصیات الیاف است که شامل طول الیاف، نسبت ابعاد الیاف، محتوای الیاف و طبیعت الیاف است (Dos Santos و همکاران، 2010).

بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که افزایش مقدار الیاف تا یک مقدار بهینه باعث افزایش مقاومت مصالح خاکی تقویت شده می‌شود و پس از آن ممکن است اضافه شدن الیاف اثر قابل توجهی بر روی افزایش مقاومت نداشته باشد (Estabragh و همکاران، 2012؛ Gray و Ohashi، 1983؛ Santoni و همکاران، 2001؛ Tang و همکاران، 2007؛ Zornberg، 2002).

به‌طور مشابه، با مرور تحقیق‌های گذشته به‌نظر می‌رسد افزایش طول الیاف، مقاومت خاک بهسازی شده با الیاف را افزایش می‌دهد (Gray و Ohashi، 1983؛ Sahlabadi و همکاران، 2021؛ Li و Zornberg، 2013؛ Santoni و همکاران، 2001).

با این حال، برخی محققین متذکر شدند که افزایش مقاومت پس از یک طول آستانه الیاف به‌صورت غیرمتعارف تعدیل می‌یابد (Santoni و همکاران، 2001؛ Gray و Ohashi، 1983). همچنین در برخی تحقیق‌ها، افزایش مقاومت در نمونه‌های تقویت شده با الیاف، تابعی از نسبت الیاف و نسبت ابعاد الیاف (نسبت طول به قطر الیاف) تعریف می‌شود (Li و Zornberg، 2013).

عواملی مانند توزیع الیاف و جهت‌گیری آن‌ها در توده خاک نسبت به صفحه گسیختگی نیز مورد بررسی قرار گرفته است (Michalowski، 2008؛ Diambra و همکاران، 2007). در واقع به‌دلیل تأثیر وزن خود الیاف، الیاف به احتمال زیاد به‌صورت افقی درون توده خاک قرار می‌گیرد. نتایج پژوهش‌های قبلی نشان می‌دهد که مقاومت نمونه‌ها با الیاف را که عمداً در دو جهت مختلف (افقی و عمودی) قرار داده شده‌اند با هم متفاوت است (Michalowski و Čermá، 2003). نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی الیاف افقی از مقاومت بالاتری نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف عمودی برخوردار هستند. برخی از محققین دلیل این امر را به فشردن الیاف در حالت عمودی نسبت داده‌اند که بنابراین به افزایش مقاومت برشی کمک نمی‌کنند (Michalowski و Zhao، 1996؛ Zornberg، 2002). اگرچه در بیشتر تحقیق‌های تجربی در زمینه بهسازی خاک با الیاف، فرض بر این بوده که الیاف به‌طور یکنواخت در تمام نمونه مخلوط شده است، ولی این فرض ممکن است با حالت واقعی توزیع الیاف در توده خاک متفاوت باشد (Park، 2009). در عمل، تراکم موضعی الیاف یا مشکلات اختلاط همسان الیاف با خاک می‌تواند موجب عدم دستیابی به مقاومت پیش‌بینی شده شود.

الیاف بازالت یکی از انواع الیافی است که امروزه در پروژه‌های عمرانی کاربرد زیادی دارد. الیاف بازالت دارای ثبات شیمیایی بالا

پیشنهاد کردند که مقاومت طراحی نمونه‌های خاک در مناطق سرد، بایستی مقاومت خاک پس از 7 چرخه ذوب و انجماد در نظر گرفته شود.

Luo و همکاران (2010) به مطالعه تأثیر ویژگی‌های دینامیکی خاک‌های اصلاح شده با سیمان و آهک پرداختند. در حالت کلی، پارامترهای دینامیکی در خاک‌های طبیعی بسته به درصد آهک و سیمان تحت چرخه ذوب و انجماد افزایش می‌یابد. Boz و Sezer (2018) با بررسی رفتار نمونه‌های تثبیت شده با آهک و تقویت شده با الیاف پلی‌پروپیلن و بازالت نشان دادند که افزایش سیکل‌های ذوب و یخبندان در کل باعث کاهش مقاومت نمونه‌ها شده است. از طرف دیگر، مقاومت نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف بازالت بیشتر است. اگرچه تاکنون مطالعه‌های زیادی بر روی خاک‌های بهسازی شده با افزودنی‌های متفاوت همچون سیمان، آهک، الیاف و نانومواد انجام شده است، ولی تاکنون مطالعه جامعی بر روی مقاومت فشاری، پارامترهای مقاومت برشی و مقاومت در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان ماسه بهسازی شده با نانوسیلیس و الیاف بازالت ارائه نشده است. در این مقاله با استفاده از تک‌محوری و سه‌محوری استاتیکی، رفتار خاک‌های بهسازی شده با درصد‌های مختلف الیاف بازالت و نانوسیلیس تحت اثر سیکل‌های ذوب و یخبندان بررسی شده است.

2- مواد و روش‌ها

در این تحقیق، مقامت فشاری و پارامترهای مقاومت برشی خاک ماسه لای‌دار تقویت شده با الیاف بازالت و نانوسیلیس به‌عنوان یک روش جدید بهسازی خاک ماسه لای‌دار بررسی شده است. برای این منظور یک سری آزمایش تک‌محوری و سه‌محوری استاتیکی برای بررسی اثر مقدار الیاف بازالت، مقدار نانوسیلیس، زمان عمل‌آوری انجام شده است.

2-1- ماسه، الیاف بازالت و نانوسیلیس

در این تحقیق از ماسه موجود در منطقه ورزانه اصفهان استفاده شده است. منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده در این تحقیق در شکل (1) نشان داده شده است. خصوصیات ژئوتکنیکی و فیزیکی خاک مورد استفاده نیز در جدول (1) ارائه شده است. طبق سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS) خاک مورد استفاده خاک ماسه لای‌دار است. در این تحقیق از الیاف بازالت نشان داده شده در شکل (2) استفاده شده است. خصوصیات فیزیکی الیاف مورد استفاده نیز در جدول (2) ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌کنید، الیاف در طول 10 میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته است.

نشان داده است که استفاده از مقدار کم نانومواد (1% وزن خشک خاک اصلی) منجر به تغییر معنی‌دار و بهبود خواص خاک می‌شود. Changizi و Haddad (2015) به بررسی خواص مقاومتی رس نرم اصلاح شده با مخلوط نانوسیلیس و الیاف پلی‌استر بازیافتی پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که افزودن الیاف پلی‌استر بازیافتی و نانوسیلیس سبب افزایش مقاومت نمونه‌های خاک می‌شود. با افزایش مقدار الیاف پلی‌استر بازیافتی و نانوسیلیس در مخلوط خاک هر دو پارامتر مقاومت برشی و مقاومت فشاری محصورنشده بهبود یافته است.

Jassem و Tabarsa (2015) به بررسی تأثیر افزودن نانورس بر رفتار مکانیکی خاک ریزدانه بهسازی شده با الیاف پلی‌پروپیلن پرداختند. در این تحقیق خاک با درصد‌های متفاوت نانورس و الیاف اصلاح شده است. نتایج آزمایش‌های تک‌محوری نشان می‌دهد که افزودن نانورس عملکرد خاک بهسازی شده با الیاف را به‌طور قابل توجهی بهبود می‌دهد.

Cui و همکاران (2018) به بررسی تأثیر الیاف کربن و نانوسیلیس بر خواص برشی خاک لای‌دار پرداختند. در این در تحقیق نمونه‌ها توسط برش مستقیم تحت تنش‌های نرمال متفاوت آزمایش شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مقاومت برشی نمونه‌های خاک بهسازی شده در مقایسه با نمونه‌های خاک بهسازی نشده افزایش چشمگیری داشته‌اند.

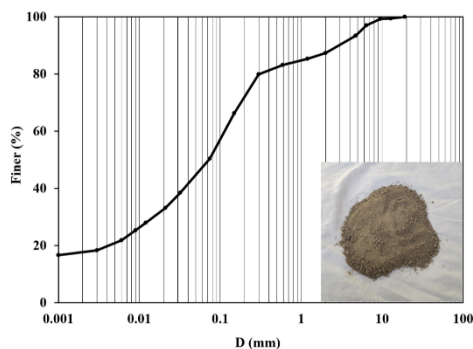
Choobbasti و همکاران (2019) به بررسی تأثیر افزودن نانوکربنات کلسیم و الیاف ضایعات فرش در بهبود رفتار مقاومتی خاک رس پرداختند. در این پژوهش تأثیر نانوکربنات کلسیم (نسبت‌های وزنی 0، 0/4، 0/8 و 1/2 از خاک) به‌عنوان یک نانوذره برای تثبیت و همچنین الیاف ضایعات فرش (نسبت‌های وزنی 0، 0/2، 0/4 و 0/6 درصد از خاک) به‌عنوان مسلح‌کننده بر رفتار خاک بررسی شد. چرخه ذوب انجماد یک فرایند هوازدگی است که اغلب در آب و هوای سرد رخ می‌دهد. انتقال و تغییر وضعیت رطوبت نسبی ناشی از یخ‌زدایی و ذوب شدن باعث شکستن پوشش رسوبات و محصولات هیدراتاسیون می‌شود تا آب بتواند به درون شکاف نفوذ کرده و پس از واکنش با اتصال‌دهنده‌ها، پیوندهای هیدراتاسیون تولید کند (Roustaei و همکاران، 2021).

Simonsen و همکاران (2002) به بررسی تأثیر چرخه ذوب و انجماد بر مدول ارتجاعی در پنج نوع خاک مختلف ماسه لای‌دار، ماسه درشت‌دانه، خاک یخ‌زده، ماسه خوب دانه‌بندی شده و رس دریایی پرداخت. کاهش مدول ارتجاعی در هر پنج نوع خاک مشاهده شد که ناشی از افزایش حجم خاک و سست شدن ساختار خاک در طول چرخه ذوب و انجماد می‌باشد.

