

Investigating the Effect of Clogging in a Granular Column on the Cyclic and Post-cyclic Behavior of Soft Ground Improved with it

Majid Yazdandoust^{1*}, Amin Bastami²

¹ Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran

² Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ABSTRACT: An attempt was made in the present study to evaluate the pre-and post-liquefaction behavior of the soft ground improved by granular columns (with and without a geogrid encasement) by simulating a loose soil mass reinforced with a granular column in a triaxial cell. For this purpose, a series of large-scale monotonic compressive tests and also stress-controlled cyclic triaxial tests followed by drained and undrained monotonic compression tests were carried out on the loose sand specimens including the granular column with and without geogrid encasement. The pre-cyclic behavior of specimens showed that the deformation modulus improvement due to the use of a stiffer encasement would be less noticeable in case of clogged granular columns. It was found that during a cyclic loading, the use of geogrid encasement will be effective in reducing cumulative settlements and mitigating the liquefaction potential when its tensile stiffness is large enough. Moreover, the post-cyclic behavior of specimens showed that the use of granular columns (whether encased or non-encased) decreased the dependence of the ground deformation modulus on the CSR changes so that the evaluation of the cyclic-induced ground deformation can be done completely independent of the cyclic loading magnitude. It was also found that the use of an encasement with appropriate stiffness played an important role in minimizing the loss of the strength of the ground stabilized by granular columns after experiencing cyclic loads, especially under large earthquakes and after the occurrence of possible liquefaction.

Review History:

Received: Mar. 20, 2023

Revised: Apr. 15, 2025

Accepted: Sep. 16, 2025

Available Online: Sep. 30, 2025

Keywords:

Granular Column

Geogrid Encasement

Triaxial Test

Pre-and Post-Cyclic Behavior

Liquefaction

1- Introduction

Installing granular columns (GCs) has been known as one of the cost-effective method for improving the bearing capacity of soft ground by creating a composite medium with considerable stiffness and mitigating the liquefaction by accelerating the dissipation of excess pore water pressure due to shortening the drainage path [1,2]. Occurrence of clogging in granular columns due to the entry of fine particles of soil into the column pores or growth of plants in their body and failure to provide required confining pressure by the loose soil around them are two factors that have always weakened their performance [3,4]. Badanagki et al. showed that the reduction in the drainage capacity of granular columns due to clogging can be so high that GCs can play no role in preventing liquefaction [5]. The idea of encasing granular columns with geosynthetics was proposed by Van Impe and Silence [6] for the first time to achieve the required confining pressure GCs. It was later proven that the use of geosynthetic encasement is also effective in reducing the possibility of clogging in granular columns [4].

Given the high probability of clogging in the granular columns, and consequently and resulting liquefaction in the

ground improved by them, it is necessary to investigate both their undrained cyclic behavior and their post-cyclic behavior. Hence, an experimental attempt was made in the current study to evaluate the cyclic and post-cyclic behavior of GCs with and without encasement considering clogging phenomenon. For this purpose, a single granular column interacting with the surrounding soft sand was simulated in a triaxial cell based on the unit cell concept. The simulated models were evaluated in two separate phases. At the first phase, the short- and long-term behavior of the GCs models was evaluated using undrained and drained monotonic compression tests. At the second phase, stress-controlled cyclic triaxial tests followed by undrained and drained monotonic compression tests were carried out on the GCs models to evaluate their short and long term behavior after occurrence of liquefaction. By selecting two different geogrids for encasing GCs, the effect of encasement stiffness was also investigated on the behavior of granular columns.

2- Triaxial tests

Based on the unit cell concept, a single granular column interacting with the surrounding soft sand was simulated in a

*Corresponding author's email: M.yazdandoust@Qom.ac.ir

triaxial cell. The granular column diameter was considered to be 100 mm in all specimens, indicating an area replacement ratio of 25% in an equilateral triangular arrangement. The ratio between the diameter considered for the granular column in the current study and the diameter of the columns in practice (~ 1.0 m) shows that a scaling factor of about 1:10 is established between the tests and the prototype.

Firuzkooh #D3 sand at a relative density of 70% sand and Firuzkooh #161 sand at a relative density of 30% were used to simulate the granular column and surrounding loose soil, respectively. These two types of sand were silica synthetic soil composed of angular particles with a specific gravity of 2.66. The particle sizes of coarse and fine sands ranged between 3.00 to 5.00 mm and 0.06 to 0.7 mm, respectively. These particle size ranges satisfy both the ratio between the particle size of the surrounding soil and the column material as well as the ratio between the particle size of the column material (d) and the column diameter (D). Muir Wood et al. recommended a d/D ratio range of 12 to 40 for granular columns [7].

Two biaxial geogrids with different tensile stiffnesses were selected for encasing granular columns to investigate the effect of encasement axial stiffness on the seismic performance of EGCs. The type I and II geogrids were equivalent to low and high stiffness geogrids in real-scale with the secant tensile stiffness of 729 and 3183 kN/m at 5% strain, respectively. The ratio of the grid opening size to the grain size of granular column (s/d) was considered as the second factor in the selection of the geogrids. Among all proposed criteria in this regard, $s < D_{60}$ was used as the most popular criterion, where s and D_{60} are the spacing between ribs of geogrid and the effective size of granular column particles.

Three different ground situations were simulated: 1) the loose ground (LG), 2) the loose ground improved by granular column (LG-GC), and 3) the loose ground improved by geogrid-encased granular column (LG-GEGC(I) and LG-GEGC(II)). Using the moist tamping procedure in controlled volume fashion, the loose ground was simulated in the triaxial specimen by compacting Firuzkooh #161 sand. For this purpose, the moist sand was tamped into the mold loosely in twenty layers with equal height of 20mm. The weight of each layer was chosen so that its relative density became 30% after reaching a thickness of 20 mm. In order to simulate the ground improved by granular column (LG-GC), the replacement technique was used for constructing the granular column in the simulated loose ground. Based on this technique, a thin seamless steel pipe (with inner diameter of 100 mm and 0.5 mm wall thickness) was pushed into the center of the simulated loose ground. Then the sand inside the pipe was scooped out using a helical auger of 96 mm diameter. In the last step, the formed borehole was filled with twenty layers of Firuzkooh #D3 sand at a relative density of 70%. The same procedure used for the construction of LG-GC was also followed to construct LG-GEGC(I) and LG-GEGC(II) with the difference that a tube-shaped geogrid was placed inside the pipe after scooping out the sand inside it and then the coarse sand was compacted.

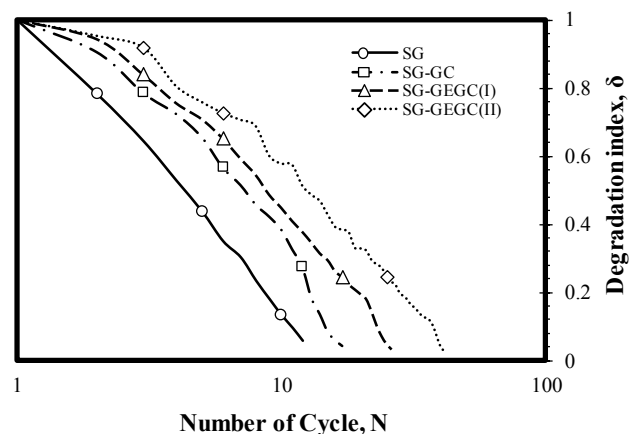


Fig. 1. Variation of degradation index versus number of loading cycles.

All the specimens were tested in two separate phases. In the first phase, the long- and short-term performance of the specimens under an effective confining pressure of $\sigma'_c = 100$ kPa were determined using drained and undrained monotonic loading tests, respectively, before applying any cyclic load. In the second phase, after applying a specific undrained cyclic loading to the specimens, they were subsequently subjected to the strain-controlled monotonic loading to investigate the post-cyclic behavior. Similarly, to the first phase, the drained monotonic compression tests were conducted to evaluate the long-term post-cyclic behavior and the undrained ones were performed for short-term evaluation.

3- Results and Discussion

The pre-cyclic behavior of specimens showed that the use of a granular column improved the deformation modulus by 17% in drained conditions, while encasing it by low and high stiffness geogrids led to 41% to 84% increase in E_{s1} %, respectively. In undrained conditions, this stiffness improvement was found to be 40% and 71% to 123% when using a granular column and encasing it, respectively. Also, a 73% increase in deformation modulus due to an increase in encasement stiffness in undrained conditions compared to an 105% increase in drained ones indicated that the deformation modulus improvement due to the use of a stiffer encasement would be less noticeable in case of clogging granular columns.

