

EXTENDED ABSTRACT

Experimental Investigation of the Effect of Nano Materials on the Dynamic Properties of Cemented Fine-Grained Soils

Somayeh Mollaei^{a,*}, Gholam Reza Ostadi Asl^a, Mohammad Mollaei^b, Sayyad Taheri^a, Sanaan Nasri^a

^a Department of Civil Engineering, University of Bonab, Bonab, East Azerbaijan, Iran

^b Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Qazvin Branch, Qazvin, Iran

Received: 04 June 2025; **Reviewed:** 19 January 2026; **Accepted:** 15 February 2026

Keywords:

Cyclic triaxial test, Silty sand, Shear modulus, Damping, Cement, Nanoclay.

1. Introduction

This study intends to investigate the specifications of the dynamic properties of sand with 60% non-plastic silt, improved by cement and different percentages of Montmorillonite nanoclay (nanoclay will replace some parts of the cement contents) using a cyclic triaxial strain control test subjected to confining pressure and different strain ranges. Shear modulus, damping ration and liquefaction of the normal (without treatment) and stabilized soil with cement and nano clay.

2. Methodology

2.1. Experimental study

In this research, Firuzkuh #161 sand (casting sand) and non-plastic silt have been used, whose specifications are presented in Tables 1 to 3 and Fig. 1, respectively. In this study, normal and cemented specimens with a diameter of 50mm and a height of 100mm were prepared for cyclic triaxial experiments using wet compaction method. The experiments were executed in Geotechnic Laboratory of Islamic Azad University Science and Research Branch in Tehran city.

Table 1. Specifications of Firuzkuh #161 sand

| No. | Properties | Index | Value |
|-----|------------------|----------------|------------------------|
| 1 | Soil Type | SP | - |
| 2 | Grain Density | Gs | 2.61 |
| 3 | Max. Dry Density | γ_{max} | 16.5 kN/m ³ |
| 4 | Min. Dry Density | γ_{min} | 13.7kN/m ³ |
| 5 | Max. Voids Ratio | e_{max} | 0.751 |
| 6 | Min. Voids Ratio | e_{min} | 0.49 |

Table 1. Silt specifications

| No. | Properties | Index | Value |
|-----|------------------|----------------|------------------|
| 1 | Soil Type | M | Non-Plastic Silt |
| 2 | Grain Density | Gs | 2.51 |
| 3 | Max. Dry Density | γ_{max} | 1.48 |
| 4 | Min. Dry Density | γ_{min} | 1.158 |

Table 1. Characteristics of chemical analysis of Firuzkuh #161 sand and silt

| % SiO ₂ | % Al ₂ O ₃ | % Fe ₂ O ₃ | % CaO | % Na ₂ O | % K ₂ O |
|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|---------------------|--------------------|
| 95-98 | 0.5-1 | 0.5-1 | 0.5-1 | 0.02-0.5 | 0.5-0.7 |

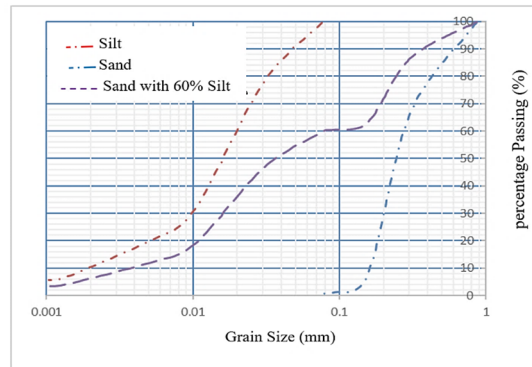


Fig. 1. Considered soil grading curve

3. Results and discussion

3.1. Shear modulus results

The results of shear modulus values of silty sand, cemented silty sand, and nano-clay cemented silty sand specimens for different confining pressure levels for different shear strains have been presented in Fig. 2.

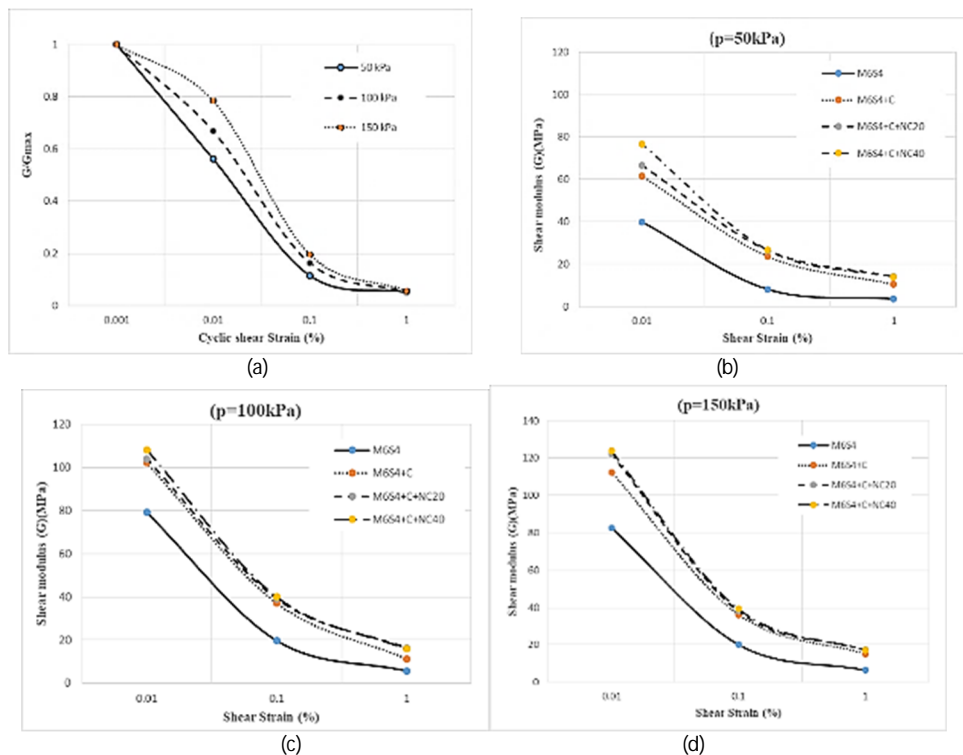


Fig. 2. Variations of shear modulus G_{max} : **a)** normal soil specimen, **b)** confining pressure of 50 kPa, **c)** confining pressure of 100 kPa, **d)** confining pressure of 150 kPa.

3.2. Damping ratios

According to Fig. 3, for all specimens, including silty sand, cemented silty sand, and nano-clay cemented silty sand specimens, damping diminished with elevating the confining pressure.

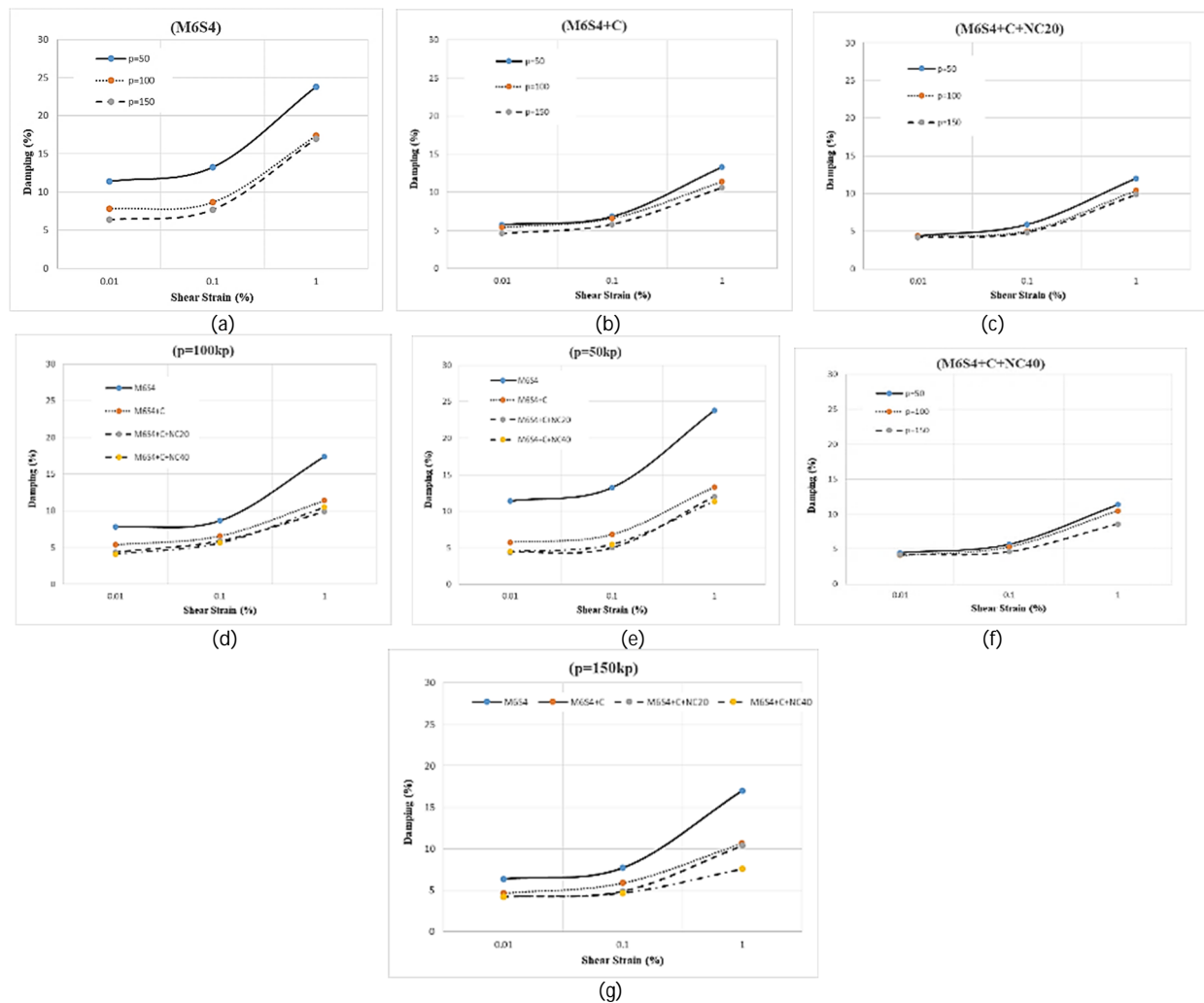


Fig. 3. Variations of damping ratio: **a)** normal soil, **b)** cemented soil, **c)** cemented soil with 20% nanoclay, **d)** cemented soil with 40% nanoclay, **e)** confining pressure of 50kPa, **f)** confining pressure of 100kPa, **g)** confining pressure of 150kPa

4. Conclusions

In this study, initially the dynamic parameters (shear modulus and damping ratio) of the fine-grained silty soil were investigated by cyclic triaxial experiments. Based on the results, with increasing shear strain, the stiffness created at the intergranular contact surfaces diminished and caused loosening and rupture of the cement paste joints. This event, also freed the confinement caused by the stiffness and ultimately by increasing the strain levels, it reduced the shear modulus. And shear modulus values decrease and damping increases for all specimens, including silty sand, cemented silty sand and nano-clay cemented silty sand specimens, with increasing shear strain. For all specimens, including silty sand, cemented silty sand, and nano-clay cemented silty sand specimens, the shear modulus values increased and damping diminished with elevating the confining pressure.

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر ذرات نانو بر مشخصات دینامیکی خاک‌های ریزدانه سیمانته شده

سمیه ملایی^{1*}، غلامرضا استادی اصل²، محمد ملایی³، صیاد طاهری⁴، صنعان نصری⁴

¹ دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بناب

² استادیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بناب

³ دکتری مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین

⁴ کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بناب

دریافت: 1404/03/14، بازنگری: 1404/10/29، پذیرش: 1404/11/26، نشر آنلاین: 1404/11/26

چکیده

در پژوهش حاضر، رفتار سیکلی سیلت ماسه‌دار با رفتار سیکلی سیلت ماسه‌دار سیمانته محتوی سیمان و نانورس مقایسه شده است. خاک مورد استفاده در این پژوهش، ماسه 161 و لای غیرپلاستیک فیروزکوه با ترکیب 40 درصد ماسه و 60 درصد لای می‌باشد. در اینجا، اثرات فشار همه‌جانبه، کرنش برشی و جایگزینی نانورس به‌جای سیمان بر پارامترهای مدول برشی و میرایی ماسه لای‌دار فیروزکوه تثبیت شده با سیمان و نانورس مطالعه شده است. به این منظور، آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی با سه سطح فشار محصورکننده مختلف 50، 100 و 150 کیلوپاسکال در محدوده کرنش برشی متوسط انجام شد. نتایج مهم حاصل نشان داد که مقادیر مدول برشی نمونه‌های ماسه سیمانته با نسبت آب به سیمان 1، بیشتر از مدول برشی نمونه‌های ماسه سیلتی در تمامی محدوده‌های کرنش برشی مدنظر است. همچنین، مقدار مدول برشی با جایگزینی نانورس به‌جای سیمان در نمونه‌های سیمانی شده افزایش یافت و بالعکس با افزودن سیمان، میرایی نمونه‌ها کاهش یافت. با جایگزینی 20 درصد سیمان با نانورس مدول برشی به‌طور متوسط 3 مگاپاسکال نسبت به نمونه سیمانته افزایش و میرایی به‌طور متوسط 0/9 درصد نسبت به نمونه سیمانته کاهش یافت. با جایگزینی 40 درصد سیمان با نانورس نیز مدول برشی نسبت به نمونه سیمانته افزایش و میرایی کاهش یافت. برای بهبود پارامترهای دینامیکی خاک مورد آزمایش جایگزینی 20 درصد سیمان با نانورس کارایی بیشتری دارد. در حالت کلی، می‌توان جایگزینی نانورس به‌جای بخشی از سیمان را از منظر زیست‌محیطی مورد توجه قرار داد. از سوی دیگر، با افزایش فشار محصورکننده، مقادیر مدول برشی تمامی خاک‌های در نظر گرفته شده افزایش و میرایی آن‌ها کاهش یافت. به‌علاوه، تأثیر مثبت افزایش فشار همه‌جانبه و افزودن نانورس بر روی روانگرایی خاک مورد آزمایش نیز قابل مشاهده بود.