Wang (2010) به بررسی تأثیر چرخه ذوب و انجماد بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی رس متراکم پرداختند. مقاومت نمونه‌ها بعد از 3 تا 7 چرخه به حداقل مقدار خود رسید. آن‌ها

جدول 3- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نانوسیلیس مورد

استفاده	
مقدار	خصوصیت / عنصر
235	سطح مخصوص (m ² /g)
25	اندازه متوسط ذرات (μm)
10/5	میانگین اندازه ذرات آگلومره (μm)
200	چگالی متراکم شده (kg/m ³)
6/8	pH
>98/5	SiO ₂ (%)
0/5	SO ₃ (%)



شکل 1- منحنی دانه‌بندی ماسه ورزنه

جدول 1- خصوصیات فیزیکی و ژئوتکنیکی ماسه ورزنه

مقدار	خصوصیت
2/66	G _s
20	عبوری از الک 200
NP	شاخص خمیری
SM	طبقه بندی خاک
9/55	درصد رطوبت بهینه
20/11	وزن مخصوص خشک حداکثر (kN/m ³)
15	چسبندگی (kPa)
35	زاویه اصطکاک (°)

2-2- آماده‌سازی نمونه‌ها

برای آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا درصدهای مختلف مصالح (ماسه، الیاف و نانوسیلیس) بعد از وزن کردن با هم مخلوط شد. برای آماده‌سازی نمونه‌ها با افزودنی‌های مختلف، مواد را حدود 15 دقیقه با هم ترکیب کرده به طوری که مصالح کاملاً آمیخته شود و از توزیع یکنواخت افزودنی‌ها مطمئن شویم. برای این کار از مخلوط‌کن استفاده شده است. بعد از آن، رطوبت بهینه مربوط به هر نمونه با توجه به مقادیر مواد افزودنی، به آن آب اضافه شده است و دوباره با مخلوط‌کن، مصالح را در آمیخته تا مخلوط کاملاً همگن شود و بعد از آن مصالح را داخل قالب ریخته و آن را متراکم شد. بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها، آن‌ها را درون پلاستیک‌های زیپ-دار قرار داده و درون یک جعبه قرار داده تا زمان عمل‌آوری آن فرارسد. عمل‌آوری نمونه‌ها در دمای محیط آزمایشگاه انجام شده است. بعد از اتمام زمان عمل‌آوری، آزمایش مورد نظر (تک‌محوری یا سه‌محوری) بر روی نمونه انجام شده است. در برخی نمونه‌ها اثر سیکل‌های ذوب و یخبندان بر روی پارامترهای مقاومت فشاری و برشی بررسی شده است. برای بررسی اثر سیکل‌های ذوب و یخبندان، ابتدا نمونه‌ها مطابق نمونه‌های بدون اعمال سیکل ذوب و یخبندان عمل‌آوری شده است. نمونه‌ها برای بررسی اثر سیکل‌های ذوب و یخبندان، در 28 روز عمل‌آوری شده‌اند. بعد از عمل‌آوری، نمونه‌ها از جعبه و پلاستیک خارج شده و تحت سیکل‌های مورد نظر ذوب و یخبندان قرار گرفته‌اند. برای اعمال یک سیکل ذوب و یخبندان، ابتدا نمونه حدود 12 ساعت در دمای 20- درجه درون فریزر قرار گرفته و بعد از آن خارج شده است و درون فر با دمای 20+ درجه تا 12 ساعت قرار گرفته‌اند.

2-3- آزمایش تک‌محوری

بعد از عمل‌آوری نمونه‌ها، آن‌ها را از پلاستیک خارج کرده و زیر جک بارگذاری دستگاه تک‌محوری قرار می‌دهیم. این آزمایش طبق ASTM-D2166 انجام شده است. برای این آزمایش، از نمونه‌هایی با قطر 5 سانتی‌متر و ارتفاع 10 سانتی‌متر استفاده شده است.

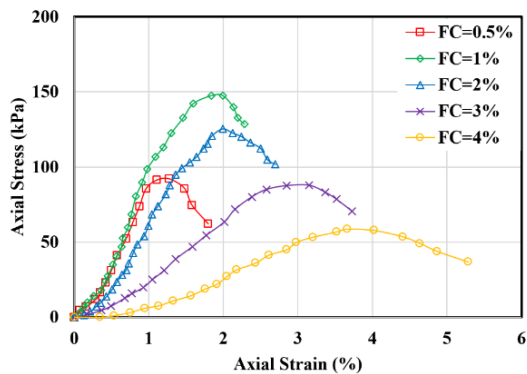


شکل 2- الیاف بازالت مورد استفاده در این تحقیق

جدول 2- خصوصیات الیاف بازالت مورد استفاده

مقدار	خصوصیت
10	طول (mm)
17	قطر (μm)
2/61	جرم مخصوص (g/cm ³)
95	مدول الاستیک (GPa)
3000	مقاومت کششی (MPa)

افزودنی دیگر مورد استفاده در این تحقیق، نانوسیلیس است که خصوصیات این افزودنی در جدول (3) ارائه شده است.



شکل 3- نمودار تنش- کرنش به دست آمده برای نمونه‌های بهسازی شده با الیاف

اگر چه افزایش مقدار الیاف از 0/5 تا 4% باعث افزایش کرنش متناظر با تنش فشاری ماکزیمم شده است که این نشان می‌دهد افزایش الیاف باعث تغییر رفتار نمونه‌ها از حالت گسیختگی به حالت نرم شده است. قابل ذکر است که نمونه‌های بهسازی شده با الیاف بعد از ساخت نمونه تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند. در ادامه، نتایج مرتبط با نمونه‌های تثبیت شده با درصد‌های مختلف نانوسیلیس (5، 10، 15 و 20 درصد) ارائه شده است. نمونه‌های حاوی نانوسیلیس در زمان‌های عمل‌آوری 7، 14، 28، 60 و 90 روزه مورد بارگذاری قرار گرفته‌اند. نتایج به دست آمده برای نمونه‌های تثبیت شده با نانوسیلیس در روزهای عمل‌آوری مختلف در شکل (4) نشان داده شده است. همان‌طور که در اینجا مشاهده شده است نمونه‌های حاوی 10 درصد نانو، بیشترین مقاومت را کسب نموده است.

بارگذاری با سرعت کرنش ثابت برابر با 1% بر دقیقه انجام شده است. نتایج به دست آمده از این آزمایش به شکل نمودارهای تنش فشاری- کرنش محوری می‌باشد.

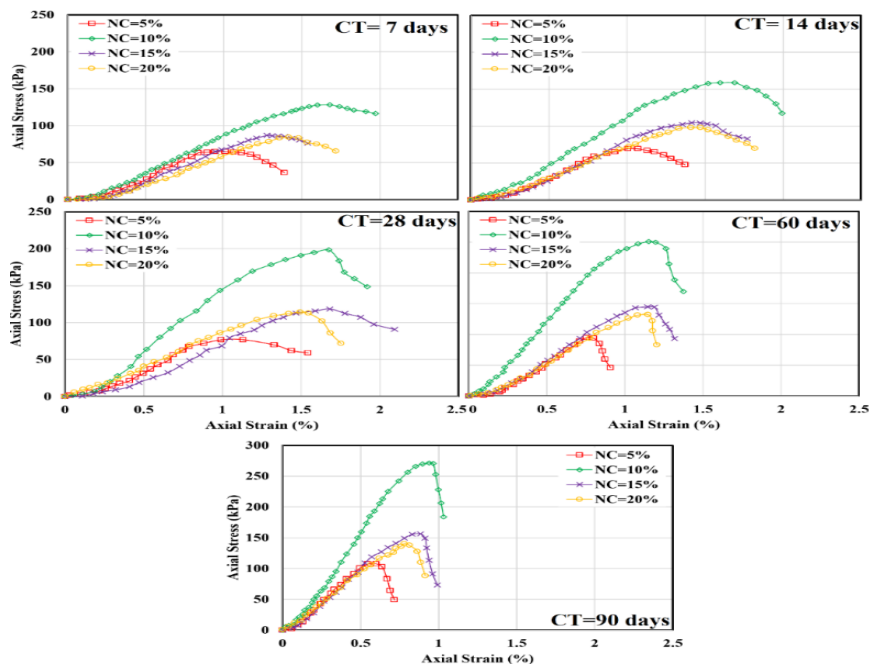
2-4- آزمایش سه‌محوری

مشابه آزمایش تک‌محوری، آزمایش‌های سه‌محوری نیز بر روی نمونه‌ها بعد از زمان عمل‌آوری مورد نظر انجام شده است. آزمایش‌های سه‌محوری بر اساس ASTM D4767 انجام شده و در این آزمایش‌ها نیز از نمونه‌ها با قطر 5 سانتی‌متر و ارتفاع 10 سانتی‌متر استفاده شده است. بعد از آن که نمونه ساخته شده درون سلول قرار گرفت، فشار همه‌جانبه وارد بر نمونه را با توجه به مقدار تنش تحکیمی مؤثر افزایش داده شده است. در آزمایش‌های استاتیکی بعد از اعمال تنش همه‌جانبه مورد نظر (100، 200 یا 400 کیلوپاسکال) بارگذاری با سرعت 0/5 میلی‌متر بر دقیقه شروع شده و تا کرنش حدود 20 درصد ادامه یافته است.

3- نتایج و بحث

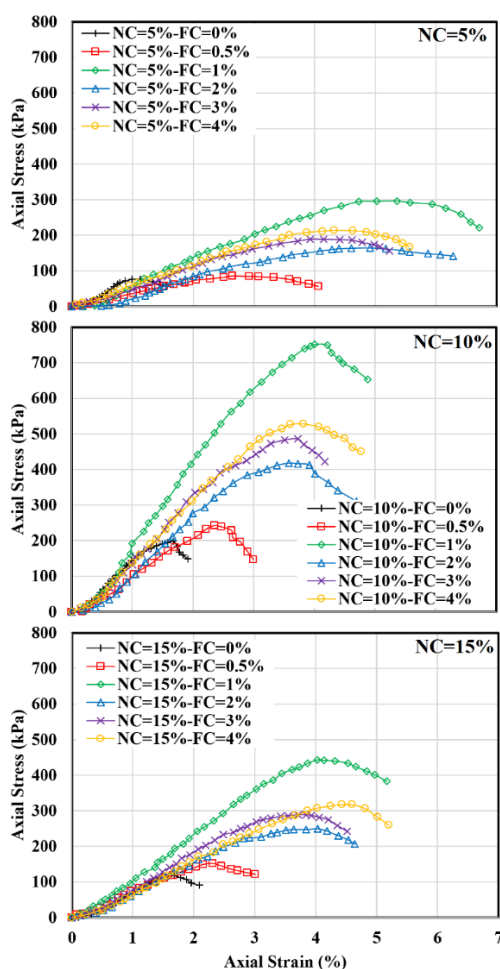
3-1- مقاومت فشاری نمونه‌ها

نمودار تنش- کرنش به دست آمده برای نمونه‌های بهسازی شده با الیاف بازالت در شکل (3) نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود افزایش مقدار الیاف از 0/5 تا 1% باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه شده است، اگر چه بعد از آن با افزایش مقدار الیاف از 1 تا 4% مقدار مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش یافته است.