Regarding the dynamic behavior of the samples, the variation of the degradation index versus the number of loading cycles in Fig. 1 showed that the improvement of a soft ground with granular columns reduced its cumulative settlement during a consecutive loading and the use of geosynthetic encasement was effective in reducing cumulative settlements, particularly with high tensile stiffness. Moreover, the imperceptible difference between the cyclic-induced excess pore-water pressure in SG-GC and SG-GEGC (I) emphasized the inefficiency of low stiffness geogrid encasements to delay and mitigate liquefaction in granular columns with the possibility of clogging.

The post-cyclic behavior of specimens showed that the use of granular columns decreased the dependence of the ground deformation modulus on the CSR changes. This reduction, which was minimized using an encasement with suitable stiffness, means that the use of encased granular columns in a soft ground reduces the dependence of the ground deformation on the magnitude of seismic loading, and therefore the cyclic-induced ground deformation may be estimated independently of the seismic loading magnitude.

4- Conclusion

The main conclusions regarding triaxial tests can be summarized as follows:

- 1) It was found that the deformation modulus improvement due to the use of a stiffer encasement would be less noticeable in case of clogging granular columns.
- 2) The results emphasized the inefficiency of low stiffness geogrid encasements to delay and mitigate liquefaction in granular columns with the possibility of clogging.
- 3) The post-cyclic behavior of specimens showed that the use of granular columns decreased the dependence of the ground deformation modulus on the CSR changes. This reduction, which was minimized using an encasement with suitable stiffness, means that the use of encased granular columns in a soft ground reduces the dependence of the ground deformation on the magnitude of seismic loading, and therefore the cyclic-induced ground deformation may be estimated independently of the seismic loading magnitude.
- 4) The improvement of a soft ground with encased granular columns not only decreased the liquefaction-induced ground deformation, but also significantly reduced the effect of earthquake magnitude on the ground deformation.

References

- [1] A.R. Ghanizadeh, A. Ghanizadeh, P.G. Asteris, P. Fakharian, D.J. Armaghani. "Developing bearing capacity model for geogrid-reinforced stone columns improved soft clay utilizing MARS-EBS hybrid method." *Transportation Geotechnics* 38(2023): 100906.
- [2] E. Aghili, I. Hosseinpour, R.J. Chenari, H. Ahmadi. "Behavior of granular column-improved clay under cyclic shear loading." *Transportation Geotechnics* 31(2021): 100654.
- [3] M. Ghazavi, J.N. Afshar. "Bearing capacity of geosynthetic encased stone columns." *Geotextiles and Geomembranes* 38(2013): 26-36.
- [4] S. Pal, K. Deb. "Filtration performance of geotextile encasement to minimize the clogging of stone column during soil liquefaction." *Geotextiles and Geomembranes* 49(3) (2021): 771-788.
- [5] M. Badanagki, S. Dashti, P. Kirkwood. "Influence of Dense Granular Columns on the Performance of Level and Gently Sloping Liquefiable Sites." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 144(9) (2018): 04018065.
- [6] W. Van Impe, P. Silence. "Improving of the bearing capacity of weak hydraulic fills by means of geotextiles." In *Proceedings of the 3rd international conference on geotextiles*, Vienna, Austria (1986) pp. 1411-1416.
- [7] D. Muir Wood, W. Hu, D.F.T. Nash. "Group effects in stone column foundations: model tests." *Geotechnique* 50(6) (2000): 689-698.



بررسی تأثیر وقوع پدیدهٔ انسداد در ستون دانه‌ای بر رفتار سیکلیک و فرا سیکلیک زمین بهسازی شده با آن

مجید یزدان دوست^{۱*}، امین بسطامی^۲

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

۲- دانشکده عمران، هنر و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی- واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۹

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸

کلمات کلیدی:

ستون دانه‌ای

روکش ژئوگریدی

آزمایش سه محوری

رفتار سیکلیک و فرا سیکلیک

روانگرایی

خلاصه: در مطالعه حاضر تلاش شد تا با شبیه سازی یک توده خاک سست مسلح شده با ستون دانه‌ای (با و بدون روکش ژئوگریدی) در سلول دستگاه سه محوری، تأثیر وقوع پدیدهٔ انسداد در ستون‌های دانه‌ای بر رفتار زمین بهسازی شده با آن قبل و پس از تجربه بار سیکلیک مورد ارزیابی قرار گیرد. برای این منظور، از آزمایشات زهکشی نشده جهت شبیه سازی پدیدهٔ انسداد در ستون‌های دانه‌ای و آزمایشات مونوتونیک و سیکلیک-مونوتونیک برای شبیه سازی رفتار زمین قبل و پس از تجربه بار سیکلیک استفاده شد. رفتار نمونه‌ها قبل از تجربه بار سیکلیک و افزایش ۷۳ درصدی مدول تغییر شکل به دلیل افزایش سختی روکش در شرایط کوتاه مدت در مقایسه با افزایش ۱۰۵ درصدی در شرایط بلند مدت نشان داد که بهبود مدول تغییر شکل به دلیل استفاده از روکش سخت‌تر در صورت انسداد ستون‌های دانه‌ای و کاهش ظرفیت زهکشی آن‌ها کمتر از حد انتظار خواهد بود. همچنین مشخص شد که در خلال تجربه بار سیکلیک، هنگامی استفاده از روکش ژئوستنتیکی در کاهش نشست‌های تجمعی و کاهش پتانسیل روانگرایی مؤثر خواهد بود که سختی کششی آن به اندازه کافی بزرگ باشد. از سوی دیگر، رفتار نمونه‌ها پس از تجربه بار سیکلیک نشان داد که استفاده از ستون‌های دانه‌ای با روکش ژئوستنتیکی سخت می‌تواند وابستگی مدول تغییر شکل زمین به تغییرات دامنهٔ بارگذاری سیکلیک را به حدی کاهش دهد که ارزیابی تغییر شکل زمین ناشی از بارهای سیکلیک بتواند مستقل از دامنهٔ بارگذاری انجام شود. همچنین مشخص شد که استفاده از روکش ژئوگریدی با سختی مناسب پیرامون ستون‌های دانه‌ای نقش چشمگیری در ممانعت از افت مقاومت زمین مسلح شده با ستون‌های دانه‌ای پس از تجربه بارهای سیکلیک ایفا می‌کند، به ویژه هنگام تجربهٔ بارهای بزرگ و همچنین پس از وقوع روانگرایی احتمالی.

۱- مقدمه

امروزه مجموعه‌ای از روش‌ها جهت بهسازی زمین‌های سست مورد استفاده قرار می‌گیرد که ستون‌های دانه‌ای^۱ به عنوان یکی از کارآمدترین و مقرون به صرفه ترین این روش‌ها شناخته می‌شود. این روش مبتنی بر تعویض ۱۵ الی ۳۵ درصد حجم خاک نامرغوب بوسیله حفر چاه‌هایی با قطر، عمق و فاصله معین از یکدیگر و پرکردن آنها بوسیله ماسه یا شن و متراکم نمودن بصورت ستون‌های عمودی می باشد [۱]. در این روش، از طرفی بهبود ظرفیت باربری با ایجاد یک محیط مرکب با سختی قابل ملاحظه حاصل می‌شود [۲-۵] و از سوی دیگر پتانسیل روانگرایی با سرعت بخشیدن به فرآیند اتلاف اضافه فشار آب حفره‌ای به دلیل کوتاه شدن

مسیر زهکشی کاهش می‌یابد [۶-۸]. علیرغم تأیید این روش توسط محققین مختلف، وجود برخی نواقص می‌تواند کارایی آن را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. عدم دستیابی به مقاومت برشی و سختی مناسب ستون‌های دانه‌ای به دلیل عدم وجود فشار محصورکننده کافی توسط خاک نرم اطراف آن [۹-۱۰] و افت ظرفیت زهکشی ستونهای دانه‌ای به دلیل ورود ذرات ریز خاک به منافذ ستون در هنگام نصب یا رشد گیاهان در بدنهٔ آن [۱ و ۱۱-۱۳] دو نقص اصلی می‌باشند که باعث کاهش کارایی ستون‌های دانه‌ای در بهبود ظرفیت باربری و کاهش پتانسیل روانگرایی می‌شوند. کاهش ظرفیت زهکشی ستون‌های دانه‌ای به دلیل گرفتگی و انسداد می‌تواند آن قدر زیاد باشد که نتواند نقشی در جلوگیری از روانگرایی ایفا کند [۱۴-۱۶]. مطالعات ژئو و همکاران در این زمینه نشان داد که انسداد ستون‌های دانه‌ای در طول