کلیدواژه‌ها: آزمایش سه‌محوری سیکلی، ماسه لای‌دار، مدول برشی، میرایی، سیمان، نانورس، روانگرایی.

1- مقدمه

بسیاری را تجربه کرده و این کشور همواره نیازمند توسعه دانش مهندسی و مطالعات پایه در زمینه مهندسی زلزله و دینامیک خاک بوده است. در نتیجه، شناخت پارامترهای دینامیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از سوی دیگر، در بخش‌های وسیعی از نواحی ساحلی شمال و جنوب ایران مطابق با پهنه‌بندی آیین‌نامه 2800 (2015) در پهنه با خطر نسبی بالای زلزله واقع شده‌اند. در این مناطق، که جنس خاک از نوع ماسه لای‌دار و لای با تراکم کم

خواص دینامیکی خاک در تحلیل خطی و غیرخطی سازه‌های ژئوتکنیکی تحت بارهای دینامیکی همچون زلزله و باد کاربرد دارند؛ مهمترین این پارامترها شامل مدول برشی و نسبت میرایی است. ارزیابی صحیح این پارامترها به درک رفتار خاک کمک کرده و برای استفاده در تحلیل مسائل عملی ژئوتکنیک لرزه‌ای از اهمیت بالایی برخوردار است. ایران به‌دلیل لرزه‌خیز بودن زلزله‌های



می‌باشد، در حین زلزله و بارگذاری سیکلی زهکشی نشده احتمال کاهش مقاومت خاک وجود دارد.

در اغلب مناطق شهری، یکی از روش‌های بهسازی خاک‌های دانه‌ای لای‌دار اشباع، که در مقابل بارگذاری سیکلی ضعیف هستند، افزودن سیمان به آن است. لذا توسعه دانش پایه در زمینه خواص دینامیکی خاک‌های سیمانی‌شده و بهینه‌سازی روش‌های بهسازی با سیمان، جایگاه ویژه‌ای در مطالعات تحقیقاتی و اجرایی دارد.

در حالی که تأثیر ناچیز بر روی میرایی دارد.

Dano و همکاران (2004) تأثیر تزریق دوغاب سیمان بر روی نمونه‌های خاک ماسه سیلتی یکنواخت ریزدانه و نیز ماسه شن‌دار سیلتی-کربناته را با انجام آزمایش‌های تک‌محوری، کشش برزیلی و سه‌محوری مورد بررسی قرار دادند. پژوهش دیگری نشان داد که افزودن نانوذرات، خاک را فشرده‌تر کرده و با پرکردن حفره‌ها و کاهش تخلخل میزان جابه‌جایی آب را کاهش می‌دهد. با آزمایش نفوذپذیری ماسه سیلتی با درصد‌های مختلف نانورس، نفوذپذیری کاهش داشته است (Janalizadeh و همکاران، 2014).

در گذشته، مطالعات متعددی در مورد تثبیت ماسه با استفاده از تزریق سیمان انجام شده است (Santamarina و Fernandez، 2011؛ Mollamahmutoglu و Yilmaz، 2011؛ Pantazopoulos و Atmatzidis، 2012؛ Markou و Droudakis، 2013؛ Yildiz و Soganci، 2015). همچنین، تثبیت ماسه با دانه‌های خرده لاستیک (Nakhaei و همکاران، 2012؛ Madhusudhan و همکاران، 2020)، و نانومواد (Choobbasti و همکاران، 2015؛ Changizi و Haddad، 2016؛ Abbasi و همکاران، 2018) به منظور تقویت ویژگی‌های خاک نیز مطالعه شده است.

در یک‌سری از مطالعات آزمایشگاهی و عددی انجام یافته توسط Mola-Abasi و همکاران (2021، 2022) تثبیت خاک با استفاده از سیمان و جایگزینی سیمان با زئولیت بررسی شده است. همچنین Ahmadi و همکاران (2020) نشان دادند که نانو MgO می‌تواند به طور قابل توجهی سختی و چسبندگی زهکشی نشده رس را افزایش دهد.

از جمله مطالعات انجام یافته در این حوزه در داخل ایران، پژوهش Asghari و همکاران (2004) است که تأثیر آهک هیدراته را بر مقاومت برشی خاک ماسه‌ای شن‌دار تهران مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزودن آهک باعث افزایش مقاومت برشی و چسبندگی بیشینه گردید. در مطالعه‌ای دیگر، افزودن نانورس به خاک لس گرگان به منظور بررسی پتانسیل فروریزش و انجام آزمایش‌های تحکیم نشان می‌دهد که با افزایش میزان نانورس از مقدار بهینه پتانسیل فروریزش خاک افزایش داشته است. همچنین، افزایش نانوذرات بیش از درصد بهینه تأثیر منفی بر رفتار این خاک دارد (Iran Pour و Haddad، 2014). طبق مطالعات انجام شده روی ماسه رس‌دار، با افزودن 0/5 تا 1/5 درصد نانورس و انجام آزمایش‌های برش مستقیم و تراکم؛ استفاده از نانورس منجر به افزایش مقاومت برشی می‌شود. میزان بهینه نانورس جهت دست یافتن به مقاومت بیشینه خاک، 1 درصد گزارش شده است (Khalghi و Amini Behbahani، 2016).

Farjad و Abbasi (2017) مطالعه‌ای در خصوص استفاده از نانوذرات رس برای تثبیت خاک‌های رسی متورم شونده انجام می‌باشد، در حین زلزله و بارگذاری سیکلی زهکشی نشده احتمال کاهش مقاومت خاک وجود دارد.

در اغلب مناطق شهری، یکی از روش‌های بهسازی خاک‌های دانه‌ای لای‌دار اشباع، که در مقابل بارگذاری سیکلی ضعیف هستند، افزودن سیمان به آن است. لذا توسعه دانش پایه در زمینه خواص دینامیکی خاک‌های سیمانی‌شده و بهینه‌سازی روش‌های بهسازی با سیمان، جایگاه ویژه‌ای در مطالعات تحقیقاتی و اجرایی دارد.

Delfosse-Ribay و همکاران (2004) به وسیله آزمایش ستون تشدید و سه‌محوری سیکلی مدول برشی ماسه تزریق شده را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند تزریق دوغاب باعث بهبود سختی ماسه می‌شود و با افزایش تنش همه‌جانبه مدول برشی بهبود یافته، در حالی که تأثیر ناچیز بر روی میرایی دارد.

Dano و همکاران (2004) تأثیر تزریق دوغاب سیمان بر روی نمونه‌های خاک ماسه سیلتی یکنواخت ریزدانه و نیز ماسه شن‌دار سیلتی-کربناته را با انجام آزمایش‌های تک‌محوری، کشش برزیلی و سه‌محوری مورد بررسی قرار دادند. پژوهش دیگری نشان داد که افزودن نانوذرات، خاک را فشرده‌تر کرده و با پرکردن حفره‌ها و کاهش تخلخل میزان جابه‌جایی آب را کاهش می‌دهد. با آزمایش نفوذپذیری ماسه سیلتی با درصد‌های مختلف نانورس، نفوذپذیری کاهش داشته است (Janalizadeh و همکاران، 2014).

در گذشته، مطالعات متعددی در مورد تثبیت ماسه با استفاده از تزریق سیمان انجام شده است (Santamarina و Fernandez، 2011؛ Mollamahmutoglu و Yilmaz، 2011؛ Pantazopoulos و Atmatzidis، 2012؛ Markou و Droudakis، 2013؛ Yildiz و Soganci، 2015). همچنین، تثبیت ماسه با دانه‌های خرده لاستیک (Nakhaei و همکاران، 2012؛ Madhusudhan و همکاران، 2020)، و نانومواد (Choobbasti و همکاران، 2015؛ Changizi و Haddad، 2016؛ Abbasi و همکاران، 2018) به منظور تقویت ویژگی‌های خاک نیز مطالعه شده است.

در یک‌سری از مطالعات آزمایشگاهی و عددی انجام یافته توسط Mola-Abasi و همکاران (2021، 2022) تثبیت خاک با استفاده از سیمان و جایگزینی سیمان با زئولیت بررسی شده است. همچنین Ahmadi و همکاران (2020) نشان دادند که نانو MgO می‌تواند به طور قابل توجهی سختی و چسبندگی زهکشی نشده رس را افزایش دهد.

Fattahi-Masrouf و همکاران (2021) نیز افزودن مقادیر مختلف نانوسیلیس به خاک رس را مطالعه کردند.

3. Illite

1. Agar biopolymer
2. Bentonite

2- مواد و روش‌ها

پارامترهای دینامیکی شامل مدول برشی و نسبت میرایی استفاده گسترده‌ای در تحلیل و طراحی سازه‌های ژئوتکنیکی دارند. تغییرات این پارامترها با کرنش برشی یکی از مهم‌ترین پارامترهای لازم برای پاسخ لایه‌های خاک به بارهای دینامیکی است. با انجام آزمایش‌های مختلف آزمایشگاهی بر روی انواع خاک‌ها می‌توان به محاسبه پارامترهای دینامیکی پرداخت. یکی از آزمایش‌های مورد استفاده برای محاسبه مدول برشی و نسبت میرایی خاک، آزمایش سه‌محوری سیکلی می‌باشد.

2-1- مشخصات مکانیکی خاک مورد آزمایش

برای تعیین مشخصات خمیری بایستی آزمایش حدود اتربرگ صورت گیرد (حد روانی و حد خمیری) که در این مطالعه آزمایش کاساگراند⁵ انجام گردید. از آنجایی که شیار مورد نیاز در دستگاه کاساگراند برای تعیین حد روانی و فته‌ای به قطر 3/2 میلی‌متر از خاک پایداری کافی را نداشت، لذا فرض اولیه مبنی بر این که خاک مورد نظر فاقد خاصیت خمیری است، تأیید گردید. جهت انجام آزمایش سه‌محوری سیکلی ابتدا ضروری است با انجام برخی از آزمایش‌ها اطلاعات اولیه مورد نیاز مصالح مصرفی تعیین گردد. به این منظور، آزمایش چگالی دانه‌ها، دانه‌بندی و تراکم (تعیین $Y_d(max)$ و $Y_d(min)$) انجام گردید.

دانه‌بندی مصالح خاکی براساس استانداردهای ASTM-D422 (2001) و AASHTO-T88 (1997) بوده و مطابق با استانداردهای ASTM-D854 (2006) و AASHTO-T100 (2015) چگالی ویژه مصالح خاکی تعیین گردید. در اینجا، برای تعیین وزن مخصوص خشک حداکثر و حداقل در خاک مورد نظر از روش توصیه شده در ASTM-D2049 (1969) استفاده شد.

برای خاک ریزدانه شرایط به‌دست آوردن وزن مخصوص خشک حداقل مشابه روند طی شده برای ماسه می‌باشد، اما برای به‌دست آوردن وزن مخصوص حداکثر خاک ریزدانه (برای نمونه‌های خاک با 40 درصد ماسه و 60 درصد لای خالص)، از آزمایش تراکم استفاده می‌شود. در این مقاله جهت تعیین وزن مخصوص ماکزیم ماسه تمیز از روش میز لرزان استفاده شد.

آزمایش تراکم به‌منظور به‌دست آوردن منحنی تراکم و γ_{max} مورد استفاده قرار می‌گیرد و به دو صورت تراکم استاندارد و تراکم اصلاح‌شده، به‌ترتیب براساس ASTM-D698 (2012) و ASTM-D1557 (2012) انجام می‌پذیرد. با استفاده از نتایج آن‌ها می‌توان منحنی تراکم و وزن مخصوص ماکزیمم خاک را تعیین نمود.

دادند و نتایج نشان داد که افزودن نانورس به‌طورکلی موجب کاهش درصد تورم خاک می‌شود.

اخیراً Saadati و همکاران (2022) رفتار سیکلی ماسه بابلرس سیمانته شده با سیمان و ژئولیت را مطالعه کردند. Negahdar و همکاران (2022) نانوسیلیس و روش رسوب میکروبی کلسیم کربنات را برای بهسازی خاک ماسه‌ای به‌کار بردند. Mirnezhad و همکاران (2024) به بهسازی نمونه‌های خاک رس را با پلیپروپیلن و نانوسیلیس پرداخته و همچنین Alizadeh و Kakroudi و همکاران (2024) نمونه‌های ماسه لایدار را با لیاف بازالت و نانوسیلیس بهسازی نمودند.

در مطالعه Niroumand و همکاران (2023) تأثیر استفاده از نانوسیمان و نانوسیلیس بروی مشخصات مکانیکی خاک رس کلاچای مورد آزمایش قرار گرفت و نشان داده شد که اثر نانوسیمان بر مقاومت زودهنگام نمونه بیشتر تأثیر داشته و نانوسیلیس بر مقاومت درازمدت بیشتر مؤثر بود.