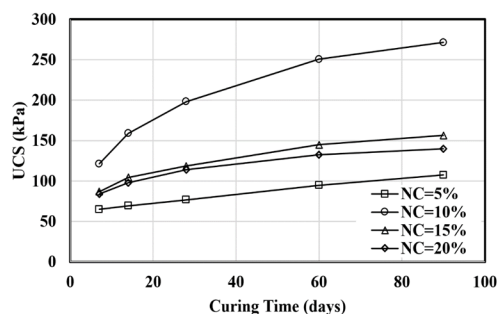
شکل 4- نمودار تنش- کرنش به دست آمده برای نمونه‌های تثبیت شده با نانوسیلیس

در ادامه، نتایج مرتبط با نمونه‌های حاوی ترکیبی از نانوسیلیس و الیاف بازالت ارائه شده است. در اینجا درصد‌های مختلف 5، 10 و 15 برای نانوسیلیس با درصد‌های مختلف الیاف بازالت (0، 0/5، 1، 2، 3 و 4%) استفاده شده است. نتایج مربوط به این نمونه‌ها در 28 روز عمل‌آوری در شکل (6) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای درصد‌های مختلف نانوسیلیس، مقدار 1% الیاف به‌عنوان مقدار بهینه یافته شده است. همچنین مشاهده می‌شود، اضافه شدن الیاف بازالت به نمونه‌های حاوی نانوسیلیس، باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در کرنش متناظر با نقطه شکست می‌شود. در واقع رفتار ترد نمونه‌ها به رفتار نرم تبدیل شده است. به‌ازای یک درصد ثابت الیاف، نمونه‌های حاوی 10 درصد نانوسیلیس بیشترین مقاومت را به‌دست آورده‌اند. در مجموع استفاده از 1% الیاف به‌همراه 10% نانوسیلیس به‌عنوان مقدار بهینه برای بهسازی می‌توان در نظر گرفت. برای نمونه‌های حاوی 10% نانوسیلیس و درصد‌های مختلف الیاف، اثر تعداد روزهای عمل‌آوری مورد بررسی واقع شده است.

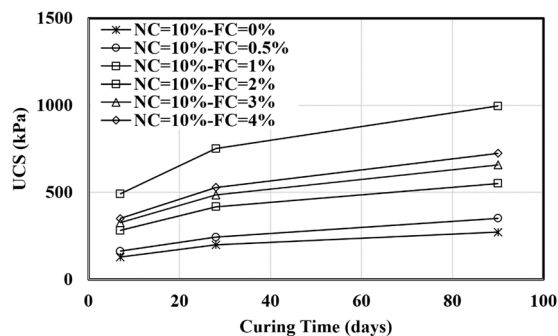


شکل 6- نمودار تنش- کرنش به‌دست آمده برای نمونه‌های بهسازی شده با نانوسیلیس والیاف بازالت

در واقع افزایش مقدار نانو از 5 تا 10 درصد باعث افزایش مقاومت و بعد از آن افزایش مقدار نانو از 10 تا 20 درصد باعث کاهش مقاومت شده است. در واقع استفاده از 5 و 10 درصد نانو، باعث افزایش مناسبی سیمان‌تاسیون اطراف ذرات ماسه شده است و افزایش بیشتر نانو، باعث ایجاد فاصله بیشتر بین دانه‌ها شده است که این امر موجب کاهش مقاومت نمونه‌ها شده است. از طرف دیگر، افزایش زمان عمل‌آوری از 7 تا 90 روز باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است. به‌عنوان مثال، در نمونه‌های حاوی 10 درصد نانو، مقدار ماکزیمم تنش فشاری برابر با 120 کیلوپاسکال بوده است که با افزایش تعداد روزهای عمل‌آوری تا 90 روز، مقدار آن به عدد 270 کیلوپاسکال رسیده است. اثر درصد‌های مختلف نانو با افزایش روز عمل‌آوری از 7 تا 90 روز چشمگیرتر شده است. به‌عنوان مثال در روز عمل‌آوری 7 روز، مقاومت نمونه حاوی 10 درصد نانو حدود 1/8 برابر مقاومت نمونه حاوی 5 درصد نانو است. در حالی‌که در روز عمل‌آوری 90 روز، مقاومت نمونه حاوی 10 درصد نانو حدود 2/5 برابر مقاومت نمونه حاوی 5 درصد نانو است. افزایش زمان عمل‌آوری باعث رفتار تردتر نمونه‌ها نیز شده است به‌طوری‌که کرنش متناظر با نقطه تنش ماکزیمم با افزایش زمان عمل‌آوری کمتر شده است. تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با نانوسیلیس در مقابل زمان عمل‌آوری در شکل (5) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، اثر روزهای عمل‌آوری در روزهای اولیه عمل‌آوری مهم‌تر است و با افزایش روزهای عمل‌آوری از 7 تا 90 روز شیب نمودار برای درصد‌های مختلف نانو کمتر شده است. مقایسه نتایج نمونه‌های بهسازی شده با الیاف و نمونه‌های بهسازی شده با نانوسیلیس نشان می‌دهد، به‌طور کلی نمونه‌های حاوی نانوسیلیس مقاومت فشاری بالاتری کسب نموده‌اند و از طرف دیگر مقدار کرنش متناظر با نقطه شکست در نمونه‌های حاوی الیاف بیشتر از نمونه‌های حاوی نانوسیلیس است که نشان می‌دهد نمونه‌های حاوی الیاف رفتار نرم‌تری نسبت به نمونه‌های حاوی نانوسیلیس داشته است.



شکل 5- تغییرات مقدار مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با نانوسیلیس در مقابل زمان عمل‌آوری

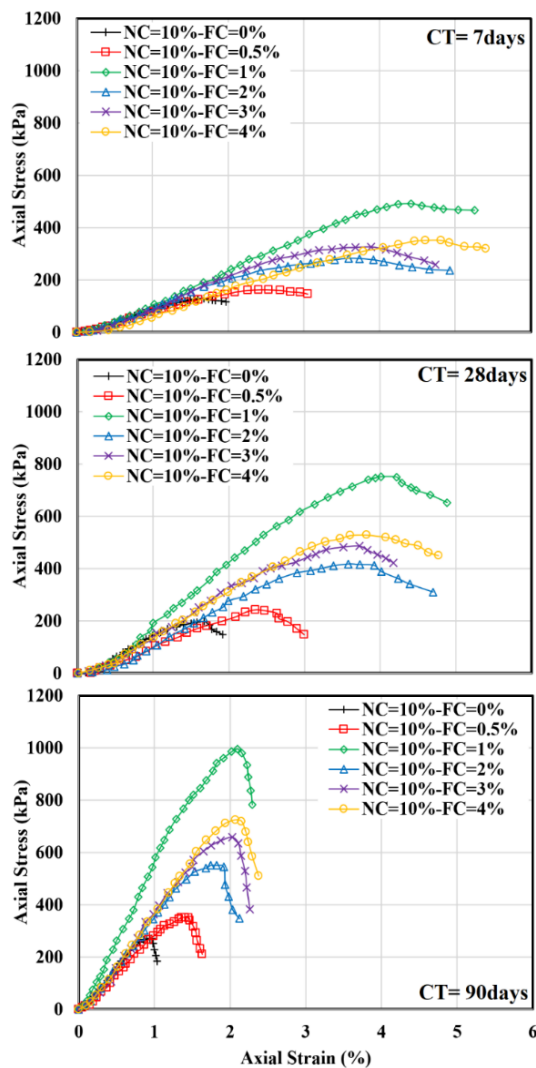


شکل 8- مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با 10% نانوسیلیس و مقادیر مختلف الیاف در مقابل زمان عمل‌آوری

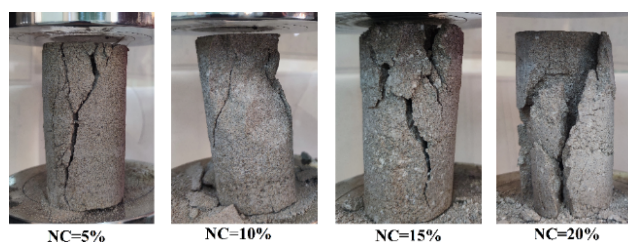
در این نمودار قابل مشاهده است که نمونه‌های حاوی 1% الیاف به نسبت سایر نمونه‌ها برای یک زمان عمل‌آوری خاص مقاومت فشاری بیشتری دارند. در نگاه کلی نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های تک‌محوری می‌توان نتیجه گرفت که 10% نانوسیلیس به‌همراه 1% الیاف بازالت بهترین مقدار افزودنی است و می‌توان به‌عنوان ترکیب بهینه جهت بهسازی خاک مورد استفاده در نظر گرفت. در این تحقیق قصد داریم بر اساس شکل گسیختگی نمونه‌ها بعد از آزمایش، اثر افزودنی‌ها مختلف یعنی الیاف بازالت و نانوسیلیس را مورد بررسی قرار دهیم. عکس‌های ارائه شده در این بخش برای نمونه‌های حاوی نانوسیلیس مربوط به نمونه‌های عمل‌آوری شده در 28 روز است. اثر اضافه شدن درصدهای مختلف نانوسیلیس بر روی الگوی شکست نمونه‌ها در شکل (9) ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل‌های (9)، (10) و (11) مشاهده می‌شود، ترک‌های بزرگ در طول نمونه ظاهر شده است که نشان از رفتار ترد این نمونه‌ها دارد و با بیشتر شدن مقدار نانوسیلیس از 5 تا 20 درصد عرض ترک‌ها بیشتر شده و نمونه رفتار تردتری از خود نشان داده است. به‌عنوان مثال، مقایسه نمونه حاوی 5% نانوسیلیس و 20% نانوسیلیس نشان می‌دهد که نمونه حاوی 5% نانو علاوه بر یک ترک بزرگ طولی داری تعداد زیادی ترک کوچک است ولی در نمونه حاوی 20% نانو دو ترک طولی عمیق اتفاق افتاده و ترک‌های ریز تقریباً ناچیز هستند. اضافه شدن نانوسیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است اما این رفتار ترد در نمونه می‌تواند به‌عنوان معیاری منفی باشد. در شکل (10) و (11) اثر درصدهای مختلف الیاف بازالت بر روی الگوی شکست نمونه‌های بدون نانوسیلیس و حاوی نانوسیلیس مشاهده می‌شود. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌کنید برخلاف نمونه‌های حاوی نانوسیلیس، در تمامی نمونه‌ها ترک‌های ریز ایجاد شده است. در واقع، وجود الیاف باعث عدم گسترش ترک تا انتهای نمونه یا به‌عبارت دیگر عدم ایجاد ترک‌های طولی می‌شود که نشان‌دهنده مزیت‌های اصلی استفاده از الیاف در بهسازی خاک است.