1. Granular column

2. Zhou

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: M.yazdandoust@qom.ac.ir



مشابهی که در مطالعات آزمایشگاهی سنگیز و گولر^۸ مشاهده گردید نشان داد که ویژگی‌های مکانیکی روکش نقش چشمگیری بر رفتار ستون‌های دانه‌ای روکش‌دار واقع در خاک رس در شرایط لرزه‌ای ایفا می‌کند [۲۳]. همچنین مشاهده شد که دامنه شتاب و فرکانس بارگذاری دو عامل مؤثر بر پاسخ ستون‌های دانه‌ای روکش‌دار هستند و مقدار مدول برشی سکانتی با افزایش فرکانس بارگذاری افزایش می‌یابد [۲۴]. سنگیز و گولر با بارگذاری ستون‌های دانه‌ای روکش‌دار به صورت عمودی در خلال یک زلزله نشان دادند که افزایش سختی روکش باعث جذب بیشتر فشار سربار می‌شود. این پدیده ممکن است عملکرد ستون‌های دانه‌ای را به خطر بیندازد [۲۵]. در شرایط بارگذاری تناوبی بر روی ستون‌های دانه‌ای روکش‌دار نیز مشخص شد که مزیت کلی روکش برای عملکرد ستون‌های دانه‌ای تحت بارگذاری سیکلی بیشتر از بارگذاری استاتیکی است و همچنین درجه انتقال بار به ستون هنگام قرار گرفتن در معرض بارگذاری سیکلی نسبت به بارگذاری استاتیکی کوچکتر می‌شود و منجر به کاهش ۲۵ درصدی نسبت تمرکز تنش می‌گردد [۲۶]. با استفاده از یک مدل ریاضی پال و دب نشان دادند که ستون دانه‌ای روکش‌دار، اضافه فشار حفره‌ای را با سرعت بیشتری در مقایسه با ستون بدون روکش زائل می‌کند. آنها همچنین نشان دادند که استفاده از ژئوتکستایل‌هایی با حداکثر اندازه چشمه بین D_5 تا D_{10} به عنوان روکش ستون، می‌تواند از انسداد ستون به طور کامل جلوگیری نماید [۱۳].

همانطور که مشاهدات میدانی نشان داده‌است، ظرفیت زهکشی ستون دانه‌ای زمانی که دچار انسداد می‌شوند بقدری کاهش می‌یابد که ستون و محیط اطراف آن در خلال بارگذاری‌هایی با سرعت‌های بالا (مانند بارهای دینامیکی)، شرایط زهکشی نشده‌ای را تجربه می‌کنند که این امر می‌تواند منجر به وقوع روانگرایی گردد [۱]. اما از آنجا که ظرفیت زهکشی ستون‌های دانه‌ای هیچگاه بطور کامل از بین نمی‌رود، اضافه فشار آب حفره‌ای بوجود آمده در محیط پس از گذشت مدت زمانی از تجربه بار دینامیکی زائل شده و شرایط زهکشی شده در محیط برقرار می‌گردد. این بدان معناست که انسداد در ستون‌های دانه‌ای سبب می‌شود ستون و محیط اطراف آن شرایط متفاوتی را در طول زمان بهره‌برداری تجربه نمایند که عموماً در پروسه طراحی لحاظ نمی‌گردد. این موضوع که سبب پیچیده شدن رفتار ستون‌های دانه‌ای مسدود می‌گردد تاکنون در هیچ مطالعه‌ای مورد بررسی قرار نگرفته و اکثر مطالعات انجام شده بر روی ستون‌های دانه‌ای پیرامون بررسی نقش آن در افزایش ظرفیت باربری و کاهش پتانسیل روانگرایی در غیاب پدیده انسداد

روانگرایی نیز رخ می‌دهد. آن‌ها گزارش نمودند که این نوع گرفتگی که در عمق کم رخ می‌دهد، عملکرد زهکشی کل ستون را مختل می‌سازد [۸]. برای اولین بار وان ایمپه و سایلنس^۱ ایده استفاده از ژئوستنتیک‌ها را به عنوان روکش جهت تأمین فشار محصورکننده مورد نیاز برای دستیابی به مقاومت برشی و سختی مناسب ستون‌های دانه‌ای در خاک‌های نرم و سست ارائه نمودند [۱۷]. بعدها پال و دب^۲ ثابت کردند که استفاده از روکش ژئوستنتیک در کاهش احتمال گرفتگی ستون دانه‌ای نیز مؤثر است [۱۳]. از این رو، حجم قابل توجهی از تحقیق‌ها در دو دهه اخیر جهت بررسی عملکرد ستون‌های دانه‌ای روکش‌دار در شرایط مختلف انجام شده است. وو^۳ و همکاران با انجام یک سری آزمایش‌های سه محوری بر روی ستون‌های دانه‌ای با روکش ژئوتکستایل نشان دادند که با افزایش کرنش محوری، چسبندگی ظاهری بسیج شده در آن‌ها به طور خطی افزایش می‌یابد که این افزایش در ژئوتکستایل‌هایی با استحکام کششی بالاتر، برجسته‌تر می‌شود. همچنین، کاهش قابل توجهی در کرنش‌های شعاعی و افزایش تنش‌های انحرافی در نمونه‌های روکش‌دار مشاهده شد [۱۸]. تأثیر بار قائم سیکلیک بر رفتار ستون‌های دانه‌ای روکش‌دار توسط کومار^۴ و کومار مورد ارزیابی قرار گرفت و مشاهده شد که استفاده از روکش ژئوستنتیکی دولا به بجای یک لایه، ۵/۸ تا ۱۱/۲ درصد بیشتر نشستهای قائم را کاهش می‌دهد [۱۹]. در مطالعه‌ای مشابه توسط گو^۵ و همکاران مشاهده شد که امکان شکلگیری اضافه فشار آب حفره‌ای در ستون‌های دانه‌ای روکش‌دار حین تجربه بار سیکلیک بطور بالقوه وجود دارد و میزان آن با فرکانس بارگذاری رابطه مستقیم دارد بطوریکه با افزایش فرکانس بارگذاری از ۱ به ۵ هرتز، میتوان شاهد یک افزایش ۱۴۲۰ درصدی در اضافه فشار آب حفره‌ای بود [۲۰]. در مطالعه‌ای دیگر، سو^۶ و همکاران نشان دادند که روکش با طول کامل و سختی بالا به طور قابل توجهی ظرفیت باربری ستون‌های دانه‌ای را بهبود می‌بخشد [۲۱]. از سوی دیگر، مطالعات عددی تانگ^۷ بر روی بسترهای ماسه‌ای روانگرا نشان داد که تأثیر پارامترهای مکانیکی و فیزیکی ژئوستنتیک‌ها بر کاهش پتانسیل روانگرایی ستون‌های دانه‌ای با روکش ژئوستنتیکی بسیار برجسته تر از پارامترهای هندسی ستون است [۲۲]. نتایج

1. Van Impe and Silence
2. Pal and Deb
3. Wu
4. Kumar
5. Gu
6. Xu
7. Tang

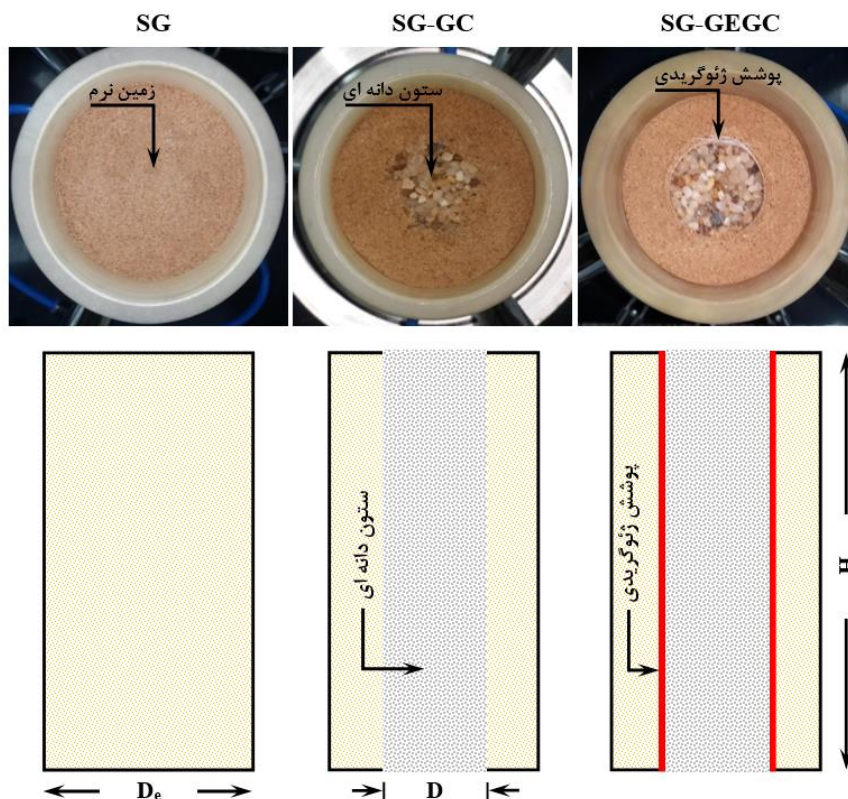
۲- شبیه‌سازی ستون دانه‌ای و آماده سازی نمونه‌ها