همان‌طور که بیان شد، تاکنون بررسی‌های متعددی بر روی خصوصیات دینامیکی خاک‌های مختلف و خاک‌های بهسازی شده انجام شده است. یکی از مهم‌ترین این افزودنی‌ها سیمان می‌باشد که امروزه به‌دلیل مشکلات زیست‌محیطی و اقتصادی، بهینه‌سازی مصرف سیمان ضروری به‌نظر می‌رسد. در تولید سیمان انرژی فراوانی مصرف شده که سبب انتشار 7% از گاز CO₂ در جهان است همچنین خاک‌های تثبیت شده با سیمان رفتار ترد و شکننده‌ای از خود نشان داده‌اند (Lothenbach و همکاران، 2011؛ Scrivener و Nonat، 2011؛ Ramezaniapour و همکاران، 2012؛ Mola-Abasi و همکاران، 2016a و 2016b). استفاده از نانومواد به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی در بهسازی خاک می‌تواند راهکار مناسبی برای کاهش مصرف سیمان باشد.

از طرف دیگر، تاکنون مطالعات بر روی بهبود خواص دینامیکی ماسه‌ها بسیار گسترده بوده است ولی خاک‌های ریزدانه کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. لذا در این مقاله، خصوصیات دینامیکی خاک شامل 40% ماسه و 60% لای غیرخمیری، بهسازی شده با سیمان و درصد‌های مختلفی از نانورس مونت‌موریلونیت⁴ با استفاده از آزمایش سه‌محوری سیکلی کنترل کرنش، تحت محدوده فشار همه‌جانبه (هیدرواستاتیکی) و دامنه‌های کرنش مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. در اینجا، ذرات نانورس جایگزین بخشی از سیمان مصرفی می‌شود. جایگزینی بخشی از سیمان مصرفی در بهسازی خاک به‌دلیل مشکلات زیست‌محیطی مصرف مصالح سیمانی می‌باشد.

2-2- مشخصات نانورس مصرفی

روش‌های بهسازی خاک با مواد نانوه یکی از روش‌های مطلوب مهندسی در بهبود خواص خاک در مهندسی پی، مهندسی ژئوتکنیک، دیوارهای حائل و سازه‌های ساحلی به‌ویژه در محیط‌های متراکم شهری محسوب می‌شود (Cheraghalikhani و همکاران، 2024).

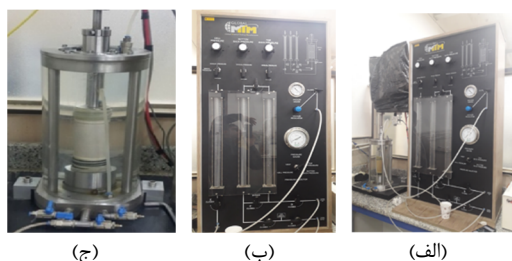
در مطالعه پیش‌رو نیز به‌منظور بهسازی خاک از ذرات نانورس استفاده می‌شود که از شرکت ایرانی پیشگامان نانومواد ایرانیان به‌نام تجاری Clay montmorillonite K(10) تهیه شده است (www.nanosany.com). مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانورس در جدول (4) خلاصه شده است.

جدول 4- مشخصات نانورس (مونت‌موریلونیت)

| نوع ماده | مونت‌موریلونیت |
|-----------------------|------------------------------|
| چگالی | 0.5-0.7 gr/cm ³ |
| اندازه دانه | 1-2nm |
| سطح ویژه | 220-270 (m ² /gr) |
| هدایت الکتریکی | -25MV |
| نرخ تبادل یونی | 48 (meg/100gr) |
| فضای خالی بین دانه‌ای | 60 Å ⁰ |
| رنگ | Pale yellow |
| رطوبت | 1-2% |

2-3- ستاپ آزمایش

در این مقاله، جهت بررسی‌های آزمایشگاهی از دستگاه سه‌محوری سیکلی موجود در دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران استفاده شده است. در شکل (2) شمای کلی دستگاه و یک نمونه تحت تست نشان داده شده است. ظرفیت لودسل 1000 کیلوگرم و دامنه سنسور تغییر مکان 50 میلی‌متر می‌باشد. همچنین، سلول دستگاه قابلیت تحمل فشار تا 800 کیلوپاسکال را داشته و می‌توان با استفاده از آن نمونه‌هایی با قطر 50 و 71 میلی‌متر (2 و 2/8 اینچ) را تحت آزمایش قرار داد.



شکل 2- دستگاه آزمایش سه‌محوری سیکلی: (الف) نمای کلی، (ب) بورد، (ج) سلول

در این مطالعه از نمونه‌های ماسه 161 فیروزکوه و لای غیرپلاستیک (غیرخمیری) استفاده شده است که مشخصات آن به‌ترتیب در جدول‌های (1) تا (3) بیان شده است.

جدول 1- مشخصات ماسه 161 فیروزکوه

| ردیف | مشخصه | نشانه | مقدار |
|------|----------------------|-----------------|------------------------|
| 1 | نوع خاک | SP | - |
| 2 | چگالی ویژه بخش جامد | G _s | 2.61 |
| 3 | وزن مخصوص خشک حداکثر | γ_{Dmax} | 16.5 kN/m ³ |
| 4 | وزن مخصوص خشک حداقل | γ_{Dmin} | 13.7 kN/m ³ |
| 5 | نسبت منافذ حداکثر | e_{max} | 0.751 |
| 6 | نسبت منافذ حداقل | e_{min} | 0.49 |

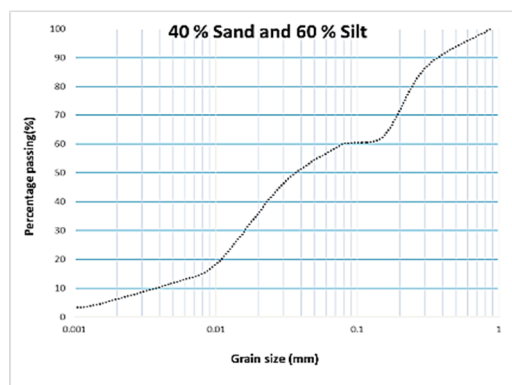
جدول 2- مشخصات لای

| ردیف | مشخصه | نشانه | مقدار |
|------|----------------------|-----------------|-------------------------|
| 1 | نوع خاک | M | لای غیرخمیری |
| 2 | چگالی ویژه بخش جامد | G _s | 2.51 |
| 3 | وزن مخصوص خشک حداکثر | γ_{Dmax} | 14.8 kN/m ³ |
| 4 | وزن مخصوص خشک حداقل | γ_{Dmin} | 11.58 kN/m ³ |

جدول 3- مشخصات آنالیز شیمیایی ماسه 161 و لای فیروزکوه

| %SiO ₂ | %Al ₂ O ₃ | %Fe ₂ O ₃ | %CaO | %Na ₂ O | %K ₂ O |
|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------|--------------------|-------------------|
| 95-98 | 0.5-1 | 0.5-1 | 0.5-1 | 0.02-0.05 | 0.5-0.7 |

خاک مورد آزمایش شامل 40 درصد ماسه 161 فیروزکوه و 60 درصد فیروزکوه است. تراکم نسبی 50 درصد در نظر گرفته شده، $\gamma_{Dmax} = 1.63$ وزن مخصوص خشک نسبی ماکزیمم، $\gamma_{Dmin} = 1.39$ وزن مخصوص خشک نسبی مینیموم، چگالی نسبی $D_r = 0.5$ از رابطه تراکم نسبی با وزن و در نتیجه $\gamma_D = 1.5005$ وزن مخصوص خشک نسبی می‌باشد. منحنی دانه‌بندی 40 درصد ماسه 161 فیروزکوه به‌علاوه 60 درصد لای فیروزکوه در شکل (1) نشان داده شده است.



شکل 1- منحنی دانه‌بندی خاک مورد نظر

2-3-1- مراحل تهیه نمونه و آزمایش

در آزمایش سه‌محوری سیکلی در حالت تحکیم یافته زهکشی نشده براساس ASTM-D5311 (1992) انجام شده است. نمونه‌های خاک مورد آزمایش با علائم اختصاری نام‌گذاری می‌شود؛ M لای، S ماسه، M6-S4 یعنی 40٪ ماسه به‌علاوه 60٪ لای، C٪ درصد سیمان، NC درصد نانورس، بنابراین C100، C80-NC20 و C60-NC40 به ترتیب نمایانگر خاک سیمانته با 4٪ وزنی خاک از سیمان تپ دو، خاک سیمانته با جایگزینی 20 درصد از سیمان با نانورس و خاک سیمانته با جایگزینی 40 درصد از سیمان با نانورس می‌باشد. برای تهیه نمونه از روش تراکم مرطوب (Wet Tamping) 5 لایه‌ای جهت ساخت نمونه‌ها به وزن 295 گرم با دانسیته 50 درصد ($D_r=50\%$) و به قطر 5 و ارتفاع 10 سانتی‌متر در قالب مخصوص دستگاه سه‌محوری استفاده شد. برای ایجاد تراکم یکنواخت در ارتفاع نمونه‌ها، روش کوبش مرطوب با تراکم کاهش یافته طبق روند ارائه شده توسط Ladd (1978) انجام گردید. مراحل آماده‌سازی نمونه‌های خاک در شکل (3) به تصویر کشیده شده است.

برای تهیه نمونه بهسازی شده در شرایط آزمایشگاهی، پس از افزودن سیمان و یا ترکیب سیمان و نانورس به خاک، برای جلوگیری از خشک شدن قسمت بالایی نمونه روی آن پوشانده شده و پس از 28 روز عمل‌آوری آزمایش سه‌محوری سیکلی بروی آن انجام می‌گیرد. در اینجا، از 4٪ سیمان (4٪ وزن خاک پایه) و جایگزینی 20 و 40٪ از سیمان با نانورس استفاده شده است. در ساخت نمونه‌های بهسازی‌شده با سیمان، ابتدا سیمان و خاک به‌صورت خشک ترکیب شده و با اضافه نمودن رطوبت مورد نیاز در لایه‌های یکسان ساخته شدند. رطوبت مورد نیاز، شامل 5٪ رطوبت لازم جهت تراکم ماسه لای‌دار به‌علاوه آب لازم برای هیدراسیون سیمان (نسبت آب به سیمان برابر 1) تعیین می‌شود. به‌منظور جبران کردن تبخیر آب در حین اختلاط، یک میلی‌گرم آب اضافی به مخلوط هر لایه اضافه می‌شود.

در مقاله حاضر درصد نانورس جایگزینی سیمان برابر با 20، 40 درصد نسبت وزنی سیمان در نظر گرفته شده است. تمامی نمونه‌های دارای سیمان و نانورس بدون آن‌که تحت فشار سربار قرار بگیرند در داخل قالب و پس از قرار دادن در کیسه‌های آب‌بند (به‌منظور جلوگیری از تبخیر رطوبت داخلی نمونه) به‌مدت 28 روز در محیط مرطوب (وان آب) نگهداری شدند.

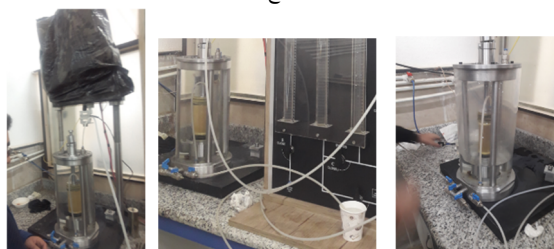


(ب)

(الف)



(ج)



(د)

(ه)

(و)

شکل 3- مراحل ساخت و آزمایش نمونه‌های خاک:

(الف) جاگذاری غشای لاتکس و فیکس کردن آن با O-Ring،
(ب) بستن قالب به قطر 5 و ارتفاع 10 سانتی‌متر به‌دور غشا و انجام وکیوم (10-15 کیلوپاسکال مکش)، (ج) ریختن و کوبیدن خاک در 5 لایه، (د) پرکردن سلول با آب و کنترل نسبت فشار آب حفره‌ای به فشار سلول، (ه) عبور دادن گاز منوکسیدکربن و کنترل سرعت عبور آن، (و) عبور آب از نمونه به‌همراه اعمال کنترل بار سیکلی

2-3-2- بارگذاری نمونه

از آنجایی که تعیین خصوصیات دینامیکی نمونه‌ها مدنظر می‌باشد، آزمایش به‌صورت کنترل کرنش در سطح فشار همه‌جانبه مدنظر (50 و 100 و 150 کیلوپاسکال) با کرنش‌های 0/001، 0/01، 0/1 و 1 درصد صورت می‌پذیرد. تعداد سیکل بارگذاری 50 سیکل انتخاب شده و فرکانس بارگذاری در تمامی آزمایش‌ها 0/1 هرتز بود. دلیل انتخاب فرکانس 0/1 به‌علت ریزدانه بودن مصالح است تا اجازه گسترش آب حفره‌ای به نمونه داده شود. جدول (5) برنامه تست‌های انجام گرفته در پژوهش را بیان می‌کند.

در رابطه (2)، W_D انرژی مستهلک شده، W_s حداکثر انرژی کرنشی و A_{loop} سطح منحنی هیستریزس می‌باشد. پارامترهای G_{sec} و ξ غالباً به‌عنوان پارامترهای خطی معادل مصالح نامیده می‌شوند.