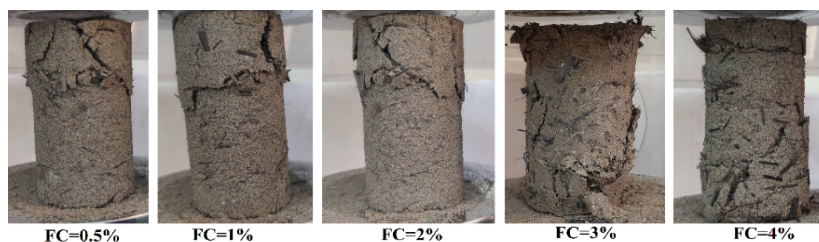
نمودارهای تنش- کرنش مربوط به این نمونه‌ها در شکل (7) نشان داده شده است. در اینجا نیز افزایش روز عمل‌آوری موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است و از طرفی با افزایش زمان عمل‌آوری، مقدار کرنش متناظر با نقطه شکست کاهش یافته است. به‌عبارت دیگر، اثر اضافه شدن الیاف در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس بر روی افزایش مقاومت با گذشت زمان بیشتر شده است. تغییرات مقدار مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با 10% نانوسیلیس و مقادیر مختلف الیاف در مقابل زمان عمل‌آوری در شکل (8) نشان داده شده است. تغییر شیب خط از 7 تا 28 روز نسبت به شیب خط از 28 تا 90 روز نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی نانوسیلیس و الیاف در روزهای اولیه (کمتر از 28 روز) بیشترین مقاومت خود را به‌دست آورده‌اند. بعد از آن با گذشت زمان افزایش مقاومت به نسبت روزهای ابتدایی کمتر است.



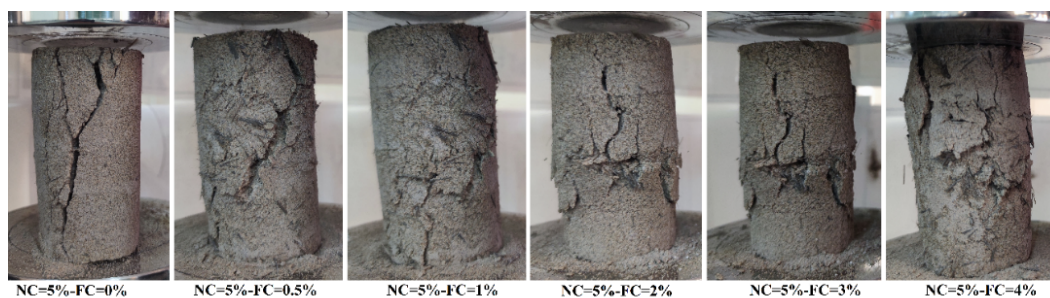
شکل 7- نمودار تنش- کرنش به‌دست آمده برای نمونه‌های بهسازی شده با 10% نانوسیلیس و مقادیر مختلف الیاف بازالت



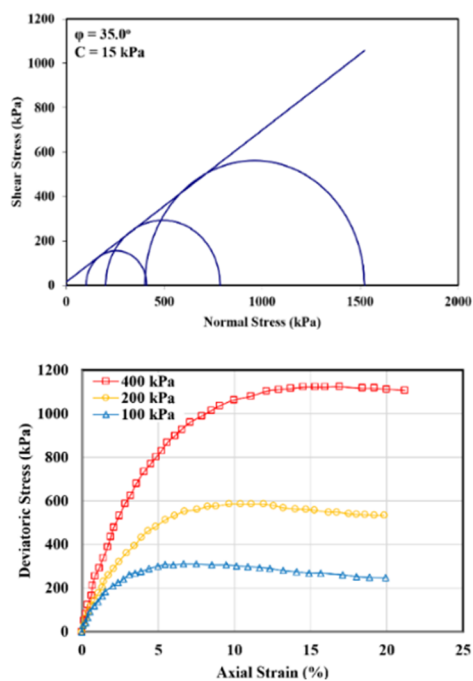
شکل 9- اثر اضافه شدن نانوسیلیس در الگوی شکست نمونه



شکل 10- اثر اضافه شدن الیاف بازالت در الگوی شکست نمونه



شکل 11- اثر اضافه شدن الیاف بازالت در الگوی شکست نمونه تثبیت شده با 5% نانوسیلیس



شکل 12- نمودار تنش انحرافی - کرنش محوری و پوش گسیختگی به دست آمده برای ماسه خالص

3-2- پارامترهای مقاومت برشی

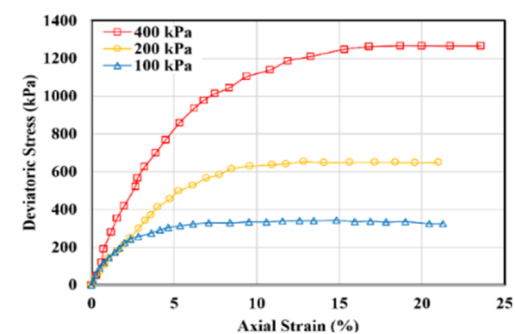
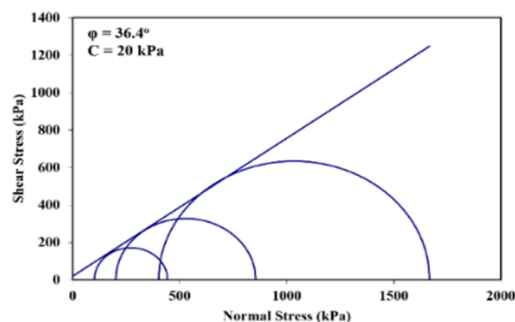
برای بررسی پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها در این تحقیق، مجموعه‌ای از آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی انجام گرفته است. تمامی آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی در تنش‌های همه جانبه 100، 200 و 400 کیلوپاسکال بر روی نمونه‌های حاوی الیاف و نانوسیلیس با درصد رطوبت اولیه حدود رطوبت بهینه انجام شده است. در واقع نمونه‌ها اشباع نشده است و با درصد رطوبت اولیه آزمایش‌ها انجام شده است. نمودار تنش انحرافی - کرنش محوری به دست آمده برای ماسه خالص در شکل (12) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، مقادیر تنش انحرافی بعد از رسیدن به مقدار ماکزیمم یک روند کاهشی از خود نشان داده است. از طرف دیگر، همان‌طور که انتظار می‌رفت، افزایش تنش همه‌جانبه باعث افزایش مقادیر تنش انحرافی ماکزیمم و همچنین تنش انحرافی باقی‌مانده شده است. مقادیر زاویه اصطکاک و چسبندگی، 35 درجه و 15 کیلوپاسکال برای خاک مورد آزمایش بدون افزودنی به دست آمده است.

نمودار تنش انحرافی- کرنش محوری برای نمونه ماسه بهسازی شده با 1% الیاف در شکل (13) نشان داده شده است. مقایسه نتایج به دست آمده برای نمونه حاوی الیاف با نتایج به دست آمده برای نمونه ماسه خالص نشان می‌دهد که استفاده از الیاف باعث افزایش تنش انحرافی ماکزیمم و باقی‌مانده شده است. زاویه اصطکاک 36/4 درجه و چسبندگی برابر با 20 کیلوپاسکال برای خاک مورد آزمایش، با 1% الیاف بازالت به دست آمده است. مقایسه مقادیر به دست آمده با نتایج به دست آمده برای ماسه خالص نشان می‌دهد که الیاف بازالت باعث افزایش هر دو پارامتر زاویه اصطکاک و چسبندگی شده است. اگر چه مقدار افزایش در چسبندگی بیشتر از زاویه اصطکاک است. درگیر شدن الیاف با دانه‌های خاک باعث افزایش پارامترهای مقاومت برشی شده است. نتایج به دست آمده برای نمونه‌های حاوی 10% نانوسیلیس در شکل (14) ارائه شده است. همان‌طور که در نتایج دیده می‌شود، اضافه شدن نانوسیلیس نسبت به نمونه ماسه خالص نیز باعث افزایش مقاومت شده است. مقادیر زاویه اصطکاک و چسبندگی برابر با 36/7 درجه و 51 کیلوپاسکال به دست آمده است. مقایسه نتایج به دست آمده برای پارامترهای مقاومت برشی با نمونه ماسه خالص یا نمونه ماسه حاوی 1% الیاف بازالت، نشان می‌دهد که نانوسیلیس باعث افزایش کمی در زاویه اصطکاک و افزایش قابل ملاحظه‌ای در چسبندگی شده است که به دلیل پدیده سیمان‌تاسیون ایجاد شده توسط ذرات نانوسیلیس در بین ذرات ماسه است.