مفهوم سلول واحد جهت ساده‌سازی تجزیه و تحلیل گروه ستون دانه‌ای پیشنهاد شده است [۲۹]. بر اساس این مفهوم، یک ستون دانه‌ای و ناحیه تأثیرپذیر اطراف آن در یک سلول استوانه‌ای با قطر معادل (D_e) به عنوان نماینده گروه ستون جهت تجزیه و تحلیل در نظر گرفته می‌شود. قطر معادل سلول واحد به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۳۰]:

$$D_e = S \frac{\alpha^{0.25}}{\pi^2} \quad (1)$$

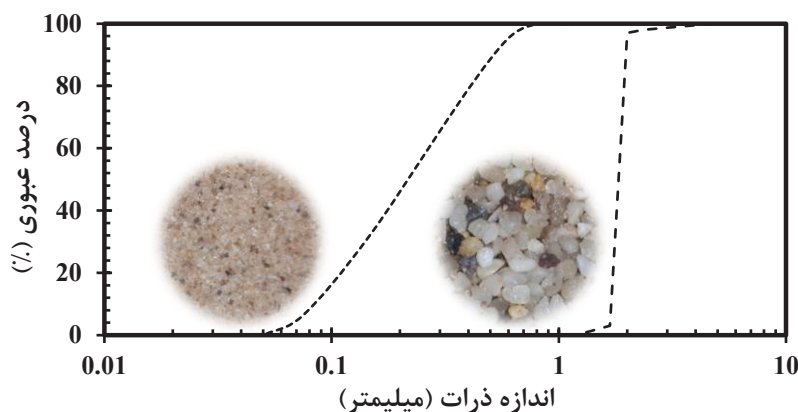
که در آن S فاصله بین ستونها و α یک پارامتر ثابت است که مقدار آن به آرایش ستون بستگی دارد. برای چیدمان مثلثی، $\alpha = 1.2$ و برای چیدمان مربعی $\alpha = 1.6$ استفاده می‌شود. دقت مناسب مفهوم سلول واحد در شبیه‌سازی ستون دانه‌ای سبب شده است که مبنای بسیاری از مطالعات و نیز مطالعه حاضر قرار گیرد. از این رو، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، ستون دانه‌ای و ناحیه تأثیرپذیر اطراف آن در یک نمونه استوانه‌ای به

بوده است. از این رو، در مطالعه حاضر تلاش شد تا با شبیه سازی یک زمین سست مسلح شده با ستون دانه‌ای (با و بدون روکش ژئوگریدی) در سلول سه محوری بر اساس مفهوم سلول واحد [۲۷ و ۲۸]، تأثیر پدیده انسداد ستون بر رفتار زمینهای مسلح شده با ستونهای دانه‌ای قبل، حین و پس از تجربه بار سیکلیک مورد ارزیابی قرار گیرد. برای این منظور آزمایشات در دو فاز مجزا انجام شد. در فاز نخست، با استفاده از بارگذاری مونوتونیک بصورت کنترل کرنش در شرایط زهکشی نشده و زهکشی شده، بترتیب رفتار کوتاه مدت و بلند مدت ستون دانه‌ای مسدود مورد ارزیابی قرار گرفت. در فاز دوم، رفتار سیکلیک و فرا سیکلیک کوتاه مدت ستون دانه‌ای مسدود با استفاده از بارگذاری سیکلیک بصورت کنترل تنش و بلافاصله بارگذاری مونوتونیک بصورت کنترل کرنش در شرایط زهکشی نشده مورد بررسی قرار گرفت. جهت ارزیابی رفتار فرا سیکلیک بلند مدت ستون دانه‌ای مسدود در این فاز، از بارگذاری سیکلیک و بلافاصله بارگذاری مونوتونیک در شرایط زهکشی شده استفاده شد. با انتخاب دو ژئوگرید مختلف برای پوشاندن ستونهای دانه‌ای، تأثیر سختی روکش بر رفتار ستونهای دانه‌ای نیز مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۱. نمایی شماتیک از مدل‌ها

Fig. 1. Schematic view of the models



شکل ۲. منحنی دانه بندی مصالح مورد استفاده

Fig. 2. The grain size distribution of the materials used

است. از اینرو، دو نوع ژئوگرید با سختی‌های کششی متفاوت برای روکش ستون‌های دانه‌ای انتخاب شد تا تأثیر سختی کششی روکش بر عملکرد لرزه‌ای ستون‌های دانه‌ای روکش‌دار بررسی شود. بر اساس آزمایشات کششی انجام شده بر روی این دو نوع ژئوگرید و با توجه به قوانین مقیاس پیشنهادی برای سختی کششی ($J_{\text{Prototype}} = M \times J_{\text{Model}}$, $M=10$)، ژئوگریدهای انتخاب شده معادل ژئوگریدهایی با سختی ۷۲۹ و ۳۱۸۳ کیلونیوتن بر متر در مقیاس واقعی می‌باشند. علاوه بر سختی کششی، نسبت اندازه چشمه ژئوگرید به سایز ذرات ستون عامل مهم دیگری است که باید در انتخاب ژئوگرید به عنوان روکش در نظر گرفته شود. معیارهای مختلفی در این زمینه توصیه شده است که $S < D$ یکی از متداولترین معیارها است (که در آن S فاصله بین نوارهای ژئوگرید و D اندازه مؤثر ذرات ستون دانه‌ای است). این معیار که در بسیاری از تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته است [۳۷-۳۸]، در مطالعه حاضر نیز استفاده شد. پارامترهای فیزیکی و مکانیکی ژئوگریدهای مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

به منظور دستیابی به اهداف این تحقیق، سه وضعیت مختلف در سلول واحد شبیه سازی شد که در شکل ۱ نشان داده شده است. این سه وضعیت شامل: (۱) زمین سست (SG)، (۲) زمین سست بهسازی شده با ستون دانه‌ای (SG-GC) و (۳) زمین سست بهسازی شده با ستون دانه‌ای روکشدار ((SG-GEGC(I) و SG-GEGC(II)).

نمونه‌های SG با استفاده از روش کوبش مرطوب و کنترل حجم در قالب سه محوری با تراکم نسبی ۳۰٪ شبیه‌سازی شدند. در این روش، ارتفاع قالب به ۲۰ لایه ۲ سانتیمتری تقسیم و وزن ماسه ۱۶۱ لازم برای هر لایه

قطر ۲۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۴۰۰ میلی‌متر شبیه‌سازی شد. قطر ستون دانه‌ای (D) در تمامی آزمایش‌ها ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد که نشان دهنده نسبت جایگزینی مساحت (rA) برابر ۲۵٪ در آرایش مثلثی متساوی الاضلاع است. این نسبت بر اساس توصیه‌های ارائه شده در خصوص ناکارآمدی A_p های کمتر از ۱۰٪ و غیر اقتصادی بودن A_p های بیشتر از ۳۵٪ انتخاب شد [۲۹]. با توجه به قطر در نظر گرفته شده برای ستون دانه‌ای در مطالعه حاضر و قطر متداول مورد استفاده که حدود ۱ متر می‌باشد، ضریب مقیاس ۱:۱۰ بین نمونه آزمایشگاهی و نمونه اصلی ایجاد می‌شود.

به منظور شبیه‌سازی ستون دانه‌ای و زمین پیرامون آن، به ترتیب از ماسه D_{10} و ۱۶۱ فیروزکوه استفاده شد که به عنوان ماسه‌های استاندارد در مراکز تحقیقاتی ژئوتکنیکی ایران شناخته می‌شوند. انتخاب ماسه D_{10} با قطر متوسط ۲ میلی‌متر جهت ارضاء نسبت توصیه شده بین قطر مصالح ستون به قطر ستون صورت گرفت. این نسبت قطر ستون به قطر مصالح آن بین ۱۲ تا ۴۰ توصیه شده است [۳۱]. از آنجا که ستون‌های دانه‌ای در زمین‌های سست اجرا می‌شوند، تراکم نسبی خاک پیرامون ستون دانه‌ای در محدوده خاک سست و برابر به ۳۰٪ انتخاب شد. همچنین بر اساس توصیه‌های ارائه شده توسط دستورالعمل‌های طراحی، تراکم نسبی ۷۰ درصد برای ساخت ستون دانه‌ای در نظر گرفته شده است [۲۹]. توزیع اندازه ذرات هر دو نوع ماسه در شکل ۲ ارائه شده است.