2-4-1- محاسبه مدول برشی

طبق داده‌های حاصل از آزمایش سه‌محوری سیکلی، نمودار هیستریزس تنش برشی برحسب کرنش برشی ترسیم می‌گردد. از آنجاکه در آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی انجام شده تنها کرنش و تنش محوری را می‌توان اندازه‌گیری نمود، مقادیر تنش برشی τ و کرنش برشی γ به ترتیب با روابط (3) و (4) محاسبه می‌شود.

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{q_a}{2} \quad (3)$$

$$\gamma = (1 + \nu)\varepsilon_a \quad (4)$$

در رابطه‌های (3) و (4)، σ_1 و σ_3 تنش‌های نرمال اصلی، ε_a کرنش محوری و ν ضریب پواسون می‌باشد. در این مطالعه به‌جهت آن‌که آزمایش در شرایط زهکشی نشده و نمونه کاملاً اشباع است، مقدار ضریب پواسون برابر 0/5 در نظر گرفته شده است. بعد از رسم منحنی هیستریزس، مدول برشی G با استفاده از شیب حلقه‌های هیستریزس محاسبه می‌گردد (رابطه (5)).

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (5)$$

شیب اولین سیکل بارگذاری، نشان‌دهنده بزرگترین مقدار مدول برشی G_{max} می‌باشد. به‌دلیل انجام ندادن آزمایش‌های کرنش کم در این مطالعه، به‌منظور تخمین G_{max} از رابطه تجربی پیشنهاد شده برای ماسه استفاده شده است (رابطه (6)):

$$G_{max} = 1000K_{2,max}(\sigma'_m)^{0.5} \quad (6)$$

که در آن $K_{2,max}$ با توجه به تخلخل یا دانسیته نسبی قابل تعیین بوده و σ'_m با واحد lb/ft^2 می‌باشد (Seed و Idriss، 1971). در این مطالعه، با توجه به دانسیته نسبی (50%) $K_{2,max}$ برابر با 46 و با جایگذاری در رابطه (6) مقدار G_{max} برحسب مگاپاسکال مطابق جدول (6) محاسبه می‌گردد.

جدول 6- G_{max} خاک بدون افزودنی در این مطالعه

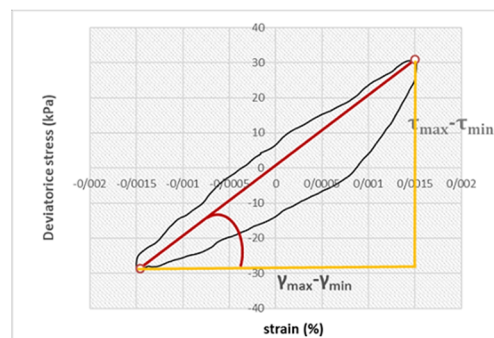
| G_{max} (MPa) | فشار همه جانبه (محصورکننده) |
|-----------------|-----------------------------|
| 71/64 | 50 کیلوپاسکال |
| 100/64 | 100 کیلوپاسکال |
| 123/26 | 150 کیلوپاسکال |

جدول 5- برنامه کلی آزمایش‌های انجام گرفته

| سری نمونه | نوع خاک | افزودنی (%) | | فشار محصورکننده (kPa) | سن (روز) | D_r (%) |
|-----------|-------------|-------------|----|-----------------------|----------|-----------|
| | | C | NC | | | |
| 1 | M6S4 | 0 | 0 | 50.100.150 | 0 | 50 |
| 2 | M6S4+C | 4 | 0 | 50.100.150 | 28 | 50 |
| 3 | M6S4+C+NC20 | 4 | 20 | 50.100.150 | 28 | 50 |
| 4 | M6S4+C+NC40 | 4 | 20 | 50.100.150 | 28 | 50 |

2-4-2- پارامترهای خطی معادل

یک نمونه خاک تحت اثر بار چرخه‌ای متقارن می‌تواند حلقه هیستریزسی مطابق شکل (4) داشته باشد. منحنی شکل (4)، از نتایج یکی از چرخه‌های بارگذاری انجام شده در مطالعه حاضر به‌دست آمده است (نمونه خاک بدون افزودنی در سیکل دهم تحت فشار همه جانبه 100 kPa و کرنش 0/1%). به‌طورکلی دو مشخصه مهم منحنی هیستریزس شیب و پهنای (سطح زیر) آن می‌باشد. شیب منحنی به‌سختی خاک بستگی دارد که در خلال بارگذاری به‌وسیله مدول برشی تانژانت (G_{tan}) در هر نقطه قابل بیان است. بدیهی است که شیب منحنی تنش-کرنش در طول یک سیکل بارگذاری تغییر می‌کند، لیکن مقدار میانگین آن در طی یک حلقه کامل تقریباً معادل مدول برشی سکانتی G_{sec} است که شیب عمومی منحنی هیستریزس را بیان می‌کند (رابطه (1)).



شکل 4- نمونه‌ای از منحنی تپ حلقه هیستریزس خاک

$$G_{sec} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}} \quad (1)$$

در رابطه (1)، τ_c و γ_c به ترتیب دامنه‌های تنش و کرنش برشی می‌باشند. پهنای منحنی هیستریزس وابسته به سطحی است که به‌عنوان شاخصی از استهلاک انرژی بوده و معمولاً به‌وسیله ضریب میرایی ξ قابل بیان است (رابطه (2)).

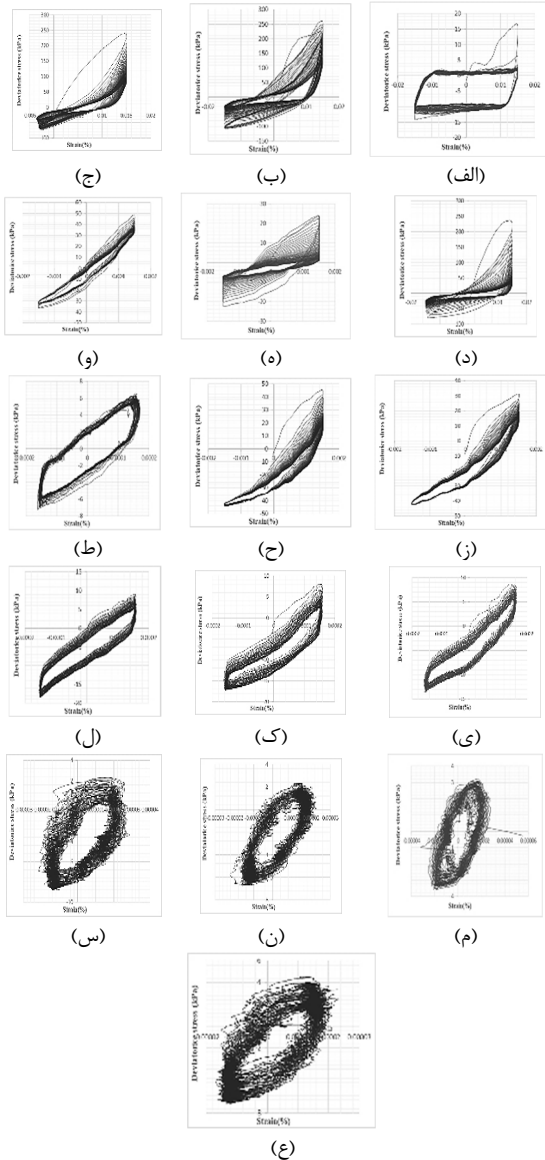
$$\xi = \frac{W_D}{4\pi W_s} = \frac{1}{2\pi} \frac{A_{loop}}{G_{sec} \gamma_c^2} \quad (2)$$

3- نتایج و بحث

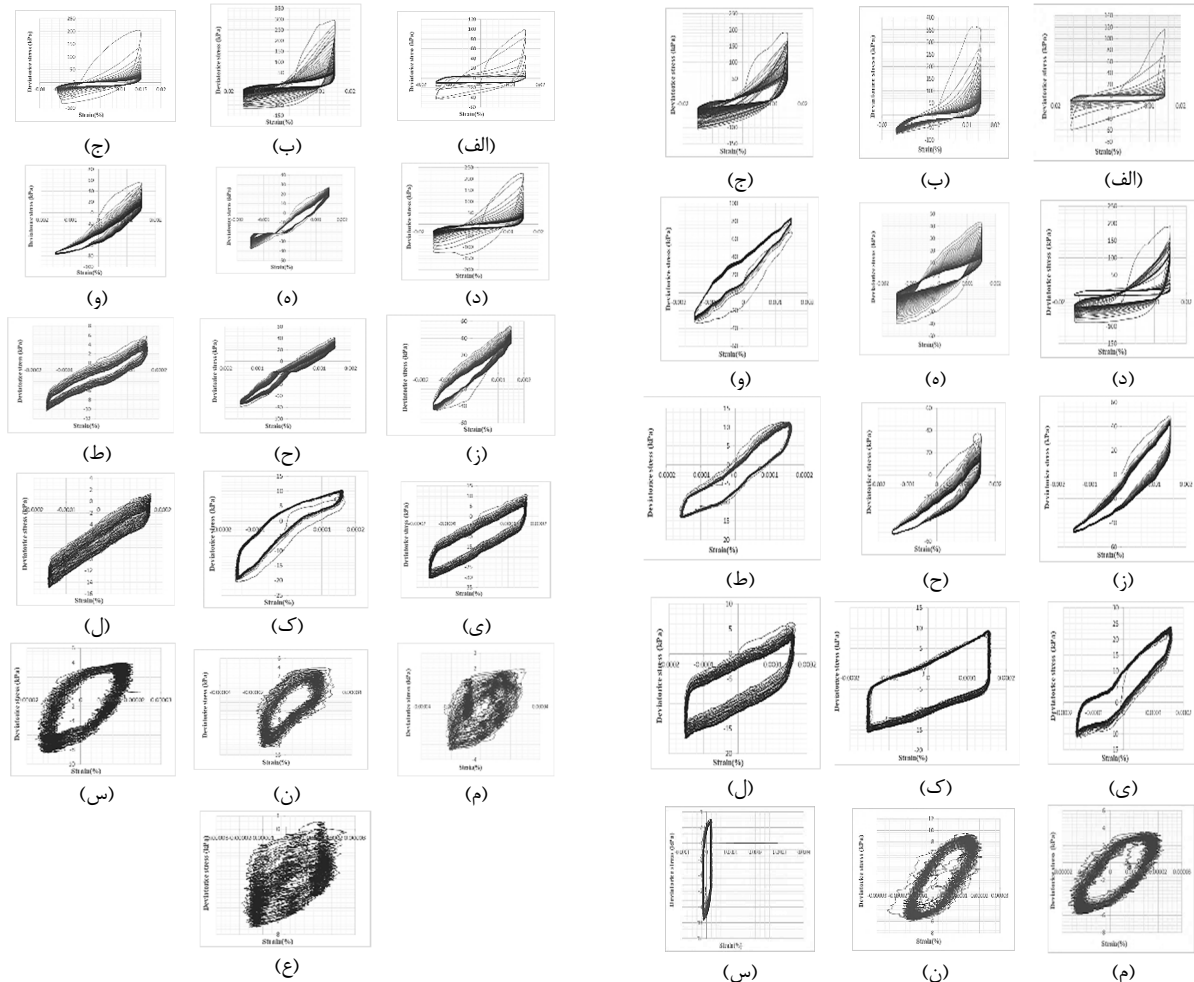
عنوان آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی در شرایط زهکشی نشده و همسان برروی نمونه ماسه سیلتی خالص، سیمانته و سیمان با نانورس با تراکم نسبی 50% انجام گردید. در سیکل‌های مختلف بارگذاری با استفاده از داده‌های خروجی پارمترهای لازم محاسبه می‌گردد؛ شامل نسبت اضافه فشار R_{II} تغییرات فشار منفذی به ضریب تنش مؤثر اولیه، نامتغیرهای تنش (p و q)، تنش انحرافی (σ_d)، کرنش محوری (ϵ_1)، تنش برشی (τ)، کرنش برشی (γ)، اضافه فشار آب حفره‌ای (u_i)، تنش مؤثر انحرافی (σ'_d)، فشار همه‌جانبه (σ'_3) و تنش محوری (σ'_1). نتایج حاصل به صورت منحنی‌های تنش-کرنش، تنش-تعداد سیکل، اضافه فشار حفره‌ای-کرنش، کرنش برشی-تعداد سیکل (چرخه بارگذاری)، تغییر مکان-تعداد سیکل و مسیر تنش ترسیم شده است. در ادامه نتایج به دست آمده ارائه می‌گردد.