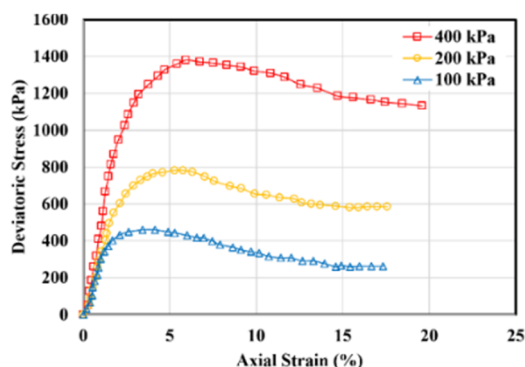
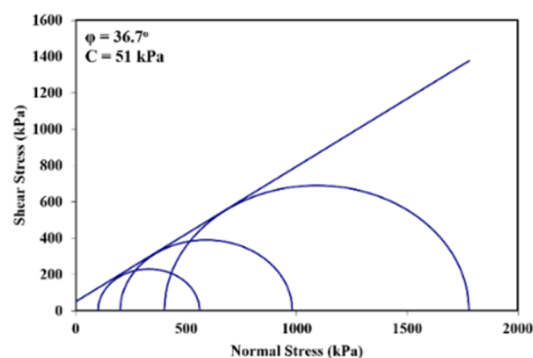
در ادامه مجموعه‌ای از آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی برای بررسی اثر درصدهای مختلف الیاف بر روی نمودار تنش انحرافی- کرنش محوری انجام شده است. این آزمایش‌ها در تنش همه جانبه 200 کیلوپاسکال انجام شده است. نمودار تنش انحرافی- کرنش محوری مربوط به این نمودارها در شکل (15) ارائه شده است. برای بررسی دقیق‌تر تغییرات تنش انحرافی ماکزیمم و شاخص تردی¹ در شکل (4-21) ارائه شده است. قابل ذکر است شاخص تردی که در تحقیقات گذشته نیز استفاده شده است به صورت زیر تعریف شده است (Bao و همکاران، 2020؛ Güllü و Khudir، 2014؛ Liu و همکاران، 2020؛ Lv و همکاران، 2019؛ Pincus و همکاران، 1993؛ Lê و Pié، 2012؛ Wang و همکاران، 2021؛ Xiao و همکاران، 2018؛ Tiwari و Yadav، 2017).

$$I_b = \frac{q_{max} - 1}{q_r} \quad (1)$$

که در اینجا q_{max} مقدار تنش انحرافی ماکزیمم و q_r مقدار تنش انحرافی در حالت باقی‌مانده (تقریباً انتهای منحنی تنش انحرافی- کرنش محوری) است.

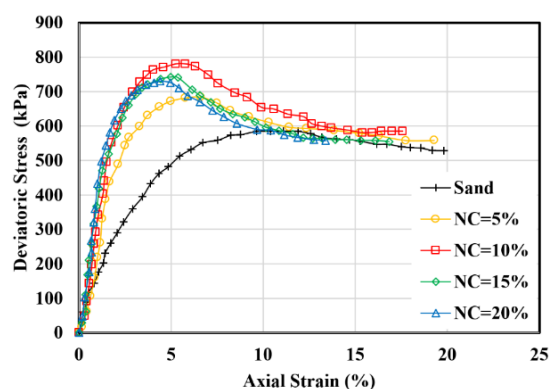


شکل 13- نمودار تنش انحرافی- کرنش محوری و پوش گسیختگی به دست آمده برای نمونه حاوی 1% الیاف بازالت

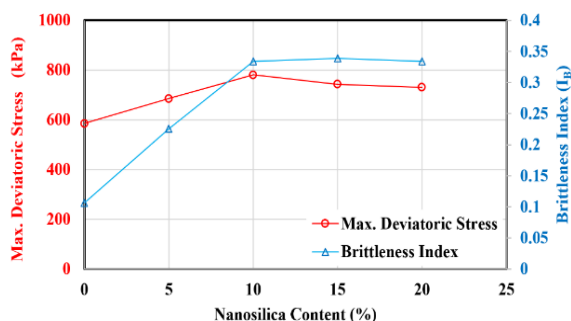


شکل 14- نمودار تنش انحرافی- کرنش محوری و پوش گسیختگی به دست آمده برای نمونه حاوی 10% نانوسیلیس

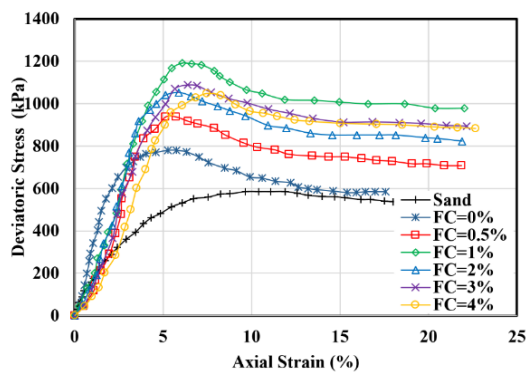
مراحل قبل، مقدار 10% نانوسیلیس به عنوان مقدار بهینه نانوسیلیس به دست آمد. در ادامه مقادیر مختلف الیاف به نمونه حاوی 10% نانوسیلیس اضافه شده است و تحت تنش 200 کیلوپاسکال به منظور بررسی اثر الیاف بر روی منحنی تنش انحرافی - کرنش محوری در دستگاه سه محوری مورد آزمایش قرار گرفته است. همان طور که در شکل (19) نشان داده شده است، اضافه شدن الیاف بازالت به نمونه حاوی 10% نانوسیلیس باعث افزایش تنش انحرافی ماکزیمم و باقی مانده شده است.



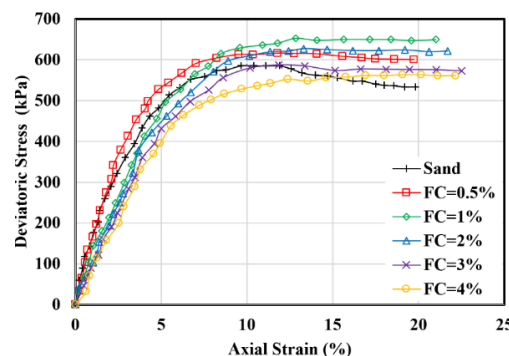
شکل 17- نمودار تنش انحرافی - کرنش محوری به دست آمده برای ماسه حاوی درصدهای مختلف نانوسیلیس



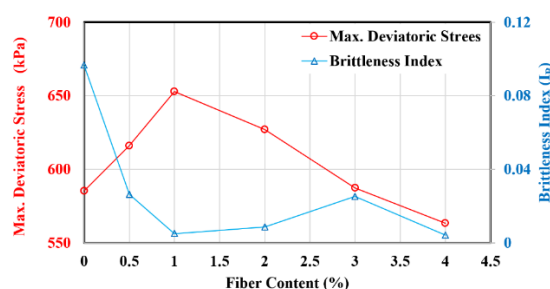
شکل 18- تغییرات تنش انحرافی ماکزیمم و شاخص تردی در مقابل مقدار نانوسیلیس اضافه شده



شکل 19- نمودار تنش انحرافی - کرنش محوری به دست آمده برای ماسه حاوی 10% نانوسیلیس و درصدهای مختلف الیاف



شکل 15- نمودار تنش انحرافی - کرنش محوری به دست آمده برای ماسه حاوی درصدهای مختلف الیاف بازالت



شکل 16- تغییرات تنش انحرافی ماکزیمم و شاخص تردی در مقابل مقدار الیاف بازالت اضافه شده

تغییرات تنش انحرافی ماکزیمم و شاخص تردی در شکل (16) نشان داده شده است. همان طور که نتایج نشان می دهد اضافه شدن الیاف تا 1% به نمونه ماسه باعث افزایش تنش انحرافی ماکزیمم شده است و بعد از افزایش بیشتر الیاف بازالت باعث کاهش تنش انحرافی ماکزیمم شده است. بیشترین مقدار تنش انحرافی ماکزیمم در نمونه حاوی 1% الیاف به دست آمده است. از طرف دیگر اضافه شدن الیاف به نمونه های خاکی باعث کاهش شاخص تردی نمونه ها شده است.

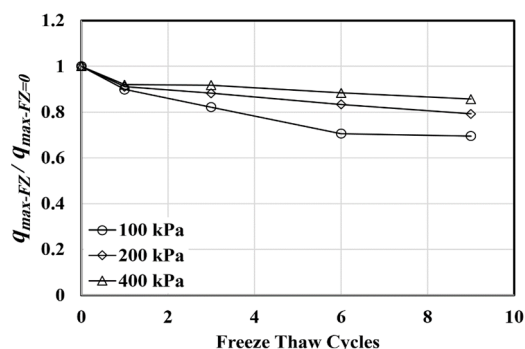
در این قسمت مجموعه ای از آزمایش های سه محوری استاتیکی بر روی نمونه های حاوی درصدهای مختلف نانوسیلیس انجام شده است. این آزمایش ها در تنش همه جانبه 200 کیلوپاسکال انجام شده است. نمودار تنش انحرافی - کرنش محوری این نمونه ها در شکل (17) نشان داده شده است.

تغییرات تنش انحرافی ماکزیمم و شاخص تردی در شکل (18) نشان داده شده است. همان طور که در اینجا نشان داده شده است، بیشترین مقدار تنش انحرافی ماکزیمم در نمونه حاوی 10% نانوسیلیس به دست آمده است. از طرف دیگر اضافه شدن نانوسیلیس باعث افزایش شاخص تردی شده است. در واقع اضافه شدن الیاف و نانوسیلیس تاثیر متفاوتی نسبت به هم بر روی مقدار شاخص تردی داشته است. با توجه به نتایج به دست آمده در

همان‌طور که در این شکل می‌بینید، افزایش سیکل‌های ذوب و یخبندان در هر سه تنش همه جانبه 100، 200 و 400 کیلوپاسکال باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در تنش ماکزیمم شده است. اگرچه تنش انحرافی باقی‌مانده تغییری زیادی نکرده است. در واقع نتایج نشان می‌دهد که سیکل‌های ذوب و یخبندان باعث تغییر بافت خاک می‌شود. اما بعد از اعمال بارگذاری و بروز کرنش به‌دنبال آن، در کرنش‌های بزرگ‌تر، اثر سیکل‌های ذوب و یخبندان کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند به دلیل تغییر بیش از حد بافت خاک تحت بارگذاری باشد، که اثر سیکل‌های ذوب و یخبندان را تا حدودی خنثی کرده است.

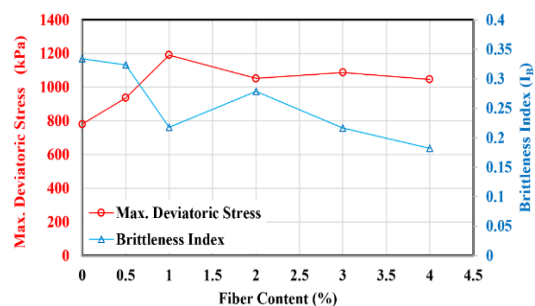
شکل (22) تغییرات نسبت تنش انحرافی ماکزیمم در نمونه‌های تحت سیکل‌های ذوب و یخبندان را به تنش انحرافی ماکزیمم نمونه‌های بدون اعمال سیکل‌های ذوب و یخبندان نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بیشترین نرخ کاهش برای نمونه‌های تحت تنش همه جانبه 100 کیلوپاسکال و کمترین مقدار کاهش برای نمونه‌های تحت تنش 400 کیلوپاسکال است. به عبارت دیگر اعمال تنش همه جانبه بالاتر باعث کاهش اثر سیکل‌های ذوب و یخبندان شده است که این می‌تواند به دلیل تغییر بافت بیشتر خاک به دلیل افزایش تنش همه‌جانبه باشد که باعث می‌شود اثر سیکل‌های ذوب و یخبندان کاهش یابد.