اگر چه مطالعات نشان می‌دهد که سختی کششی روکش نقش مؤثری در رفتار ستون‌های دانه‌ای تحت بارگذاری استاتیکی دارد [۳۲-۳۶]، اما هنوز شناخت جامعی از این نقش در خلال بارگذاری تناوبی حاصل نشده

جدول ۱. پارامترهای فیزیکی و مکانیکی ژئوگریدهای مورد استفاده به عنوان روکش

Table 1. Properties of geogrids used as encasement

ویژگی‌های شاخص	ژئوگرید نوع ۱	ژئوگرید نوع ۲
جنس مصالح	پلی پروپیلن	پلی استر
ضخامت (میلی متر)	۰/۵	۰/۲
وزن در واحد سطح (کیلوگرم/مترمربع)	۰/۷۱۵	۰/۵۵۰
ابعاد چشمه (میلی متر) $S_t \times S_l$	۱/۶×۱/۶	۰/۶×۰/۶
کش‌آمدگی محوری در بار کششی نهایی (درصد) ϵ_u	۱۰/۰۵	۷/۳۲
بار کششی نهایی در واحد عرض (کیلونیوتن/متر) T_u	۴/۳	۱۹/۱
سختی کششی سکانتی در کرنش ۰/۵٪ (کیلونیوتن/متر) J	۷۲/۹	۳۱۸/۳

لازم به ذکر است که مقاومت اتصال در هر دو نوع روش باید برابر با مقاومت ژئوگرید پایه باشد. بنابراین با مقایسه مقاومت کششی هر دو نوع اتصال با ژئوگریدهای انتخاب شده (اشکال ۳-ب و ۳-ج)، چسب برای اتصال لبه‌های ژئوگرید به یکدیگر انتخاب شد. هر دو نوع ژئوگرید استوانه‌ای شکل در شکل ۳-ه نشان داده شده است.

۳- فرایند انجام آزمایش

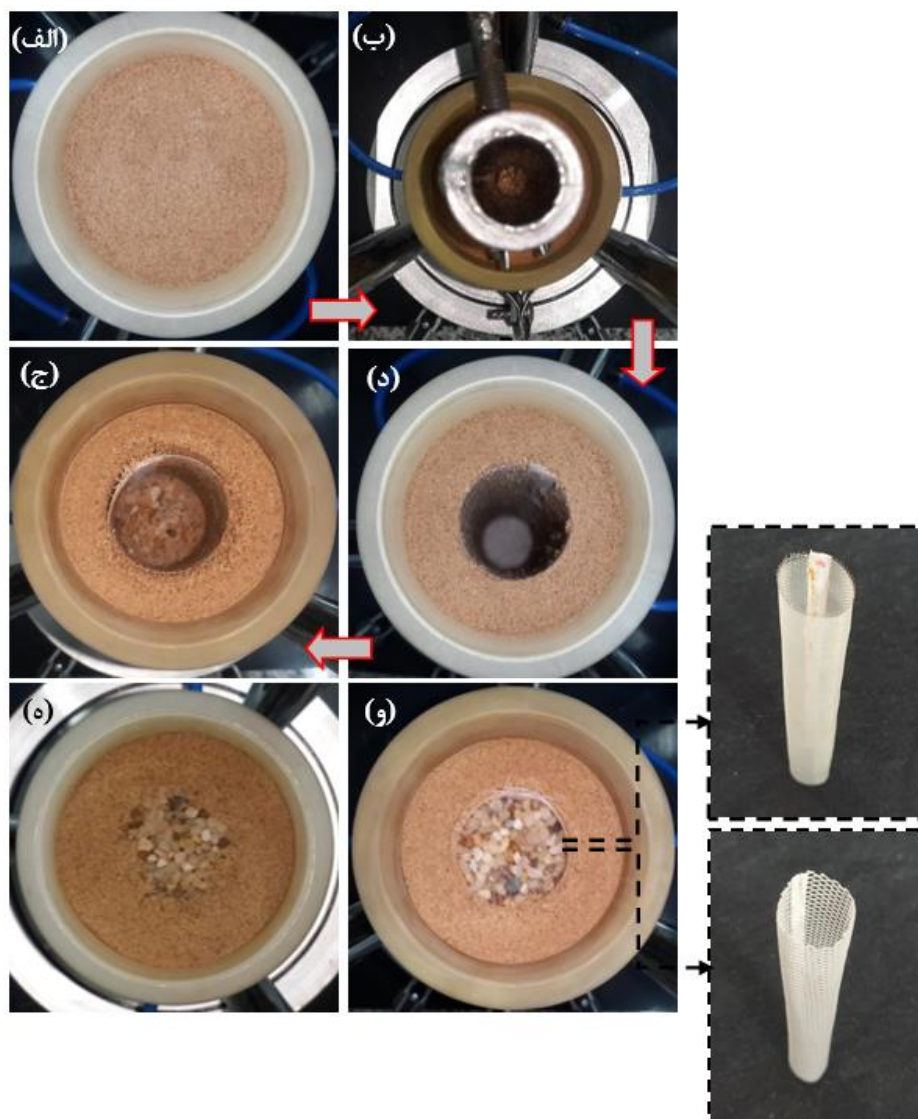
در مطالعه حاضر از دستگاه سه محوری دینامیکی در دو فاز مجزا استفاده شد. در هر فاز، با ایجاد شرایط زهکشی نشده و زهکشی شده، بترتیب رفتار کوتاه مدت و بلند مدت ستون دانه‌ای مسدود شده مورد بررسی قرار گرفت. در فاز اول، با انجام آزمایشات مونوتونیک بر روی نمونه‌ها، به بررسی عملکرد استاتیکی نمونه‌ها پرداخته شد. در این فاز، پس از تکمیل فرایند اشباع سازی، نمونه‌ها به صورت همسانگرد تحت فشار محصورکننده ۱۰۰ کیلوپاسکال که تقریباً معادل فشار محصورکننده در محدوده زون روانگرایی یک ستون واقعی است تحکیم شدند. لازم به ذکر است که پس از اتمام فرایند تحکیم، تراکم نسبی نمونه‌ها با رشد حدود ۲۵ درصدی همراه بود. در ادامه، نمونه‌ها تحت بارگذاری مونوتونیک به روش کنترل کرنش^۲ با نرخ کرنش محوری ۱٪ در دقیقه قرار گرفتند. بارگذاری در این مرحله تا کرنش محوری ۲۰ درصد ادامه یافت اما برای نمونه‌هایی که در آن‌ها حالت پایدار^۳ با کرنش محوری ۲۰٪ رخ نداده است، مقاومت در کرنش ۲۵٪ به عنوان مقاومت حالت نهایی در نظر گرفته شد. در فاز دوم، رفتار سیکلیک و فراسیکلیک ستون دانه‌ای مسدود

جهت رسیدن به تراکم نسبی ۳۰٪ محاسبه شد. سپس خاک لازم برای لایه تا رسیدن به ضخامت ۲ سانتیمتر متراکم شد. جهت تراکم مناسبتر لایه‌ها، از رطوبت ۶٪ استفاده شد. جهت ساخت نمونه‌های SG-GC و نصب ستون دانه‌ای از تکنیک جایگزینی استفاده شد. این روش می‌تواند ستون‌های دانه‌ای با یکنواختی مناسبتری نسبت به سایر روش‌ها در مدل‌های کوچک مقیاس ایجاد کند [۷]. برای این منظور، پس از شبیه‌سازی زمین سست در قالب سه محوری (شکل ۳-الف)، ابتدا یک لوله فولادی با جداره بسیار نازک با استفاده از سیستم بارگذاری دستگاه سه محوری به مرکز آن رانده شد (شکل ۳-ب). سپس مصالح داخل لوله فلزی با استفاده از یک مته ماریچ^۱ به قطر ۹۶ میلی‌متر خارج و گمانه تشکیل شده با ماسه D_{50} در ۲۰ لایه به ضخامت ۲ سانتیمتر و تراکم نسبی ۷۰٪^۲ پر گردید (اشکال ۳-ج و ۳-د). تراکم مصالح ستون دانه‌ای بر اساس روش کوبش و کنترل حجم با استفاده از یک کوبه با قطر ۹۶ میلی‌متر و وزن ۰/۰۴ کیلو نیوتن صورت گرفت. جهت تراکم هر لایه ستون، ابتدا لوله فلزی به میزان ۲ سانتیمتر از داخل خاک بیرون کشیده میشد و سپس فرایند کوبش اجرا می‌گردید. مدلهای حاوی ستون‌های دانه‌ای روکش‌دار نیز همانند مدلهای حاوی ستون‌های دانه‌ای آماده شدند با این تفاوت که پس از برداشتن ماسه داخل لوله، ژئوگرید استوانه‌ای شکل در داخل لوله قرار می‌گرفت و سپس مصالح ستون متراکم می‌گردید. برای ساخت ژئوگرید استوانه‌ای شکل، یک اتصال طولی برای اتصال لبه‌های دو طرف ژئوگرید لازم است که این اتصال یا با دوختن لبه‌های ژئوگرید [۳۹] یا چسباندن آن‌ها به یکدیگر [۴۰ و ۴۱] ایجاد می‌شود.