3-1- تغییرات تنش-کرنش (حلقه‌های هیستریزس)

حلقه‌های هیستریزس در سطوح کرنش 0/1، 0/01، 0/001 و تحت فشارهای همه‌جانبه 50، 100 و 150 کیلوپاسکال برای چهار حالت خاک بدون افزودنی (نرمال)، خاک سیمانته (شامل 4% سیمان)، خاک سیمانته با جایگزینی 20 و 40 درصد سیمان با نانورس قابل حصول می‌باشد. با استفاده از حلقه هیستریزس می‌توان مدول برشی و درصد میرایی را محاسبه نمود. شکل (5) منحنی‌های هیستریزس در فشار همه‌جانبه 50 کیلوپاسکال در کرنش‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به این‌که کلیه نمونه‌ها تحت شرایط همسان تحکیم یافته‌اند، آغاز نمودارهای تنش-کرنش از مبدا مختصات بوده است. همان‌گونه که در قسمت‌های (الف)، (ه) و (ط) از شکل (5) مشخص است برای خاک نرمال (بدون افزودنی) بعد از اعمال بار، منحنی هیستریزس افقی (روانگرا) شده ولی برای نمونه‌های بهسازی شده با سیمان و نانورس سختی نمونه افزایش یافته است. در شکل‌های (6) و (7) نیز نتایج حلقه‌های هیستریزس به ترتیب برای حالت‌های فشار همه‌جانبه 100 و 150 کیلوپاسکال ترسیم شده است. لازم به یادآوری است که علائم C100، C80-NC20 و C60-NC40 به ترتیب نمایانگر خاک بهسازی شده فقط با سیمان، خاک سیمانته با جایگزینی 20 درصد از سیمان با نانورس و خاک سیمانته با جایگزینی 40 درصد از سیمان با نانورس می‌باشد. با استفاده از تغییرات تنش-کرنش در هر چرخه می‌توان مدول برشی و درصد میرایی را برای سیکل‌های مختلف به دست آورد.



شکل 5- منحنی‌های تنش-کرنش برشی برای: فشار همه‌جانبه 50 kPa با: کرنش 1 درصد: (الف) نرمال، (ب) C100، (ج) C80-NC20، (د) C60-NC40: کرنش 0/1 درصد، (ه) نرمال، (و) C100، (ز) C80-NC20، (ح) C60-NC40: کرنش 0/01 درصد، (ط) نرمال، (ی) C100، (ک) C80-NC20، (ل) C60-NC40: کرنش 0/001 درصد، (م) نرمال، (ن) C100، (س) C80-NC20، (ع) C60-NC40.

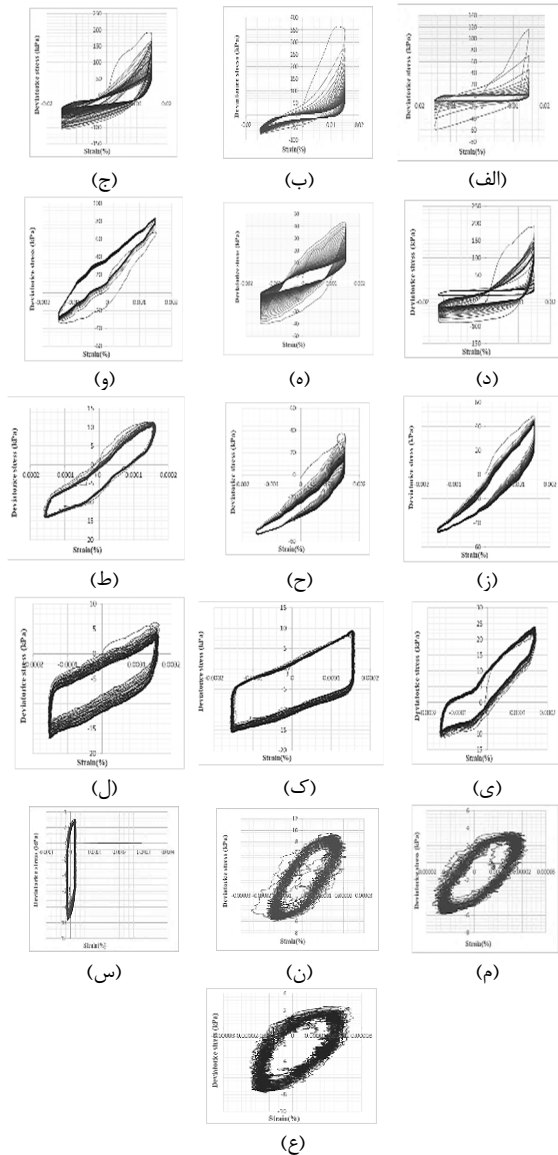


شکل 7- منحنی‌های تنش- کرنش برشی برای فشار همه‌جانبه 150 kPa با کرنش 1 درصد: الف) نرمال، ب) C100، ج) C80-NC20، د) C60-NC40: کرنش 0/1 درصد، ه) نرمال، و) C100، ز) C80-NC20، ح) C60-NC40: کرنش 0/01 درصد، ط) نرمال، ی) C100، ک) C80-NC20، ل) C60-NC40: کرنش 0/001 درصد، م) نرمال، ن) C100، س) C80-NC20، ع) C60-NC40.

3-2- تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای-کرنش

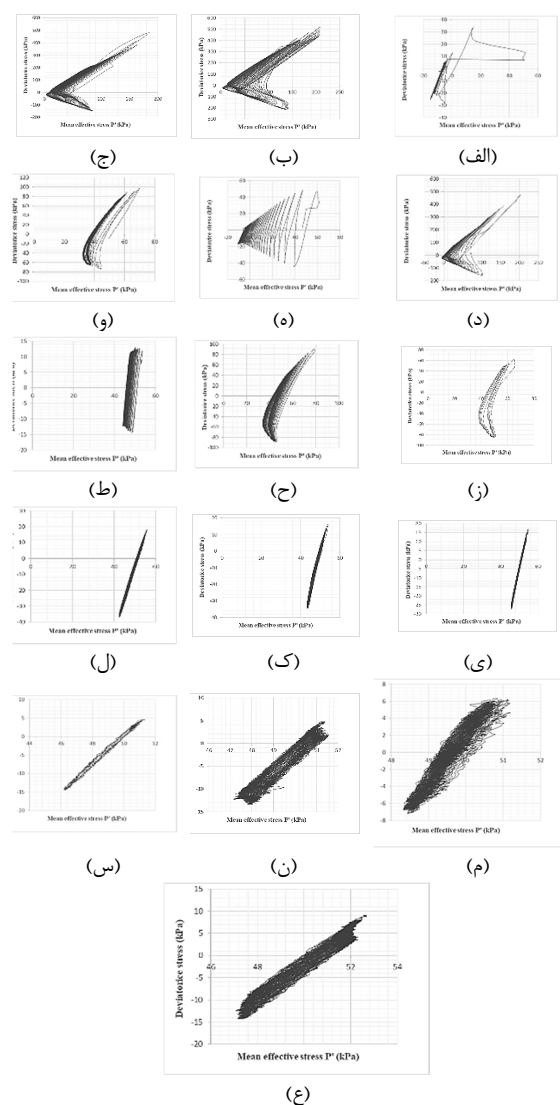
منحنی تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای برحسب کرنش در کرنش‌های و فشارهای همه‌جانبه مختلف برای نمونه‌های خاک مورد آزمایش ترسیم شده است. در شکل (8) منحنی‌های اضافه فشار آب منفذی در فشارهای همه‌جانبه 50 کیلوپاسکال تحت سطوح مختلف کرنش نشان داده شده است.

جهت جلوگیری از افزایش متن اصلی مقاله، نمودارهای مربوط به تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای برحسب کرنش برای سایر فشارهای محصورکننده و نیز نمودارهای تنش برشی، کرنش برشی و تغییرمکان در نمونه‌های مختلف خاک در طی چرخه‌های بارگذاری در پیوست آورده شده است.

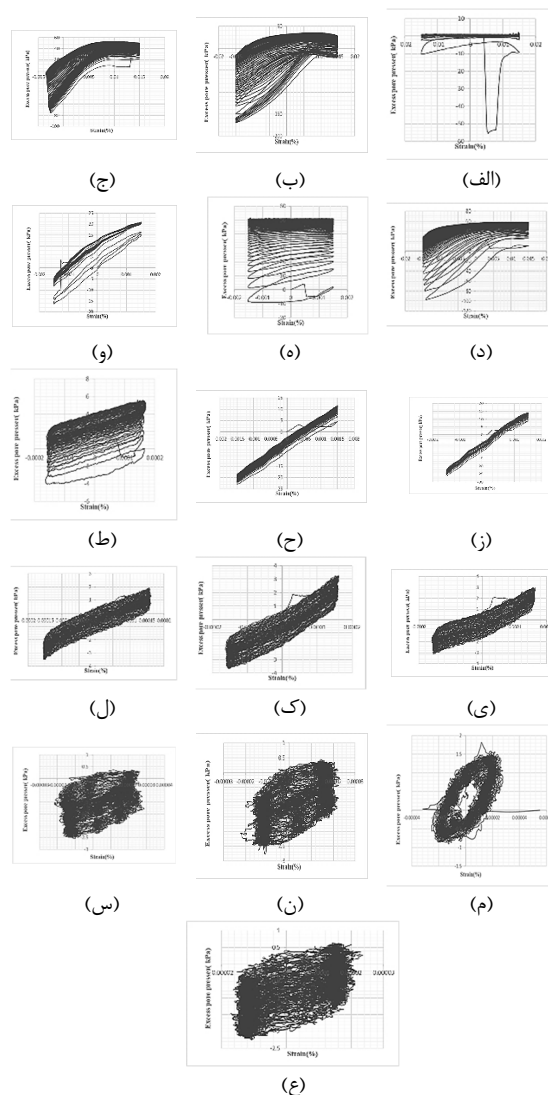


شکل 6- منحنی‌های تنش-کرنش برشی برای فشار همه‌جانبه 100 kPa با کرنش 1 درصد: الف) نرمال، ب) C100، ج) C80-NC20، د) C60-NC40: کرنش 0/1 درصد، ه) نرمال، و) C100، ز) C80-NC20، ح) C60-NC40: کرنش 0/01 درصد، ط) نرمال، ی) C100، ک) C80-NC20، ل) C60-NC40: کرنش 0/001 درصد، م) نرمال، ن) C100، س) C80-NC20، ع) C60-NC40.

مبدأ مختصات فاصله می‌گیرد. این درحالی است که در حالت خاک بدون بهسازی، منحنی نهایتاً به مبدأ نزدیک شود که نشان از روانگرایی نمونه دارد.



شکل 9- منحنی‌های مسیر تنش برای فشار همه‌جانبه 50 kPa با کرنش 1 درصد: الف) نرمال، ب) C100، ج) C80-NC20، د) C60-NC40: کرنش 0/1 درصد، ه) نرمال، و) C100، ز) C80-NC20، ح) C60-NC40: کرنش 0/01 درصد، ط) نرمال، ی) C100، ک) C80-NC20، ل) C60-NC40: کرنش 0/001 درصد، م) نرمال، ن) C100، س) C80-NC20، ع) C60-NC40

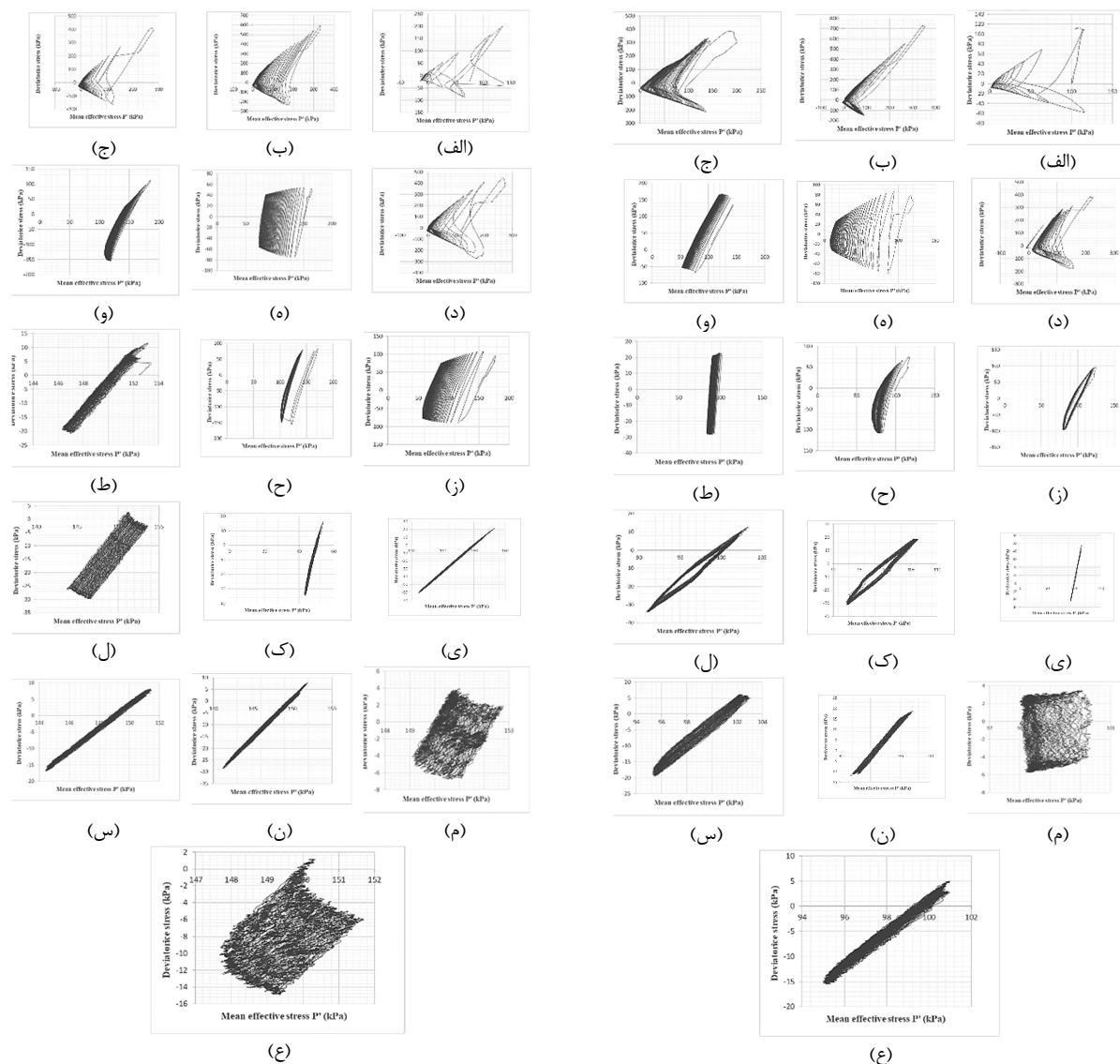


شکل 8- منحنی‌های اضافه فشار آب حفره‌ای-کرنش برای فشار همه‌جانبه 50 kPa با کرنش 1 درصد: الف) نرمال، ب) C100، ج) C80-NC20، د) C60-NC40: کرنش 0/1 درصد، ه) نرمال، و) C100، ز) C80-NC20، ح) C60-NC40: کرنش 0/01 درصد، ط) نرمال، ی) C100، ک) C80-NC20، ل) C60-NC40: کرنش 0/001 درصد، م) نرمال، ن) C100، س) C80-NC20، ع) C60-NC40

با استفاده از منحنی‌های کرنش برشی و تغییرمکان برحسب تعداد سیکل می‌توان از شرایط صحیح انجام آزمایش کنترل کرنش اطمینان حاصل نمود.