تغییرات زاویه اصطکاک و چسبندگی به دلیل اعمال سیکل‌های ذوب و یخبندان در شکل (23) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، اعمال سیکل‌های ذوب و یخبندان باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در چسبندگی شده است. به عبارت دیگر با اعمال 9 سیکل ذوب و یخبندان، مقدار چسبندگی از 51 کیلوپاسکال به 21 کیلوپاسکال رسیده است که حدود 58 درصد کاهش یافته است. در حالی که زاویه اصطکاک تغییرات خیلی کمتری داشته است. با اعمال 9 سیکل ذوب و یخبندان، مقدار زاویه اصطکاک از 36/7 به 35/5 کیلوپاسکال رسیده است که حدود 3 درصد کاهش یافته است.



شکل 22- تغییرات نسبت تنش انحرافی ماکزیمم به دلیل اعمال سیکل‌های ذوب و یخبندان برای ماسه حاوی 10% نانوسیلیس

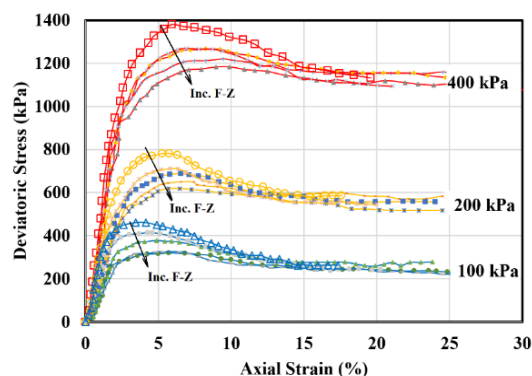
در اینجا نیز مقدار الیاف 1% به‌عنوان مقدار بهینه شناخته شده است که بیشترین تنش انحرافی ماکزیمم و باقی‌مانده را دارد. تغییرات تنش انحرافی ماکزیمم و شاخص تردی نمونه حاوی 10% نانوسیلیس در مقابل مقدار الیاف بازالت اضافه شده در شکل (20) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل می‌بینید، اضافه شدن الیاف باعث افزایش تنش انحرافی ماکزیمم و کاهش شاخص تردی شده است.



شکل 20- تغییرات تنش انحرافی ماکزیمم و شاخص تردی نمونه حاوی 10% نانوسیلیس والیاف بازالت در مقابل مقدار الیاف بازالت اضافه شده

3-3- اثر سیکل‌های ذوب و یخبندان

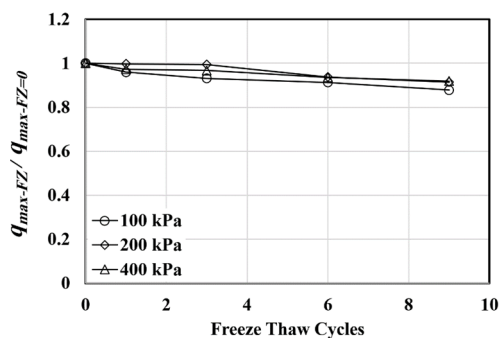
در این قسمت برای بررسی اثر تعداد سیکل‌های ذوب و یخبندان (0، 1، 3، 6 و 9) بر روی پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها، مجموعه‌ای از آزمایش‌های سه‌محوری انجام شده است. نمونه‌های حاوی 10% نانوسیلیس، نمونه‌های حاوی 1% الیاف بازالت و نمونه‌های حاوی 10% نانوسیلیس و 1% الیاف بازالت به‌عنوان نمونه‌های بهینه انتخاب شده است. اثر تعداد سیکل‌های ذوب و یخبندان بر روی نمودار تنش انحرافی- کرنش محوری در شکل (21) نشان داده شده است.



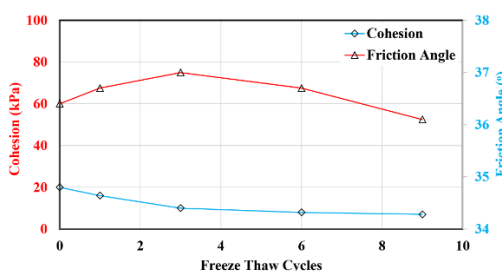
شکل 21- اثر تعداد سیکل‌های ذوب و یخبندان بر روی نمودار تنش انحرافی- کرنش محوری به‌دست آمده برای ماسه حاوی 10% نانوسیلیس

تغییرات زاویه اصطکاک و چسبندگی به دلیل اعمال سیکل - های ذوب و یخبندان در شکل (26) نشان داده شده است. همان - طور که در این شکل مشاهده می شود، اعمال سیکل های ذوب و یخبندان باعث کاهش چسبندگی شده است. با اعمال 9 سیکل ذوب و یخبندان، مقدار چسبندگی از 20 کیلوپاسکال به 7 کیلوپاسکال رسیده است که حدود 65 درصد کاهش یافته است. در حالی که زاویه اصطکاک تغییرات خیلی مهمی نداشته است. در سیکل های 3 و 6، مقدار زاویه اصطکاک کمی افزایش یافته و بعد از آن یک روند کاهشی داشته است. اگرچه تغییرات زاویه اصطکاک کلاً کمتر از یک درجه است. در نتیجه در اینجا نیز اثر سیکل های ذوب و یخبندان عمدتاً بر روی چسبندگی است.

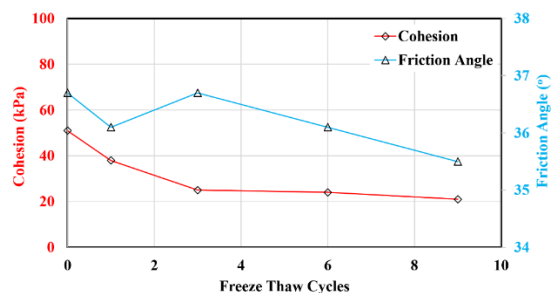
اثر تعداد سیکل های ذوب و یخبندان بر روی نمودار تنش انحرافی - کرنش محوری در شکل (27) برای نمونه های حاوی 10% نانوسیلیس و 1% الیاف بازالت نشان داده شده است. همان طور که در این شکل می بینید، افزایش سیکل های ذوب و یخبندان در هر سه تنش همه جانبه 100، 200 و 400 کیلوپاسکال باعث کاهش در تنش ماکزیمم و باقی مانده شده است. نسبت به نمونه های حاوی 10% نانوسیلیس، اثر سیکل های ذوب و یخبندان بر روی نمونه های حاوی 10% نانوسیلیس و 1% الیاف بازالت کمتر است. اگرچه اثر آن بیشتر از نمونه های حاوی فقط 1% الیاف بازالت است. در واقع الیاف از اثر مخرب سیکل های ذوب و یخبندان کاسته است.



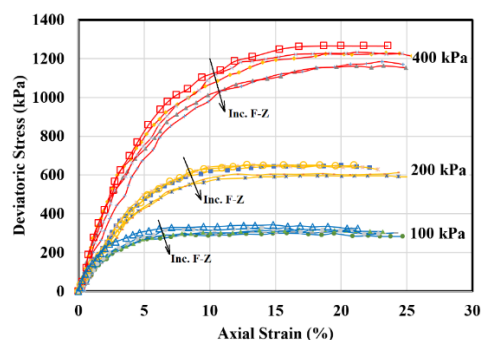
شکل 25- تغییرات نسبت تنش انحرافی ماکزیمم به دلیل اعمال سیکل های ذوب و یخبندان برای ماسه حاوی 1% الیاف بازالت



شکل 26- تغییرات زاویه اصطکاک و چسبندگی به دلیل اعمال سیکل های ذوب و یخبندان برای ماسه حاوی 1% الیاف بازالت



شکل 23- تغییرات زاویه اصطکاک و چسبندگی به دلیل اعمال سیکل های ذوب و یخبندان برای ماسه حاوی 10% نانوسیلیس

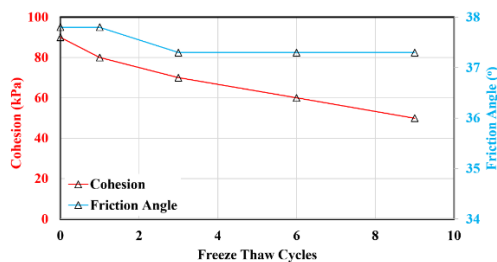


شکل 24- اثر تعداد سیکل های ذوب و یخبندان بر روی نمودار تنش انحرافی - کرنش محوری به دست آمده برای ماسه حاوی 1% الیاف بازالت

در نتیجه اثر سیکل های ذوب و یخبندان عمدتاً بر روی چسبندگی است. در واقع تکرار سیکل های ذوب و یخبندان به دلیل افزایش حجم قطرات آب در بین حفرات خاک در زمان انجماد باعث ایجاد ترک و کاهش سیمان تاسیون بین دانه ها شده است که این عمدتاً باعث کاهش چسبندگی شده است.

اثر تعداد سیکل های ذوب و یخبندان بر روی نمودار تنش انحرافی - کرنش محوری در شکل (24) برای نمونه های حاوی 1% الیاف بازالت نشان داده شده است. همان طور که در این شکل می بینید، افزایش سیکل های ذوب و یخبندان در هر سه تنش همه جانبه 100، 200 و 400 کیلوپاسکال باعث کاهش کمی در تنش ماکزیمم و باقی مانده شده است. نسبت به نمونه های حاوی 10% نانوسیلیس، اثر سیکل های ذوب و یخبندان بر روی نمونه های حاوی 1% الیاف بازالت کمتر است. در واقع به دلیل درگیر شدن الیاف با دانه های خاک اثر سیکل های ذوب و یخبندان بر روی این نمونه ها کمتر است.

شکل (25) تغییرات نسبت تنش انحرافی ماکزیمم در نمونه های تحت سیکل های ذوب و یخبندان را به تنش انحرافی ماکزیمم نمونه های بدون اعمال سیکل های ذوب و یخبندان نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، مقدار تغییر این ضریب نسبت به نمونه های حاوی 10% نانوسیلیس خیلی کم است.