1. Helical auger

2. strain-controlled

3. steady state



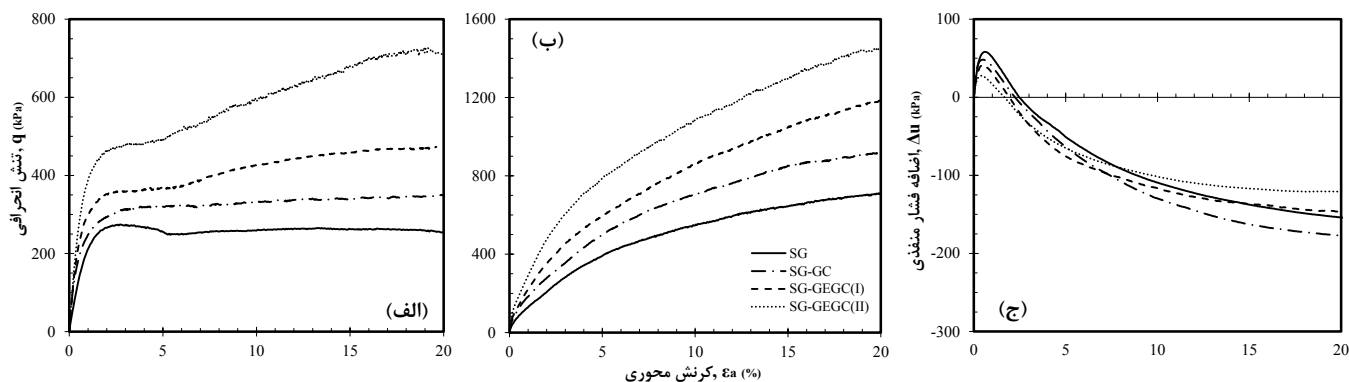
شکل ۳. مراحل ساخت نمونه‌ها

Fig. 3. Preparation process of the samples

در این فاز با استفاده از یک بار سینوسی متناوب به فرم کنترل تنش^۱ و با فرکانس ۱ هرتز قرار انجام شد. بمنظور آنکه میزان انسداد ستون نیز به عنوان یک فاکتور مجزا شبیه سازی و بررسی گردد، بارگذاری تا رسیدن به دو نسبت فشار آب حفره‌ای معین (I_{II}) ادامه یافت. مقادیر این نسبت که در رابطه (۲) تعریف شده است، برابر ۰/۷ و ۱/۰ جهت شبیه سازی انسداد موضعی و انسداد کامل انتخاب شد [۱۶]. در این رابطه، $u_c \Delta$ و σ'_c به ترتیب اضافه فشار آب حفره‌ای سیکلیک و تنش انحرافی سیکلیک می باشد.

1. stress-controlled

مورد بررسی قرار گرفت بدین صورت که پس از اعمال یک بار سیکلیک در شرایط زهکشی نشده، نمونه‌ها تحت بارگذاری مونوتونیک مشابه فاز اول قرار گرفتند. مشابه فاز اول، بارگذاری مونوتونیک در شرایط زهکشی نشده و زهکشی شده به ترتیب جهت ارزیابی رفتار کوتاه‌مدت و بلند مدت پس از بارگذاری سیکلی انجام شد. در فرایند بارگذاری مونوتونیک در شرایط زهکشی شده در این فاز، با باز نمودن شیرهای زهکشی یک پروسه تحکیم مجدد پس از بارگذاری سیکلی صورت گرفت در حالیکه بارگذاری مونوتونیک در شرایط زهکشی نشده بدون این پروسه انجام شد. بارگذاری سیکلیک



شکل ۴. منحنی تنش-کرنش نمونه‌ها پیش از تجربه بار تناوبی (الف) در شرایط زهکشی شده (ب) در شرایط زهکشی نشده و (ج) تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در مقابل کرنش محوری در شرایط زهکشی نشده

Fig. 4. Results of pre-cyclic monotonic tests: (a) deviator stress vs. axial strain in drained conditions; (b) deviator stress vs. axial strain in undrained conditions; (c) excess pore pressure vs. axial strain in undrained conditions.

این تغییر رفتار با پوشاندن ستون دانه‌ای ادامه می‌باید بطوریکه زمین سُست بهسازی شده با ستون روکشدار نوع ۱ (SG-GEGC(I))، یک رفتار بلند مدت سخت‌شونده^۵ را تجربه میکند. میزان این سخت‌شوندگی که در رفتار کوتاه مدت نیز مشاهده شد، با افزایش سختی روکش بیشتر می‌شود. این پدیده را می‌توان به سهم روکش ژئوگریدی در تأمین فشار محصورکننده ستون دانه‌ای نسبت داد. همانطور که در اشکال ۴-الف و ۴-ب مشاهده می‌شود، روند رشد تنش انحرافی با افزایش سطح کرنش کم‌رنگ‌تر می‌شود و رشد تنش انحرافی با شیب ملایم‌تری دنبال می‌شود. تداوم رشد تنش انحرافی در سطوح بالای کرنش، حتی با شیب ملایم‌تر، به این معنی است که اگرچه اثر روکش در کرنش‌های کوچک ($\epsilon_a > 1\%$) نیز مشاهده می‌شود، اما اثر اصلی آن در سطوح کرنش بالاتر برجسته‌تر می‌شود. این موضوع که توسط وو و هونگ نیز گزارش شده است به این معناست که نشست‌های چشمگیری جهت استفاده حداکثری از ظرفیت روکش‌های ژئوستستیکی در بهسازی زمین‌های سُست مورد نیاز است که ممکن است بیش از مقادیر نشست‌های مجاز باشد [۱۸].

بمنظور مشخص نمودن تأثیر استفاده از ستون‌های دانه‌ای و روکش آن‌ها بر بهبود سختی زمین سُست، از یک پارامتر بی‌بعد در هر دو شرایط زهکشی شده و زهکشی نشده استفاده شد. این پارامتر که ضریب بهبود سختی (I_s) نامیده می‌شود مطابق رابطه (۳) تعریف می‌گردد:

$$r_u = \frac{\Delta u_c}{\sigma'_c} \quad (2)$$

از سوی دیگر، با انتخاب سه نسبت تنش تناوبی^۱ مختلف (۰/۳۵۵ و ۰/۱۵۵ و ۰/۰۵۵)، سعی شد اثر تنش انحرافی^۲ نیز ارزیابی شود.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- رفتار نمونه‌ها پیش از تجربه بار سیکلیک

در این بخش رفتار بلندمدت و کوتاه‌مدت نمونه‌ها پیش از بارگذاری سیکلیک از منظر رفتار تنش-کرنش، ایجاد فشار آب حفره‌ای و همچنین مسیرهای تنش مؤثر ارزیابی می‌شود. نمودارهای تنش انحرافی (q) در مقابل کرنش محوری (ϵ_a) برای آزمایش‌های زهکشی شده و زهکشی نشده به ترتیب در اشکال ۴-الف و ۴-ب ارائه شده است.

نمودارهای q- ϵ_a در هر دو وضعیت زهکشی شده و زهکشی نشده به وضوح تأثیر استفاده از ستون دانه‌ای با و بدون روکش را بر رفتار بلند مدت و کوتاه مدت یک زمین سُست نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، رفتار بلند مدت زمین سُست یک رفتار نرم شونده^۳ می‌باشد در حالی که استفاده از ستون دانه‌ای منجر به تغییر رفتار به پلاستیک کامل^۴ می‌شود.

1. cyclic stress ratio
2. deviator stress
3. strain-softening
4. perfect plastic

5. strain-hardening

منفی تولید شده نیز با کاهش مواجه شود. این کاهش با افزایش سختی روکش در (SG-GEGC(II) به حداقل رسید. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری نمود که استفاده از یک روکش با سختی بالا می‌تواند تمایل ستون‌های دانه‌ای جهت اتساع را به یک فشار محصورکننده اضافی تبدیل نمود که این تبدیل مسبب افزایش کارایی این ستون‌ها می‌شود.

به تعویق افتادن نقطه شکست به دلیل استفاده از روکش انعطاف پذیرتر نکته دیگری بود که در نمودارهای $q-\epsilon_a$ ستون‌های دانه‌ای روکش‌دار مشاهده شد. این نقطه در (SG-GEGC(II) در کرنش محوری ۱۹٪ تشکیل شد در حالی که هیچ نشانه‌ای از تشکیل آن در ستون دانه‌ای با روکش نرم تا کرنش محوری ۲۰٪ مشاهده نشد. این به تعویق افتادن نقطه شکست را می‌توان یک مزیت در نظر گرفت زیرا کاهش ناگهانی مقاومت برای روش‌های بهسازی خاک خوشایند نیست.