3-3- منحنی مسیر تنش

جهت ارزیابی تغییرات افزایش مقاومت خاک با افزودنی‌های مختلف، منحنی مسیر تنش (تغییرات تنش انحرافی برحسب تنش مؤثر) ترسیم شده است. طبق بخش (الف) در شکل‌های (9) تا (11) مشاهده می‌شود که برای نمونه‌های بهسازی شده، منحنی از



شکل 11- منحنی‌های مسیر تنش برای فشار همه‌جانبه 150 kPa
 با کرنش 1 درصد (الف: نرمال، ب) C100، ج) C80-NC20،
 د) C60-NC40: کرنش 0/1 درصد، ه) نرمال، و) C100،
 ز) C80-NC20، ح) C60-NC40: کرنش 0/01 درصد: ط) نرمال،
 ی) C100، ک) C80-NC20، ل) C60-NC40: کرنش 0/001 درصد،
 م) نرمال، ن) C100، س) C80-NC20، ع) C60-NC40

شکل 10- منحنی‌های مسیر تنش برای فشار همه‌جانبه 100 kPa
 با: کرنش 1 درصد: (الف: نرمال، ب) C100، ج) C80-NC20،
 د) C60-NC40: کرنش 0/1 درصد، ه) نرمال، و) C100، ز) C80-
 NC20، ح) C60-NC40: کرنش 0/01 درصد: ط) نرمال، ی) C100،
 ک) C80-NC20، ل) C60-NC40: کرنش 0/001 درصد: م) نرمال،
 ن) C100، س) C80-NC20، ع) C60-NC40

3-4- مدول برشی

در این بخش، نتایج مدول برشی تعیین شده برای سیکل دهم در کرنش‌های 0/01، 0/1 و 1 درصد در جدول (7) خلاصه شده است.

به‌منظور بررسی بهتر روند تأثیر سیمانته شدن در بهبود خواص دینامیکی و جایگزینی نانوس به‌جای بخشی از سیمان، نتایج G_{max} برای نمونه‌های خاک آزمایش شده در شکل (12) ترسیم شده است.

کنترل شده با کرنش بارگذاری شوند، مشاهده می شود که دامنه تنش برشی با افزایش تعداد سیکل ها کاهش می یابد (Kramer, 1996).

طبق شکل (12) مقادیر مدول برشی در فشار همه جانبه 100 کیلوپاسکال نیز همانند فشار همه جانبه 50 کیلوپاسکال برای ماسه لای دار سیمانی در همه محدوده های کرنش برشی بیشتر از نمونه های سیمانته و بهسازی شده با نانورس بود. مقادیر مدول برشی نمونه سیمانته و نمونه سیمانته نانورس با افزایش کرنش در مقایسه با نمونه بهسازی نشده افزایش یافت. از سوی دیگر، در کرنش 1 درصد و فشار همه جانبه 100 کیلوپاسکال، مقادیر مدول برشی از 5/6 مگاپاسکال برای ماسه لای دار به 11/23 مگاپاسکال برای نمونه سیمانته و 16/29 مگاپاسکال برای نمونه سیمانته با 20 درصد نانورس و همچنین 15/8 مگاپاسکال برای ماسه لای دار سیمانته با 40 درصد نانورس افزایش یافت. این پدیده نشان می دهد که در فشار همه جانبه 100 کیلوپاسکال نیز مدول برشی با افزودن سیمان و سپس جایگزینی سیمان با نانورس افزایش یافته است. برای مثال، در کرنش 0/01 مقادیر مدول برشی از 104 برای نمونه بهسازی نشده به 102 برای نمونه سیمانته و 104 برای نمونه سیمانته با 20 درصد نانورس و 108 برای نمونه سیمانته با 40 درصد نانورس رسیده است.

تحت فشار همه جانبه 150 کیلوپاسکال کرنش 0/01 مقادیر مدول برشی از 82/57 برای نمونه بهسازی نشده به 112/43 برای نمونه سیمانته و 122/17 برای نمونه سیمانته با 20 درصد نانورس و 123/83 برای نمونه سیمانته با 40 درصد نانورس رسیده است. و در کرنش 1 مقادیر مدول برشی از 6/46 برای نمونه بهسازی نشده به 15/1 برای نمونه سیمانته و 17/5 برای نمونه سیمانته با 20 درصد نانورس و 17/1 برای نمونه سیمانته با 40 درصد نانورس رسیده است.

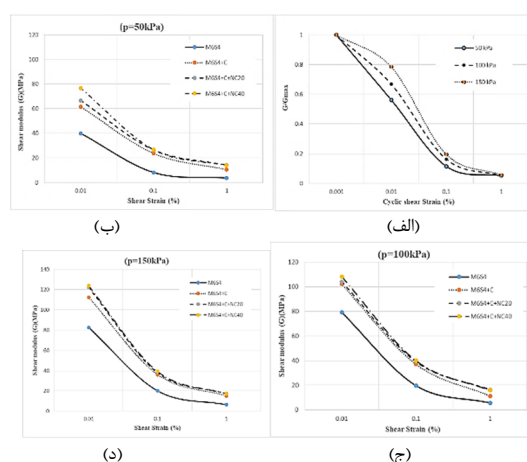
طبق شکل (12) و جدول (7)، با افزایش کرنش، مدول برشی کاهش یافته و بهسازی با سیمان و در ادامه جایگزینی بخشی از سیمان با نانورس تأثیر مثبتی بر افزایش مدول برشی داشته است. همچنین، همان طور که انتظار می رفت مدول برشی با افزایش فشار محصورکننده افزایش یافته است (Kramer, 1996).

3-5- درصد میرایی

در اینجا، در طی تعیین درصد میرایی به منظور محاسبه مساحت حلقه هیستریزس در هر سیکل بارگذاری تعداد 500 نقطه در دست می باشد. نتایج درصد میرایی در نمونه های مختلف در جدول (8) خلاصه شده است. به منظور بررسی بهتر روند تأثیر سیمانته شدن در بهبود خواص دینامیکی و جایگزینی نانورس به

جدول 7- مدول برشی به دست آمده در اینجا

| C60-NC40 | C80-NC20 | C100 | M6S4 | Stran % | G (MPa) |
|----------|----------|-------|------|---------|---------------------|
| 76/6 | 66/5 | 61/6 | 39/9 | 0/01 | فشار |
| 26/7 | 26/55 | 23/73 | 8/1 | 0/1 | همه جانبه kPa50 |
| 12/39 | 12 | 10/61 | 3/6 | 1 | فشار |
| 108/1 | 104 | 102 | 79 | 0/01 | همه جانبه kPa100 |
| 40 | 39/1 | 37 | 19/6 | 0/1 | فشار |
| 8/1 | 8/1 | 6/7 | 5/6 | 1 | همه جانبه kPa150 |
| 123/8 | 122/1 | 112/4 | 82/5 | 0/01 | فشار |
| 39/2 | 38 | 36/1 | 20/1 | 0/1 | همه جانبه |
| 8/1 | 8 | 7/8 | 6/46 | 1 | kPa150 |



شکل 12- G_{max} در نمونه خاک: الف) بدون افزودنی، ب) فشار همه جانبه 50 kPa، ج) فشار همه جانبه 100 kPa، د) فشار همه جانبه 150 kPa

مطابق شکل (12) مقادیر مدول برشی نمونه ماسه لای دار برای فشار محدودکننده 50 کیلوپاسکال در بازه 39/98 تا 3/66 مگاپاسکال تحت کرنش برشی 0/01 تا یک درصد قرار دارد. از سوی دیگر، مقادیر مدول برشی در همان سطح کرنش و فشار محدودکننده، برای سیلت ماسه ای سیمانته و نمونه های سیمانته با جایگزینی 20 درصد نانورس به ترتیب برابر با 61/63 تا 10/61 مگاپاسکال و 66/59 تا 14/2 مگاپاسکال بوده است. در نمونه 40 درصد نانورس مقدار مدول برشی از 76/6 به 13/95 مگاپاسکال کاهش پیدا کرده است. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که برای تمامی نمونه ها مقادیر مدول برشی با افزایش کرنش برشی کاهش می یابد.

این امر با ادبیات فنی مطابقت دارد که تحت شرایط بارگذاری هارمونیک کنترل شده با تنش، ایجاد فشار منفذی و تغییر ساختاری می تواند باعث افزایش دامنه کرنش برشی یک نمونه خاک با افزایش تعداد سیکل ها شود (Saadati و همکاران، 2022؛ Pantazopoulos و Atmatzidis، 2012). اگر نمونه های خاک رس یا ماسه اشباع به طور هماهنگ تحت شرایط زه کشی نشده

طبق شکل (13)، مقادیر میرایی برای خاک بدون افزودنی در کرنش 0/01 درصد در حدود 6/36 تا 11/44 درصد متغیر می‌باشد. علت این که میرایی در فشار همه‌جانبه 50 کیلوپاسکال بیش از 10 درصد می‌باشد به نوع خاک و فشار همه‌جانبه پایین مرتبط است. میرایی حساسیت فراوانی به خمیری خاک و فشار همه‌جانبه دارد (Kramer, 1996). از طرفی چون خاک موردنظر فاقد خاصیت خمیری ($PI=0$) بوده و فشار همه‌جانبه نیز کم می‌باشد (50 کیلوپاسکال) میرایی افزایش قابل توجهی داشته است. به طوری که مقادیر درصد میرایی در فشار همه‌جانبه 50 کیلوپاسکال با افزودن 4 درصد سیمان در کرنش 0/01 درصد حدوداً 90 درصد کاهش و با جایگزینی 20 و 40 درصد نانوس در حدود 140 درصد میرایی کاهش پیدا نموده است. در کرنش 1 درصد 63 درصد با افزودن 4 درصد سیمان و با جایگزینی 20 و 40 درصد نانوس 80 درصد میرایی کاهش پیدا نموده است.

به طور کلی، میرایی با افزایش کرنش افزایش یافته و با زیاد شدن فشار همه‌جانبه کاهش می‌یابد که در فشار همه‌جانبه 100 کیلوپاسکال و بالاتر، روند کاهش میرایی کندتر می‌شود. برای نمونه‌های بهسازی شده نیز با افزایش کرنش، میرایی زیاد شده و با افزایش فشار همه‌جانبه کاهش ناچیزی دارد.

مقادیر میرایی در فشار همه‌جانبه 100 و 150 کیلوپاسکال با افزودن 4 درصد سیمان در کرنش 0/01 درصد به ترتیب حدوداً 44 و 12 درصد کاهش و با جایگزینی 20 و 40 درصد نانوس در حدود 60 درصد کاهش پیدا نموده است. در کرنش 1 درصد 60 درصد با افزودن 4 درصد سیمان و با جایگزینی 20 و 40 درصد نانوس 70 درصد میرایی کاهش پیدا نموده است.

طبق شکل (13) و جدول (8)، برخلاف سختی (مدول برشی) درصد میرایی تمامی نمونه‌ها با افزایش فشار همه‌جانبه کاهش پیدا می‌کند. همچنین، در تمامی نمونه‌ها با افزایش کرنش، میرایی افزایش دارد. این موضوع را می‌توان به تضعیف پیوند بین دانه‌های سیلت ماسه‌دار و سیمان با افزایش کرنش برشی و در نتیجه اتلاف انرژی بیشتر به موجب افزایش تحرک دانه‌های خاک نسبت داد. از طرفی با جایگزینی 20 درصد نانوس به جای سیمان میرایی نمونه‌های بهسازی شده کاهش می‌یابد ولی اضافه کردن نانوس به میزان 40 درصد تأثیر محسوسی بر روی میرایی نمونه‌های بهسازی شده نداشته است.