شکل 29- تغییرات زاویه اصطکاک و چسبندگی به دلیل اعمال سیکل‌های ذوب و یخبندان برای ماسه حاوی 10% نانوسیلیس و 1% الیاف بازالت

4- نتیجه‌گیری

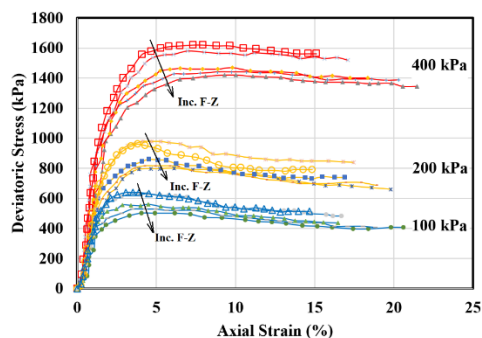
در این مطالعه با استفاده از آزمایش‌های تک‌محوری و سه‌محوری استاتیکی، مقاومت فشاری، پارامترهای مقاومت برشی خاک ماسه لای‌دار بهسازی شده با الیاف بازالت و نانوسیلیس مورد بررسی قرار گرفت. همچنین اثر درصد الیاف بازالت، نانوسیلیس و تعداد سیکل‌های ذوب و یخبندان مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس آزمایش‌های انجام شده نتایج زیر در بخش نتیجه‌گیری به دست آمده است:

(1) افزایش مقدار الیاف از 0/5 تا 1 درصد باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه شده است، اگر چه بعد از آن با افزایش مقدار الیاف از 1 تا 4 درصد مقدار مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش یافته است. با این حال افزایش مقدار الیاف از 0/5 تا 4 درصد باعث افزایش کرنش متناظر با تنش فشاری ماکزیمم شده است.

(2) نتایج به دست آمده برای نمونه‌های تثبیت شده با نانوسیلیس نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی 10 درصد نانوسیلیس بیشترین مقاومت را کسب نموده است. افزایش مقدار نانو از 5 تا 10 درصد باعث افزایش مقاومت و بعد از آن افزایش مقدار نانوسیلیس از 10 تا 20 درصد باعث کاهش مقاومت شده است. افزایش روز عمل‌آوری از 7 تا 90 روز باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است. اثر مقدار نانوسیلیس با افزایش روز عمل‌آوری از 7 تا 90 روز چشمگیرتر شده است و همچنین باعث رفتار تردتر نمونه‌ها نیز شده است.

(3) مقایسه نتایج نمونه‌های بهسازی شده با الیاف و نمونه‌های بهسازی شده با نانوسیلیس نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی نانوسیلیس مقاومت فشاری بالاتری کسب نموده‌اند و از طرف دیگر مقدار کرنش متناظر با نقطه شکست در نمونه‌های حاوی الیاف بیشتر از نمونه‌های حاوی نانوسیلیس است.

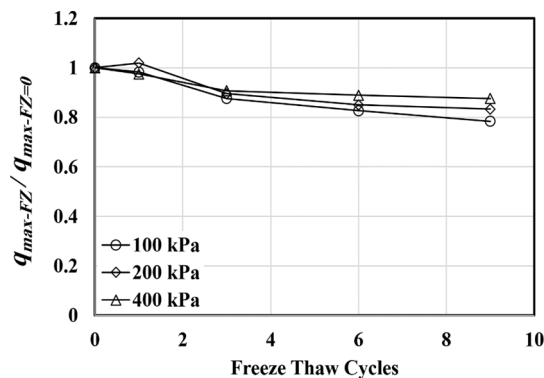
(4) بر اساس نتایج، مقدار 1% الیاف بازالت به‌عنوان مقدار بهینه یافت شده است که بیشترین مقاومت فشاری را از خود نشان داده است. اضافه شدن الیاف بازالت به نمونه‌های حاوی نانوسیلیس باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در کرنش متناظر با نقطه شکست



شکل 27- اثر تعداد سیکل‌های ذوب و یخبندان بر روی نمودار تنش انحرافی- کرنش محوری به دست آمده برای ماسه حاوی 10% نانوسیلیس و 1% الیاف بازالت

شکل (28) تغییرات نسبت تنش انحرافی ماکزیمم در نمونه‌های تحت سیکل‌های ذوب و یخبندان را به تنش انحرافی ماکزیمم نمونه‌های بدون اعمال سیکل‌های ذوب و یخبندان نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقدار تغییر این ضریب نسبت به نمونه‌های حاوی 10% نانوسیلیس خیلی کمتر است که نشان از بهبود رفتار مکانیکی نمونه‌های به دلیل اضافه شدن الیاف دارد.

تغییرات زاویه اصطکاک و چسبندگی به دلیل اعمال سیکل‌های ذوب و یخبندان در شکل (29) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، اعمال سیکل‌های ذوب و یخبندان باعث کاهش چسبندگی شده است. با اعمال 9 سیکل ذوب و یخبندان، مقدار چسبندگی از 90 کیلوپاسکال به 50 کیلوپاسکال رسیده است که حدود 44 درصد کاهش یافته است. درحالی‌که زاویه اصطکاک تغییرات خیلی مهمی نداشته است. تغییرات زاویه اصطکاک کلاً در حدود یک درجه است. در نتیجه در اینجا نیز اثر سیکل‌های ذوب و یخبندان عمدتاً بر روی چسبندگی است.



شکل 28- تغییرات نسبت تنش انحرافی ماکزیمم به دلیل اعمال سیکل‌های ذوب و یخبندان برای ماسه حاوی 10% نانوسیلیس و 1% الیاف بازالت

9) در نمونه حاوی 10% نانوسیلیس و 1% الیاف بازالت، افزایش سیکل‌های ذوب و یخبندان باعث کاهش در تنش ماکزیمم و باقی‌مانده شده است. اثر سیکل‌های ذوب و یخبندان بر روی نمونه‌های حاوی 10% نانوسیلیس و 1% الیاف بازالت نسبت به نمونه‌های حاوی 10% نانوسیلیس کمتر است. اگرچه اثر آن بیشتر از نمونه‌های حاوی فقط 1% الیاف بازالت است.

5- مراجع

- Asgari, MR, Baghebanzadeh Dezfuli A, Bayat M, "Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with cement/lime", *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8, 1439-1452. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-1173-1>
- Bao X, Jin Z, Cui H, Ye G, Tang W, "Static Liquefaction behavior of short discrete carbon fiber reinforced silty sand", *Geosynthetics International*, 2020, 27, 606-619. <https://doi.org/10.1680/jgein.20.00021>
- Bayat M, Khosravian Homami A, Mousivand M, Shear, "Strength and wind erosion potential of biologically improved sand", *Geomicrobiology Journal*, 2021, 38, 631-638. <https://doi.org/10.1080/01490451.2021.1917733>
- Boz A, Sezer A, "Influence of fiber type and content on freeze-thaw resistance of fiber reinforced lime stabilized clay", *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 151, 359-366. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.03.026>
- Changizi F, Haddad A, "Improving the geotechnical properties of soft clay with nano-silica particles", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, 2017, 170, 62-71. <https://doi.org/10.1680/jgrim.15.00026>
- Changizi F, Haddad A, "Strength properties of soft clay treated with mixture of nano-SiO₂ and recycled polyester fiber", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, 7, 367-378. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.03.013>
- Choobbasti AJ, Samakoosh MA, Kutanaei SS, "Mechanical properties soil stabilized with nano calcium carbonate and reinforced with carpet waste fibers", *Construction and Building Materials*, 2019, 211, 1094-1104. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.306>
- Cui H, Jin Z, Bao X, Tang W, Dong B, "Effect of carbon fiber and nanosilica on shear properties of silty soil and the mechanisms", *Construction and Building Materials*, 2018, 189, 286-295. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.181>
- Diambra A, Russell AR, Ibraim E, Muir Wood D, "Determination of fibre orientation distribution in reinforced sands", *Géotechnique*, 2007, 57 (7), 623-628.
- Dos Santos APS, Consoli NC, Baudet BA, "The mechanics of fibre-reinforced sand", *Geotechnique*, 2010, 60, 791-799. <https://doi.org/10.1680/geot.8.P.159>
- Eshaghzadeh M, Bayat M, Ajalloeian R, Hejazi SM, "Mechanical behavior of silty sand reinforced with nanosilica-coated ceramic fibers", *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2021 Dec 2, 35

می‌شود. اثر اضافه‌شدن الیاف بازالت در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس بر روی افزایش مقاومت با افزایش زمان عمل‌آوری بیشتر شده است.

5) در نمونه‌های تثبیت شده با نانوسیلیس، همواره پس از آزمایش ترک‌های بزرگ در طول نمونه ظاهر شده است که نشان از رفتار ترد این نمونه‌ها دارد و با بیشتر شدن مقدار نانوسیلیس از 5 تا 20 درصد عرض ترک‌ها نیز افزایش یافته است و رفتار تردتری نمونه از خودش نشان داده است. برخلاف نمونه‌های حاوی نانوسیلیس، در نمونه‌های بهسازی شد با الیاف بازالت، ترک‌های ریز در نمونه ایجاد شده است. در واقع وجود الیاف باعث عدم گسترش ترک تا انتهای نمونه یا به عبارت دیگر عدم ایجاد ترک‌های طولی می‌شود که یکی از مزیت‌های اصلی استفاده از الیاف در بهسازی خاک است.

6) نتایج آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی نشان می‌دهد که الیاف بازالت باعث افزایش هر پارامترهای مقاومت برشی، زاویه اصطکاک و چسبندگی شده است. اگرچه مقدار افزایش چسبندگی بیشتر از زاویه اصطکاک است. اضافه شدن نانوسیلیس نسبت به نمونه ماسه خالص نیز باعث افزایش مقاومت شده است. مقادیر زاویه اصطکاک و چسبندگی برابر با 36/7 درجه و 51 کیلوپاسکال به دست آمده است. نانوسیلیس باعث افزایش کمی در زاویه اصطکاک و افزایش قابل ملاحظه‌ای در چسبندگی شده است که به دلیل پدیده سیمان‌تاسیون ایجاد شده توسط ذرات نانوسیلیس در بین ذرات ماسه است.