شکل ۵ مسیرهای تنش مؤثر^۲ (ESPs) را در فضای $q-p'$ برای آزمایشات در شرایط زهکشی شده و زهکشی نشده نشان می‌دهد. در این شکل q و p' به ترتیب انحراف و میانگین تنش اصلی مؤثر می‌باشند که برترتیب به صورت روابط (۴) و (۵) تعریف می‌شوند:

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 \quad (4)$$

$$p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3) / 3 \quad (5)$$

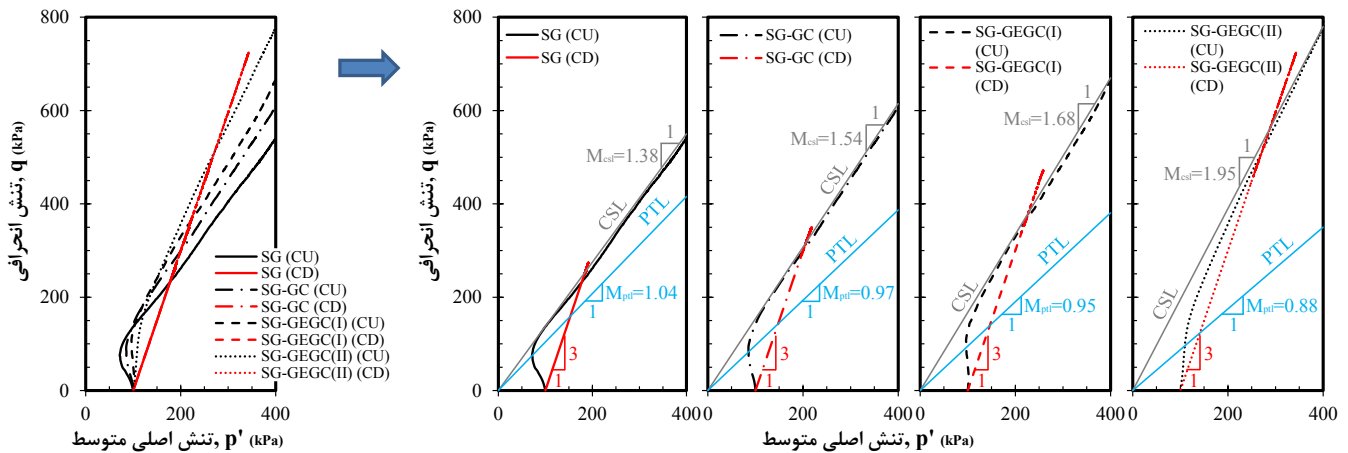
که در آن σ_1 و σ_3 به ترتیب تنش اصلی حداکثر و حداقل می‌باشند. با توجه شکل ۵، خط حالت بحرانی^۳ (CSL) در فضای $q-p'$ که از مبدأ می‌گذرد را می‌توان با بهترین تناسب خطی با نقاط انتهایی مسیرهای تنش مؤثر برای آزمایشات در شرایط زهکشی شده و زهکشی نشده تعیین نمود. شیب خط حالت بحرانی که نسبت بحرانی^۴ (M_{CSL}) نامیده می‌شود، برای نمونه زمین سست برابر ۱/۳۸ و هنگام استفاده از ستون دانه‌ای حدود ۱۱/۶ درصد افزایش یافت. افزایش مقدار نسبت بحرانی هنگام استفاده از روکش ژئوگریدی نیز مشاهده شد بطوریکه استفاده از روکش ژئوگریدی نوع ۱ و ۲ به ترتیب منجر به افزایش حدود ۹/۱ و ۲۶/۶ درصدی M_{CSL} شد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که در صورت استفاده از روکش با سختی مناسب،

$$I_S = \frac{E_{S1\%(SG-GC;SG-GEGC(I);SG-GEGC(II))}}{E_{S1\%(SG)}} \quad (3)$$

که در آن $E_{S1\%}$ مدول تغییرشکل سکانتی در $\epsilon_a = 1\%$ است. مقادیر I_S نشان می‌دهد که استفاده از ستون دانه‌ای، مدول تغییرشکل را تا ۱۷٪ در شرایط بلند مدت بهبود می‌بخشد در حالی که روکش نمودن آن توسط ژئوگرید منجر به افزایش ۴۱٪ تا ۸۴٪ در I_S می‌شود. بهبود مدول تغییرشکل در شرایط کوتاه مدت چشمگیرتر بود بطوریکه رشد مدول تغییرشکل هنگام استفاده از ستون دانه‌ای برابر ۴۰٪ و هنگام محصور نمودن آن با ژئوگرید بین ۷۱٪ تا ۱۲۳٪ تعیین شد. بیشتر بودن مدول تغییرشکل در شرایط کوتاه مدت نسبت به بلند مدت را میتوان به فشار آب حفره‌ای منفی ناشی از رفتار اتساعی^۱ نمونه‌ها در شرایط زهکشی نشده نسبت داده که باعث اعمال فشار محصورکننده اضافی به نمونه‌ها می‌شود. این فشار محصورکننده اضافی سبب شد که اثر افزایش سختی روکش بر بهبود مدول تغییرشکل در شرایط کوتاه مدت کمتر از شرایط بلند مدت شود. افزایش ۷۳ درصدی مدول تغییرشکل به دلیل افزایش سختی روکش در شرایط کوتاه مدت در مقایسه با افزایش ۱۰۵ درصدی در شرایط بلند مدت تأیید می‌کند که بهبود مدول تغییرشکل به دلیل استفاده از روکش سخت‌تر در صورت انسداد ستون‌های دانه‌ای و کاهش ظرفیت زهکشی آن‌ها کمتر از حد انتظار خواهد بود. رفتار اتساعی نمونه‌ها و ایجاد فشار آب حفره‌ای منفی را می‌توان در شکل ۴-ج مشاهده نمود. همانطور که مشاهده می‌شود، به دلیل رفتار انقباضی خاک مورد استفاده بعنوان زمین سست، نمونه‌ها با افزایش فشار آب حفره‌ای در سطوح کرنش‌های کم مواجه می‌شوند. این فشار آب حفره‌ای مثبت با نصب ستون دانه‌ای و افزایش تراکم محیط کاهش یافته و با پوشاندن آن توسط ژئوگرید با سختی بالا به حداقل می‌رسد. با ادامه روند افزایش کرنش‌های محوری، نمونه‌ها رفتار اتساعی نشان داده که منجر به ایجاد فشار آب حفره‌ای منفی و در نهایت افزایش مقاومت نمونه‌ها در سطوح بالای کرنش می‌شود. شکل ۴-ج نشان داد که میزان فشار آب حفره‌ای منفی تولید شده در نمونه‌های بهسازی شده با ستون دانه‌ای بدون روکش بیشتر است که این می‌تواند به دلیل تراکم سنگدانه‌های ستون و تمایل بیشتر آن‌ها به اتساع باشد. پوشاندن ستون دانه‌ای و ایجاد محصورکنندگی اضافی دور آن سبب شد تمایل ستون جهت اتساع کاهش و در نتیجه میزان فشار آب حفره‌ای

2. effective stress paths
3. critical state line
4. critical ratio

1. dilatancy behavior



شکل ۵. مسیرهای تنش مؤثر نمونه‌ها در فضای p' - q

Fig. 5. Effective stress paths of pre-cyclic monotonic tests.

روکش برای استفاده در ستون‌های دانه‌ای را برجسته می‌سازد. اهمیت این موضوع در مطالعه‌های پیشین نیز مورد تأکید قرار گرفته بود [۲۱ و ۲۳ و ۲۵].

۴-۲- رفتار سیکلیک

همانطور که پیش از این نیز اشاره شد، جهت بررسی رفتار سیکلیک ستون‌های دانه‌ای مسدود، آزمایشات سیکلیک زهکشی‌نشده در سه نسبت تنش تناوبی مختلف ۰/۱۵۵، ۰/۲۵۵ و ۰/۳۵۵ انجام شد. کاهش مدول تغییرشکل یکی از پدیده‌هایی بود که در میان نتایج بدست آمده مشاهده شد. این پدیده که به دلیل رشد تجمعی تغییرشکل تحت برش تناوبی رخ می‌دهد به وضوح در شکل ۶ برای آزمایشات با نسبت تنش تناوبی ۰/۲۵۵ دیده می‌شود. این پدیده می‌تواند یک فاکتور مهم در ارزیابی تغییرشکل زمین ناشی از زمین لرزه باشد [۴۳].