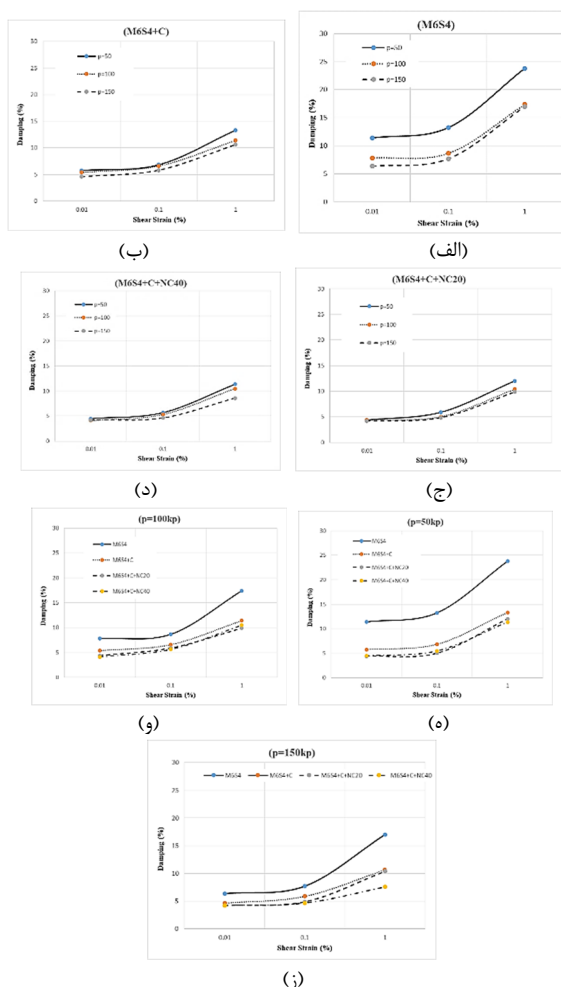
3-6- تغییرات فشار آب حفره‌ای

تولید اضافه فشار حفره‌ای عامل فعال شدن روانگرایی می‌باشد. بدون تغییر در فشار آب حفره‌ای تنش مؤثر تغییر نکرده و روانگرایی جریانی یا تحرک سیکی هیچ‌یک اتفاق نخواهند افتاد. در این مقاله ابتدا اضافه فشار آب حفره‌ای در هر سیکل اندازه‌گیری

جای بخشی از سیمان، نتایج میرایی برای نمونه‌های خاک آزمایش شده در شکل (13) ترسیم شده است.

جدول 8- درصد میرایی به دست آمده

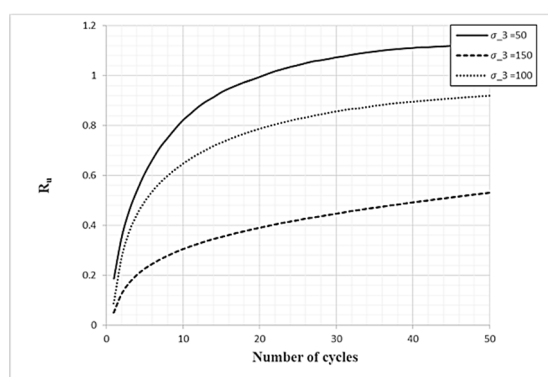
| C60-NC40 | C80-NC20 | C100 | M6S4 | Stran % | D % |
|----------|----------|------|------|---------|---------------------|
| 4/4 | 4/3 | 5/7 | 11/4 | 0/01 | فشار |
| 5/6 | 5/9 | 6/8 | 13/2 | 0/1 | همه‌جانبه kPa50 |
| 11/3 | 12 | 13/3 | 23/8 | 1 | |
| 4/1 | 4/3 | 5/4 | 7/8 | 0/01 | فشار |
| 5/3 | 5 | 6/6 | 8/6 | 0/1 | همه‌جانبه kPa100 |
| 10/5 | 10/3 | 11/4 | 17/3 | 1 | |
| 4/2 | 4/2 | 4/6 | 6/3 | 0/01 | فشار |
| 4/6 | 4/8 | 5/8 | 7/7 | 0/1 | همه‌جانبه kPa150 |
| 8/5 | 9/9 | 10/6 | 17 | 1 | |



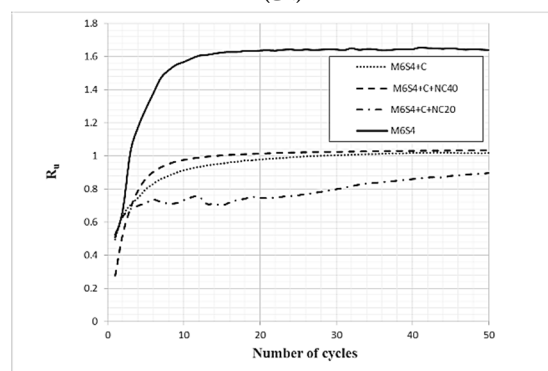
شکل 13- درصد میرایی در نمونه خاک: (الف) بدون افزودنی، (ب) سیمانته، (ج) سیمانته با جایگزینی 20 درصد نانوس، (د) سیمانته با جایگزینی 40 درصد نانوس، (ه) فشار همه‌جانبه 50 kPa، (و) فشار همه‌جانبه 100 kPa، (ز) فشار همه‌جانبه 150 kPa

اولیه روانگرا می‌شود. اما نمونه سیمانته و نمونه سیمانته حاوی 20 درصد نانورس در سیکل‌های بالا هم روانگرا نشده‌اند. افزودن 40 درصد نانورس در فشار همه‌جانبه 50 کیلوپاسکال بر روی نسبت فشار منفذی اضافی و روانگرایی تأثیر مثبتی ندارد. در فشار همه‌جانبه 100 کیلوپاسکال اثر مثبت افزودن 20 درصد نانورس به نمونه سیمانی محسوس‌تر است؛ به طوری که نمونه سیمانته در سیکل 50 روانگرا شده است. اما برای نمونه با 20 درصد نانورس حدود 0/8 است و روانگرا نشده است. همچنین، افزودن 40 درصد نانورس تأثیر مثبتی بر روی نسبت فشار منفذی اضافی و روانگرایی ندارد.

طبق شکل (14) در خاک بدون افزودنی با فشار همه‌جانبه 50 کیلوپاسکال در سیکل 20م روانگرا می‌شود. به عبارت دیگر، در این سیکل نسبت فشار منفذی اضافی $R_{u20}=1$ و در سیکل 50 ام $R_{u50}=1/16$ است. اما در فشار محدود 100 کیلوپاسکال در سیکل 50م مقدار $R_{u50}=0/95$ بوده و خاک هنوز روانگرا نشده است. در نهایت، زمانی که فشار محصور کننده 150 کیلوپاسکال باشد، نسبت فشار منفذی اضافی در سیکل 50م برابر $R_{u50}=0/55$ بوده و از روانگرا شدن فاصله دارد. به طور کلی، شکل (15-الف) نشان می‌دهد که با افزایش فشار محدودکننده، R_u کاهش می‌یابد.



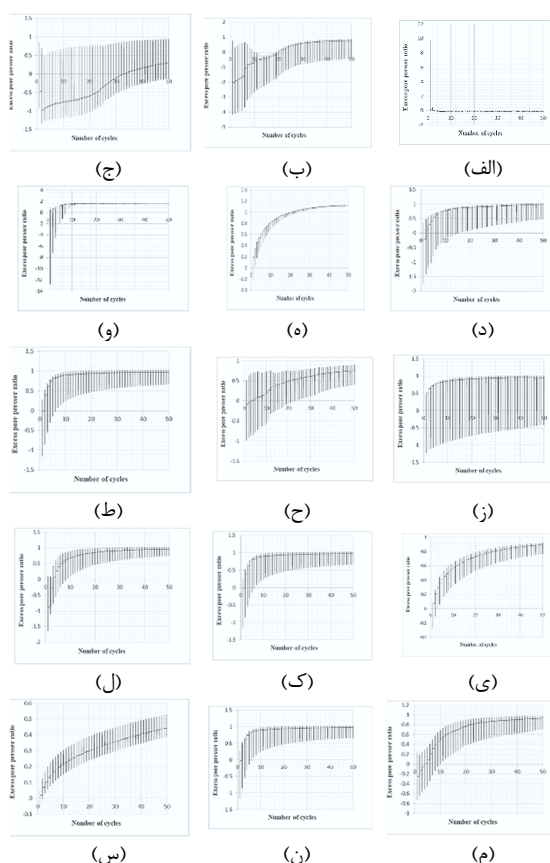
(الف)



(ب)

شکل 15- منحنی‌های نسبت فشار اضافه فشار آب حفره‌ای حداکثر تعداد سیکل در حالت: الف) کرنش 0/1 درصد، ب) کرنش یک درصد در فشار همه‌جانبه 100 کیلوپاسکال

شده و سپس نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای R_u به‌عنوان معیار روانگرایی در هر سیکل محاسبه گردیده است. به دلیل این که روانگرایی در کرنش‌های بزرگ روی می‌دهد، در خاک بدون افزودنی نتایج کرنش 1/0 و 1 درصد مورد بررسی قرار گرفته است. تغییرات نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در سیکل‌های بارگذاری برای نمونه‌های بدون افزودنی و بهسازی‌شده در شکل (14) ارائه شده است. طبق نمودارهای شکل (14)، فشار منافذ اضافی با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری افزایش می‌یابد.



شکل 14- منحنی‌های نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای - تعداد سیکل برای حالت فشار همه‌جانبه 50 kPa و کرنش 1 درصد: الف) نرمال، ب) C100، ج) C80-NC20، د) C60-NC40، ه) خاک نرمال در کرنش 0/1 درصد؛ فشار همه‌جانبه 100 kPa و کرنش 1 درصد، و) نرمال، ز) C100، ح) C80-NC20، ط) C60-NC40، ی) خاک نرمال در کرنش 0/1 درصد؛ فشار همه‌جانبه 150 kPa و کرنش 1 درصد، ک) نرمال، ل) C100، م) C80-NC20، ن) C60-NC40، س) خاک نرمال در کرنش 0/1 درصد

برای نمونه سیلتی ماسه‌دار (بدون افزودنی) در کرنش 0/1 درصد فشار آب حفره‌ای با تعداد سیکل افزایش یافته که نرخ این رشد با اضافه شدن تعداد سیکل کمتر می‌شود. طبق شکل (14) در فشار همه‌جانبه 50 کیلوپاسکال ماسه سیلتی در سیکل‌های

کرنش از 0/01 به 1 درصد در محدود 80 تا 170 درصد افزایش نشان می‌دهد.

- افزودن سیمان به مقدار 4 درصد وزن خاک موجب گردید مدول برشی در کرنش 0/01 درصد 40 درصد افزایش، در کرنش 0/1 درصد 85 درصد افزایش و در کرنش 1 درصد 100 درصد افزایش داشته باشد. همچنین، درصد میرایی در فشار همه‌جانبه 50 کیلوپاسکال 85 درصد کاهش و در فشار 100 و 150 کیلوپاسکال حدود 40 درصد کاهش پیدا نمود.

- با جایگزینی 20 درصد سیمان با نانورس مدول برشی به‌طور متوسط 3 مگاپاسکال نسبت به نمونه سیمانته افزایش و میرایی به‌طور متوسط 0/9 درصد نسبت به نمونه سیمانته کاهش یافت. با جایگزینی 40 درصد سیمان با نانورس مدول برشی نسبت به نمونه سیمانته افزایش و میرایی کاهش یافت. ولی نسبت به نمونه سیمانته با 20 درصد نانورس تغییر محسوسی نداشت. بنابراین، برای بهبود پارامترهای دینامیکی خاک مورد آزمایش جایگزینی 20 درصد سیمان با نانورس کارایی بیشتری دارد. به‌عبارت دیگر، نمونه‌های خاک که به‌میزان 4% وزن خاک پایه دارای سیمان و نانورس بوده، به‌طوری‌که 80% از کل افزودنی‌ها سیمان و 20% آن نانورس باشد، بیشترین بهبود را در رفتار دینامیکی دارد.

- فشار منافذ اضافی با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری افزایش می‌یابد. همچنین، نسبت فشار منفذی اضافی با افزایش فشار همه‌جانبه از 50 به 100 کیلوپاسکال 30 درصد کاهش و به 150 کیلوپاسکال 69 درصد کاهش دارد. در نتیجه افزایش فشار همه‌جانبه تأثیر مثبتی بر کنترل روانگرایی ماسه لای‌دار دارد.

- افزودن سیمان 4 درصد وزنی سیلت ماسه‌دار نسبت R_u را 65 درصد کاهش می‌دهد. با جایگزینی 20 درصد سیمان با نانورس R_u به‌میزان 15 درصد نسبت به نمونه سیمانته کاهش پیدا نموده و روانگرایی اولیه به‌صورت قابل توجهی به تأخیر می‌افتد. با جایگزینی 40 درصد سیمان با نانورس در مقدار R_u تغییر مثبتی مشاهده نشد. این امر نشان می‌دهد که جایگزینی 20 درصد سیمان با نانورس برای بهبود در کنترل روانگرایی ماسه سیلتی بهینه‌تر است.

در نهایت، پیشنهاد می‌شود طرح و ایده بهسازی خاک به‌روش پیشنهادی در این مقاله در طی یک مطالعه موردی پیاده‌سازی شده و از لحاظ اقتصادی و زیست‌محیطی ارزیابی و مقایسه گردد. همچنین، جایگزینی پیشنهادی در این پژوهش می‌تواند برای درصدهای مختلف ریزدانه با انواع مختلف کانی‌ها مورد مطالعه قرار گیرد.

5- مراجع

AASHTO, "AASHTO T100-Specific Gravity of Soils", 2012.