7) افزایش سیکل‌های ذوب و یخبندان بر روی نمونه حاوی 10% نانوسیلیس باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در تنش ماکزیمم شده است. اعمال تنش همه جانبه بالاتر باعث کاهش اثر سیکل‌های ذوب و یخبندان شده است که این می‌تواند به دلیل تغییر بافت بیشتر خاک به دلیل افزایش تنش همه‌جانبه باشد که باعث می‌شود اثر سیکل‌های ذوب و یخبندان کاهش یابد. اعمال سیکل‌های ذوب و یخبندان باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در چسبندگی نمونه شده است. در حالی که زاویه اصطکاک تغییرات خیلی کمتری داشته است.

8) افزایش سیکل‌های ذوب و یخبندان در نمونه حاوی 1% الیاف بازالت، باعث کاهش کمی در تنش ماکزیمم و باقی‌مانده شده است. نسبت به نمونه‌های حاوی 10% نانوسیلیس، اثر سیکل‌های ذوب و یخبندان بر روی نمونه‌های حاوی 1% الیاف بازالت کمتر است. مقدار تغییر نسبت تنش انحرافی ماکزیمم نمونه حاوی 1% الیاف نسبت به نمونه‌های حاوی 10% نانوسیلیس خیلی کم است. در اینجا نیز اعمال سیکل‌های ذوب و یخبندان باعث کاهش چسبندگی شده است.

115. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000745](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000745)
- Lin S, Lei X, Meng Q, Xu J, "Properties of biocemented, basalt-fibre-reinforced calcareous sand", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, 2021, 0, 1-9. <https://doi.org/10.1680/jgrim.19.00023>
- Liu J, Bai Y, Song Z, Kanungo DP, Wang Y, Bu F, Chen Z, Shi X, "Stabilization of sand using different types of short fibers and organic polymer", *Construction and Building Materials*, 2020, 253, 119164. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119164>
- Luo L, Lin H, Li S, "Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography", *Journal of Hydrology*, 2010, 393, 53-64. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.031>
- Lv Q, Chang C, Zhao B, Ma B, "Loess soil stabilization by means of SiO_2 nanoparticles", *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2018, 54, 409-413. <https://doi.org/10.1007/s11204-018-9488-2>
- Lv X, Zhou H, Liu X, Song Y, "Experimental study on the effect of basalt fiber on the shear behavior of cemented sand", *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8737-7>
- Ma Q, Gao C, "Effect of basalt fiber on the dynamic mechanical properties of cement-soil in shpb test", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30, 04018185. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002386](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002386)
- Maleki M, Ezzatkhah A, Bayat M, Mousivand M, "Effect of physical parameters on static undrained resistance of sandy soil with low silt content", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, 1, 31 (10), 1324-31. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.05.003>
- Mallikarjuna V, Mani TB, "Soil stabilization using plastic waste", *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 05, 2016, 391-394. <https://doi.org/10.15623/ijret.2016.0505074>
- Michalowski RL, Čermák J, "Triaxial compression of sand reinforced with fibers", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129, 125-136. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2003\)129:2\(125\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2003)129:2(125))
- Michalowski RL, "Limit analysis with anisotropic fibre-reinforced soil", *Geotechnique*, 2008, 58 (6), 489-501.
- Michalowski RL, Zhao A, "Failure of fiber-reinforced granular soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 122, 226-234. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1996\)122:3\(226\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1996)122:3(226))
- Park SS, "Effect of fiber reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fiber-reinforced cemented sand", *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, 27, 162-166. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2008.09.001>
- Pincus H, Maher M, Ho Y, "Behavior of fiber-reinforced cemented sand under static and cyclic loads", *Geotechnical Testing Journal*, 1993, 16, 330. (23), 2664-283. <https://doi.org/10.1080/01694243.2021.1898857>
- Estabragh AR, Namdar P, Javadi AA, "Behavior of cement-stabilized clay reinforced with nylon fiber", *Geosynthetics International*, 2012, 19, 85-92. <https://doi.org/10.1680/gein.2012.19.1.85>
- Ghanbari PG, Momeni M, Mousivand M, Bayat M, "Unconfined compressive strength characteristics of treated peat soil with cement and basalt fibre", *International Journal of Engineering Transactions B: Applications*, 2022, 35, 1089-1095. <https://doi.org/10.5829/ije.2022.35.05b.24>
- Ghanizadeh AR, Heidarabadizadeh N, Bayat M, Khalifeh V, "Modeling of unconfined compressive strength and Young's modulus of lime and cement stabilized clayey subgrade soil using Evolutionary Polynomial Regression (EPR)", *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 2022, 56 (3), 257-269. <https://doi.org/10.22059/ijmge.2022.306688.594858>
- GHolipoor Norozi A, Kouravand S, Boveiri M, "A review of using the waste in soil stabilization", *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 2015, 21, 33-37. <https://doi.org/10.14445/22315381/ijett-v21p206>
- Gray DH, Ohashi H, "Mechanics of fiber reinforcement in sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, 1983, 109, 335-353. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1983\)109:3\(335\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:3(335))
- Güllü H, Khudir A, "Effect of freeze-thaw cycles on unconfined compressive strength of fine-grained soil treated with jute fiber, steel fiber and lime", *Cold Regions Science and Technology*, 2014, 106-107, 55-65. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.06.008>
- Hadi Sahlabadi S, Bayat M, Mousivand M, Saadat M, "Freeze-thaw durability of cement-stabilized soil reinforced with polypropylene/basalt fibers", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2021, 33, 04021232. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003905](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003905)
- Hakimelahi N, Bayat M, Ajalloeian R, Nadi B, "Effect of woven geotextile reinforcement on mechanical behavior of calcareous sands", *Case Studies in Construction Materials*, 2023, Jul 1;18:e02014. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02014>
- Hejazi SM, Sheikhzadeh M, Abtahi SM, Zadhoush A, "A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers", *Construction and Building Materials*, 2012, 30, 100-116. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.045>
- Iranpour B, haddad A, "The influence of nanomaterials on collapsible soil treatment", *Engineering Geology*, 2016, 205, 40-53. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.02.015>
- Jassem S, Tabarsa A, "Effect of adding nanoclay on the mechanical behaviour of fine-grained soil reinforced with polypropylene fibers", *Journal of Structural Engineering and Geotechnics*, 2015 5, 59-67.
- Li C, Zornberg JG, "Mobilization of reinforcement forces in fiber-reinforced soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139, 107-

- geotechnical and geoenvironmental engineering", MATEC Web of Conferences, 2018, 149, 02004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814902004>
- Taha MR, Taha OME, "Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior", Journal of Nanoparticle Research, 2012, 14, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11051-012-1190-0>
- Tang C, Shi B, Gao W, Chen F, Cai Y, "Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil", Geotextiles and Geomembranes, 2007, 25, 194-202. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2006.11.002>
- Wang D, Wang H, Larsson S, Benzerzour M, Maherzi W, Amar M, "Effect of basalt fiber inclusion on the mechanical properties and microstructure of cement-solidified kaolinite", Construction and Building Materials, 2020, 241, 118085. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118085>
- Wang X, Wu Y, Lu Y, Cui J, Wang X, Zhu C, "Strength and dilatancy of coral sand in the South China Sea", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80, 8279-8299. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02348-6>
- Wang Z, "Soil creep behavior: laboratory testing and numerical modelling", University of Calgary, 2010.
- Xiao Y, Stuedlein AW, Chen Q, Liu H, Liu P, "Stress-strain-strength response and ductility of gravels improved by polyurethane foam adhesive", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, 144, 04017108. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001812](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001812)
- Yadav JS, Tiwari SK, "A study on the potential utilization of crumb rubber in cement treated soft clay", Journal of Building Engineering, 2017, 9, 177-191. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.01.001>
- Zornberg JG, "Discrete framework for limit equilibrium analysis of fibre-reinforced soil", Geotechnique, 2002, 52, 593-604. <https://doi.org/10.1680/geot.2002.52.8.593>
- <https://doi.org/10.1520/gtj10054j>
- Plé O, Lê TNH, "Effect of polypropylene fiber-reinforcement on the mechanical behavior of silty clay", Geotextiles and Geomembranes, 2012, 32, 111-116. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2011.11.004>
- Rezaei-Hosseiniabadi MJ, Bayat M, Nadi B, Rahimi A, "Utilisation of steel slag as a granular column to enhance the lateral load capacity of soil", Geomechanics and Geoengineering, 2021, 00, 1-11. <https://doi.org/10.1080/17486025.2021.1940315>
- Roustaei M, Hendry M, Aghaei E, Bayat M, "Shear modulus and damping ratio of clay soil under repeated freeze-thaw cycles", Acta Geodynamica et Geomaterialia, 2021, 18 (1). <https://doi.org/10.13168/AGG.2021.0005>
- Sahlabadi SH, Bayat M, Mousivand M, Saadat M, "Freeze-thaw durability of cement-stabilized soil reinforced with polypropylene/basalt fibers", Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33, 04021232. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003905](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003905)
- Salehi M, Bayat M, Saadat M, Nasri M, "Experimental study on mechanical properties of cement-stabilized soil blended with crushed stone waste", KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25, 1974-1984. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-0953-5>
- Salehi M, Bayat M, Saadat M, Nasri M, "Prediction of unconfined compressive strength and California bearing capacity of cement-or lime-pozzolan-stabilised soil admixed with crushed stone waste", Geomechanics and Geoengineering, 2023, 4, 18 (4), 272-283. <https://doi.org/10.1080/17486025.2022.2040606>
- Santoni RL, Tingle JS, Webster SL, "Engineering properties of sand-fiber mixtures for road construction", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127, 258-268. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2001\)127:3\(258\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2001)127:3(258))
- Sarli JM, Hadadi F, Bagheri RA, "Stabilizing geotechnical properties of loess soil by mixing recycled polyester fiber and Nano-SiO₂", Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38, 1151-1163. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01078-7>
- Shahriar Kian MR, Kabiri S, Bayat M, "Utilization of zeolite to improve the behavior of cement-stabilized soil", International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2021, 7, 35. <https://doi.org/10.1007/s40891-021-00284-9>
- Simonsen E, Janoo VC, Isacsson U, "Resilient properties of unbound road materials during seasonal frost conditions", Journal of Cold Regions Engineering, 2002, 16, 28-50. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0887-381x\(2002\)16:1\(28\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0887-381x(2002)16:1(28))
- Tabarsa A, Latifi N, Meehan CL, Manahiloh KN, "Laboratory investigation and field evaluation of loess improvement using nanoclay-A sustainable material for construction", Construction and Building Materials, 2018, 158, 454-463. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.096>
- Taha MR, "Recent developments in nanomaterials for