<https://www.appliedtesting.com/standards/aasht>

در منحنی‌های شکل (14) و (15)، میزان و چگونگی تأثیر مثبت افزودن نانورس برای کنترل روانگرایی اولیه نمونه بدون مشخص است. به‌طوری‌که افزودن سیمان به‌میزان 4 درصد وزنی نمونه سیلتی ماسه‌دار، نسبت فشار منفذی اضافی (R_u) را 65 درصد کاهش می‌دهد. با جایگزینی 20 درصد سیمان با نانورس نسبت R_u به‌میزان 15 درصد نسبت به نمونه سیمانته کاهش پیدا نموده و به این ترتیب روانگرایی به‌صورت قابل توجهی به تأخیر می‌افتد. همچنین، با جایگزینی 40 درصد سیمان با نانورس در نسبت فشار منفذی اضافی تغییر مثبتی حاصل نگردیده است. در اینجا، نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها و نتایج حاصل از رابطه تجربی موجود جهت تخمین نسبت میرایی خاک‌های غیرخمیری (Kramer, 1996) با یکدیگر مقایسه می‌شود. خلاصه نتایج حاصل در جدول (9) آورده شده است.

$$\xi = 0.333 \frac{1 + \exp(-0.0145Pl^{1.3})}{2} \left[0.588 \left(\frac{G}{G_{max}} \right)^2 - 1.547 \frac{G}{G_{max}} + 1 \right] \quad (7)$$

از جدول (9) می‌توان نتیجه گرفت مطابقت خوبی میان برای نتایج به دست آمده برای میرایی خاک بدون افزودنی با نتایج حاصل از نتایج روابط تجربی وجود دارد و اختلاف کمتر از 20% است.

جدول 9- مقایسه نتایج درصد میرایی به‌دست آمده از

آزمایش‌ها و رابطه تجربی

| فشار همه جانبی | درصد میرایی از آزمایش‌ها | درصد میرایی به دست آمده از رابطه تجربی |
|----------------|--------------------------|--|
| 50 کیلوپاسکال | 11/4 | 10/5 |
| 100 کیلوپاسکال | 7/82 | 7 |
| 150 کیلوپاسکال | 6/00 | 5 |

4- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، به بررسی رفتار سیکلی ماسه سیلتی در محدوده خاک‌های ریزدانه بهسازی شده با نانورس و سیمان تیپ 2 در دامنه کرنش برشی متوسط با استفاده از دستگاه سه‌محوری سیکلی پرداخته شد و خلاصه نتایج به شرح ذیل ارائه می‌گردد.

- برای تمامی نمونه‌ها با افزایش کرنش برشی، مقادیر مدول برشی کاهش و میرایی افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که در محدوده کرنش 0/01 تا 1 درصد برای خاک بدون افزودنی، مدول برشی بیش از ده برابر و در نمونه‌های بهسازی شده با سیمان و نانورس حدود 6 برابر کاهش پیدا نموده است. تغییرات میرایی در همان محدوده برای خاک بدون افزودنی با افزایش فشار همه‌جانبه بیشتر می‌شود. تغییرات میرایی برای نمونه‌های بهسازی شده با افزایش

- of clayey sand as a nano soil-improvement technique", *Scientific Reports*, 2023, 13 (1), 10913. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38712-7>
- Cheraghalikhani M, Niroumand H, Balachowski L, "Micro-and nano-illite to improve strength of untreated-soil as a nano soil-improvement (NSI) technique", *Scientific Reports*, 2024, 14 (1), 10862. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61812-x>
- Choobbasti AJ, vafaei a, soleimani kutanaei s, "mechanical properties of sandy soil improved with cement and nanosilica", *Open Engineering*, 2015, 5 (1), 111-1116. <https://cyberleninka.org/article/n/991182.pdf>
- Dano C, Hicher PY, Tailiez S, "Engineering properties of grouted sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2004, 130 (3), 328-338. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:3\(328\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:3(328))
- Delfosse-Ribay E, Djeran-Maigre I, Cabrillac R, Gouvenot D, "Shear modulus and damping ratio of grouted sand", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2004, 24 (6), 461-471. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.02.004>
- Farjad A, Abbasi N, "Application of nanoclay particles for stabilization of expansive clayey soils", *Jwss*, 2017, 21 (2), 193-204. <https://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3292-fa.pdf>
- Fattahi Masrour F, Naghdipour Mirsadeghi M, MolaAbasi H, Jamshidi Chenari R, "Effect of nanosilica on the macro-and microbehavior of dispersive clays", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2021, 33 (12), 04021349. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003975](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003975)
- Fernandez AL, Santamarina JC, "Effect of Cementation on the Small-Strain Parameters of Sands", *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, 38 (1), 19-199. <https://doi.org/10.1139/t00-081>
- Hussien RS, Albusoda BS, "Effect of permeation grouting with nano-materials on shear strength of sandy soil: An experimental study", In *AIP Conference Proceedings*, 2651 (1), AIP Publishing, 2023. <https://doi.org/10.1063/5.0132680>
- Iran Pour B, Haddad A, "Case study of the effect of adding nanoclay on the collapse potential of Gorgan loess soil", In: *The First National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tehran, Iran, 2014. <https://civilica.com/doc/332437/>
- Jafari Kermanipour M, Bagheripour MH, Yaghoubi E, "Mechanical and microstructural characterization of a nano-stabilized sandy soil", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2024, 42 (7), 6131-6146. <https://doi.org/10.1007/s10706-024-02890-6>
- Janalizadeh A, Nazarpour H, Ebrahimi M, "Effect of nanoclay on permeability of silty sand", In *Proceedings of 8th National Congress on Civil Engineering*, Mazandaran, Iran, Babol Noshirvani University of Technology, 2014, (In Persian).
- Karimiazar J, Sharifi Teshnizi E, O'Kelly BC, Sadeghi Sh, Yazdi A, Arjmandzadeh R, "Effect of nano-silica on engineering properties of lime-treated marl soil", *Transp Geotech*, 2023, 43, 101123. <https://doi.org/10.1016/j.transgeotech.2023.101123>
- o-standards
- AASHTO, "AASHTO T88-Standard method of test for particle size analysis of soils", 1997.
- Abbasi N, Farjad A, Sepehri S, "The use of nanoclay particles for stabilization of dispersive clayey soils", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2018, 36, 327-335. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0330-9>
- Ahmadi H, Janati S, Jamshidi Chenari R, "Strength parameters of stabilized clay using polypropylene fibers and Nano-MgO: An experimental study", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2020, 38 (3), 2845-2858. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01191-y>
- Alizadeh Kakroudi H, Bayat M, Nadi B, "Laboratory Study of Compressive Strength, Shear Strength Parameters, and Durability Against Freeze-Thaw Cycles of Silty Sand Improved with Nano-Silica and Basalt Fibers", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, 54 (116), 37-52. <https://doi.org/10.22034/ceej.2023.54284.2203>
- Amini Behbahani B, Khalghi Fard M, "The effect of nanoclay on the geotechnical properties of sandy soil", In: *The Third International Conference on Science and Engineering*, Istanbul, Turkey, 2016. <https://civilica.com/doc/491469>
- Asghari E, Toll DG, Haeri SM, "Effect of cementation on the shear strength of Tehran gravely sand using triaxial tests", *Journal of Sciences*, Islamic Republic of Iran, 2004, 15 (1), 65-71. <https://www.academia.edu/download/39092962/54ba46030cf29e0cb049ecef.pdf>
- ASTM International, "ASTM-D1557- Standard test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))", 2012.
- ASTM International, "ASTM-D2049-Test Method for Relative Density of Cohesionless Soils", 1969.
- ASTM International, "ASTM-D422, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils", 2001.
- ASTM International, "ASTM-D5311- Standard test method for load controlled cyclic triaxial strength of soil", 1992.
- ASTM International, "ASTM-D698-Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))", 2012.
- ASTM International, "ASTM-D854-Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by the Water Displacement Method", 2006.
- Building and Housing Research Center (BHRC), "Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings: Standard No. 2800-05, 4th Ed.", 2015.
- Changizi F, Haddad A, "Effect of Nano-SiO₂ on the Geotechnical Properties of Cohesive Soil", *Geotech Geol Eng*, 2016, 34, 725-733. <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9962-9>
- Chaudhary V, Singh Yadav J, Kumar Dutta R, "Impact of Nano-Silica and Cement on Geotechnical Properties of Bentonite Soil", *Indian geotechnical journal*, 2023, 24, 133889. <https://doi.org/10.1007/s40098-023-00816-2>
- Cheraghalikhani M, Niroumand H, Balachowski L, "Micro-and nano-bentonite to improve the strength

- <https://doi.org/10.1080/1064119X.2010.517715>
Nakhaei A, Marandi SM, Sani Kermani S, Bagheripour MH, "Dynamic Properties of Granular Soils Mixed with Granulated Rubber", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 43, 124-132. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.07.026>
- Negahdar A, Khoshdel Sangdeh M, Ghavidel A, "Evaluation of nano silica performance on biological stabilization of two types of sandy soils (Poorly Granulated and Silty)", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 52 (106), 203-215. <https://doi.org/10.22034/jcee.2020.11114>
- Niroumand H, Balachowski L, Parviz R, "Nano soil improvement technique using cement", *Scientific Reports*, 2023, 13, 10724. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37918-z>
- Pantazopoulos IA, Atmatzidis DK, "Dynamic Properties of Microfine Cement Grouted Sands", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 42, 17-31. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.05.017>
- Ramezaniapour AA, Kazemian A, Sarvari M, Ahmadi B, "Use of natural zeolite to produce self-consolidating concrete with low portland cement content and high durability", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012, 25 (5), 589-596. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000621](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000621)
- Saadati M, Derakhshandi M, Bahmanpour A, Ganjian N, "Experimental investigation of cyclic behavior of zeolite cemented sand", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 2022, 53 (12), 5441-5456. <https://doi.org/10.22060/ceej.2021.18843.6978>
- Scrivener KL, Nonat A, "Hydration of cementitious materials, present and future", *Cement and Concrete Research*, 2011, 41 (7), 651-665. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.026>
- Seed HB, Idriss IM, "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 1971, 97 (9), 1249-1273. <https://doi.org/10.1061/JSEFAQ.0001662>
- Smitha S, Rangaswamy K, "Effect of biopolymer treatment on pore pressure response and dynamic properties of silty sand", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32 (8). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003285](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003285)
- Tofighkhan M, Hashemidanesh N, Ameri M, "Investigating the resistance behavior of the clayey sand soil improved with nano-silica and carbon fibers", *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 2023, 7 (1), 23-32. <https://doi.org/10.22034/jcema.2023.171494>
- Yildiz M, Soganci AS, "Improvement of the strength of soils which comprises granular pumice by injection of cement under low pressure", *Scientia Iranica*, 2015, 22 (1), 81-91. https://scientiainanica.sharif.edu/article_1845_3c9ae2e658d920883e75708182a3b295.pdf
- <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101123>
Kramer SL, "Geotechnical earthquake engineering", Pearson Education India, 1996.
- Ladd RS, "Preparing test specimens using undercompaction", *Geotechnical Testing Journal*, 1978, 1 (1), 16-23. <https://doi.org/10.1520/GTJ10364J>
- Liu C, Zhang Q, Zhao C, Deng L, Fang, Q, "Assessment of strength development of soil stabilized with cement and nano SiO₂", *Construction and Building Materials*, 2023, 409, 133889. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133889>
- Lothenbach B, Scrivener K, Hooton RD, "Supplementary Cementitious Materials", *Cement and Concrete Research*, 2011, 41 (12), 1244-1256. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>
- Madhusudhan BR, Boominathan A, Banerjee S, "Cyclic Simple Shear Response of Sand-Rubber Tire Chip Mixtures", *International Journal of Geomechanics*, 2020, 20 (9), 04020136. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001761](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001761)
- Markou IN, Droudakis AI, "Factors affecting engineering properties of microfine cement grouted sands", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10706-013-9631-9>
- Mirnezhad F, Haddad A, Asakereh A, "Improving the creep properties of modified clay with nanosilica and polypropylene fibers (Case Study: Shahid Shahcheraghi Dam Central Borrow Pits)", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, 53 (113), 206-215. <https://doi.org/10.22034/jcee.2022.51808.2150>
- MolaAbasi H, Khajeh A, Jamshidi Chenari R, "Use of GMDH-type neural network to model the mechanical behavior of a cement-treated sand", *Neural Computing and Applications*, 2021, 33 (22), 15305-15318. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06562-x>
- MolaAbasi H, Kharazmi P, Khajeh A, Saberian M, Chenari RJ, Harandi M, Li J, "Low plasticity clay stabilized with cement and zeolite: An experimental and environmental impact study", *Resources Conservation and Recycling*, 2022, 184, 106408. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106408>
- Mola-Abasi H, Kordtabar B, Kordnaeij A, "Effect of Natural Zeolite and Cement Additive on the Strength of Sand", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2016a. <https://doi.org/10.1007/s10706-016-0060-4>
- Mola-Abasi H, Kordtabar B, Kordnaeij A, "Parameters controlling strength of zeolite-cement-sand mixture", *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2016b, 11 (1), 72-79. <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1186412>
- Mollamahmutoglu M, Yilmaz Y, "Engineering Properties of Medium-to-Fine Sands Injected with Microfine Cement Grout", *Marine Georesources and Geotechnology*, 2011, 29 (2), 95-109.