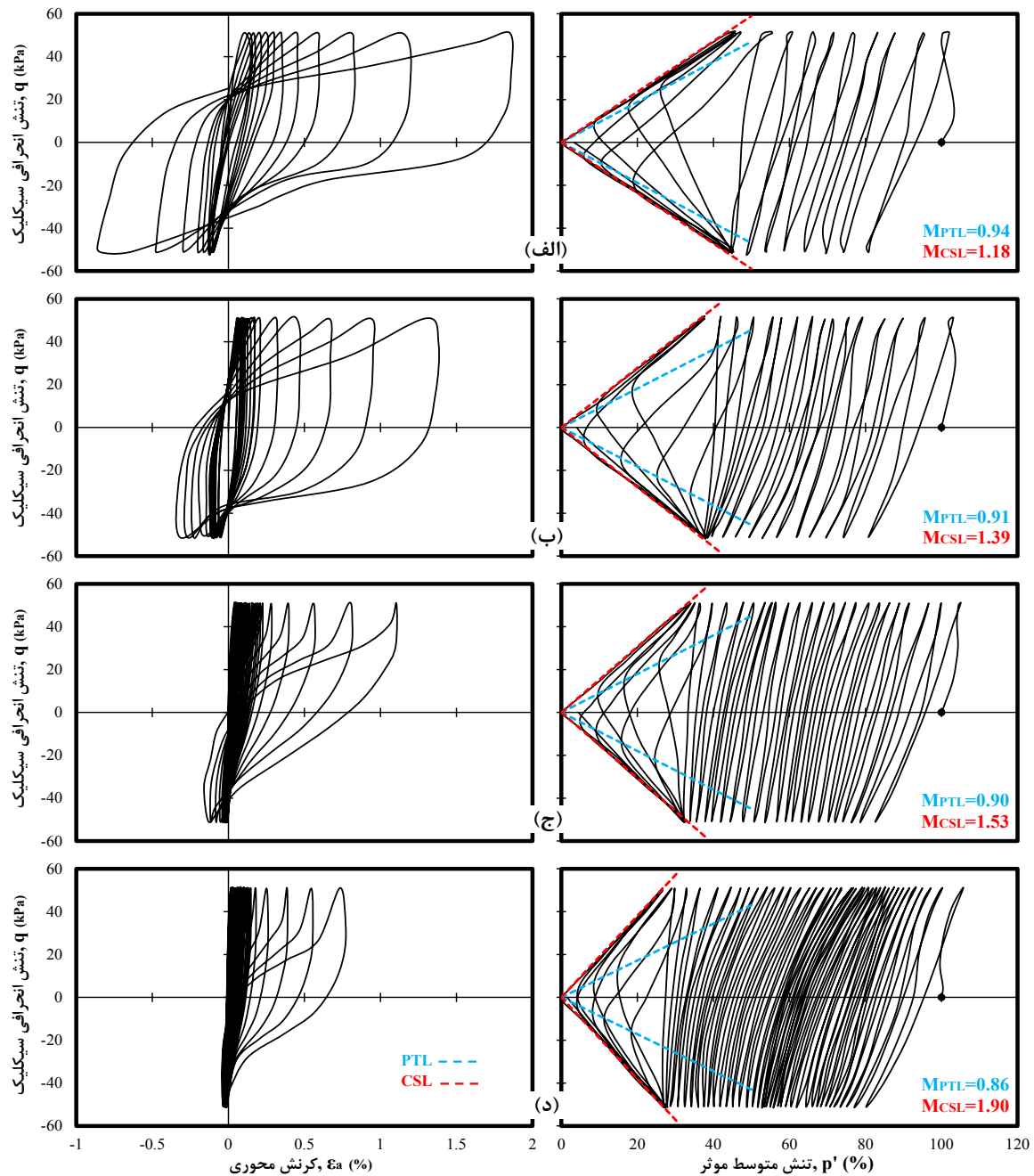
جهت تعیین پدیده کاهش سختی مدول تغییرشکل نمونه‌ها، شاخص کاهش سختی (δ) معرفی شده توسط ادریس^۳ و همکاران به کار گرفته شد [۴۴]. برای یک شرایط تناوبی در حالت کنترل تنش با q مشخص، δ مطابق رابطه (۶) تعریف می‌شود:

$$\delta = \frac{E_{SN}}{E_{S1}} = \frac{q / \varepsilon_N}{q / \varepsilon_1} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_N} \quad (6)$$

نقش روکش می‌تواند بسیار بیشتر از ستون دانه‌ای در بهبود رفتار زمین سُست باشد.

تغییر در شیب خط انتقال فاز^۱ (M_{ptl}) نکته دیگری بود که در شکل ۵ برای آزمایشات زهکشی نشده مشاهده شد. همانطور که توسط ایشیهارا^۲ و همکاران اشاره شده است، حالت انتقال فاز نقطه‌ای در فضای p' - q است که در آن فشار آب حفره‌ای شروع به کاهش می‌کند [۴۲]. بنابراین خط انتقال فاز (PTL) که از مبدأ به نقطه انتقال فاز رسم می‌شود، بر رفتار حجمی حاکم است و فضای p' - q را به دو ناحیه جدا می‌کند. نسبت‌های تنش کمتر از M_{ptl} ، نشان دهنده رفتار انقباضی پلاستیک است در حالی که ناحیه دیگر رفتار پلاستیک اتساعی را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر خط انتقال فاز مرزی است که در آن رفتار حجمی خاک در طی افزایش تنش انحرافی از حالت انقباضی به اتساعی تغییر می‌کند و کاهش شیب آن به معنای کاهش تمایل خاک به رفتار انقباضی است. این کاهش تمایل در هنگام استفاده از ستون دانه‌ای و همچنین روکش شدن آن مشاهده شد، با این تفاوت که نقش روکش بیشتر از ستون دانه‌ای در کاهش تمایل زمین به رفتار انقباضی بود. علاوه بر این، مقایسه خطوط انتقال فاز برای ستون‌های دانه‌ای با و بدون روکش در شکل ۵ نشان داد که استفاده از روکش در کاهش تمایل زمین به رفتار انقباضی زمانی مؤثر است که روکش دارای سختی کششی مناسب باشد. این امر اهمیت توجه به سختی ژئوسنتتیک در انتخاب

1. phase-transition line
2. Ishihara

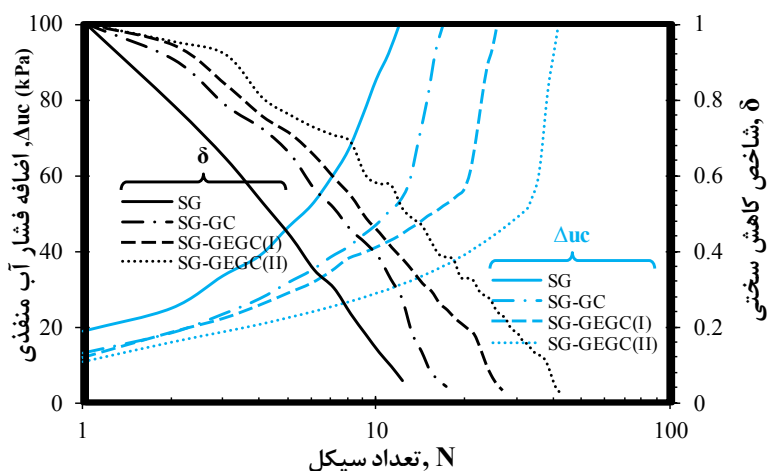


شکل ۶. نمودار تنش انحرافی سیکلیک در مقابل کرنش محوری و مسیر تنش برای: (الف) زمین سست، (ب) زمین سست بهسازی شده با ستون دانه‌ای، (ج) ستون دانه‌ای با روکش ژئوگرید نوع ۱، (د) ستون دانه‌ای با روکش ژئوگرید نوع ۲

Fig. 6. Results of cyclic test with CSR = 0.255 on: (a) SG; (b) SG-GC; (c) SG-GEGC(I); (d) SG-GEGC(II).

آورد. این تغییرات برای آزمایشات با نسبت تنش تناوبی ۰/۲۵۵ در مقیاس لگاریتمی در شکل ۷ ارائه شده است و نشان می‌دهد که δ به طور غیرخطی برای همه نمونه‌ها با افزایش تعداد سیکل بارگذاری کاهش می‌یابد با این تفاوت که نرخ کاهش δ در نمونه بهسازی نشده بیشتر است. این بدان معنی است که بهسازی یک زمین سست با ستون‌های دانه‌ای باعث کاهش

که در آن E_{SI} و E_{SN} به ترتیب مدول تغییرشکل سکانتی در تناوب‌های اول و N_m و ϵ_N نیز به ترتیب حداکثر کرنش‌های تناوبی در این سیکل‌ها می‌باشند. بنابراین تغییر شاخص کاهش سختی در مقابل تعداد سیکل‌های بارگذاری (N) را می‌توان برای هر یک از نمونه‌ها با تخمین کرنش در سیکل‌های مختلف از تاریخچه زمانی کرنش محوری به دست



شکل ۷. تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای ناشی از بارگذاری سیکلی و شاخص کاهش سختی در مقابل تعداد سیکل بارگذاری

Fig. 7. Variation of degradation index and accumulated pore pressure versus number of loading cycles.

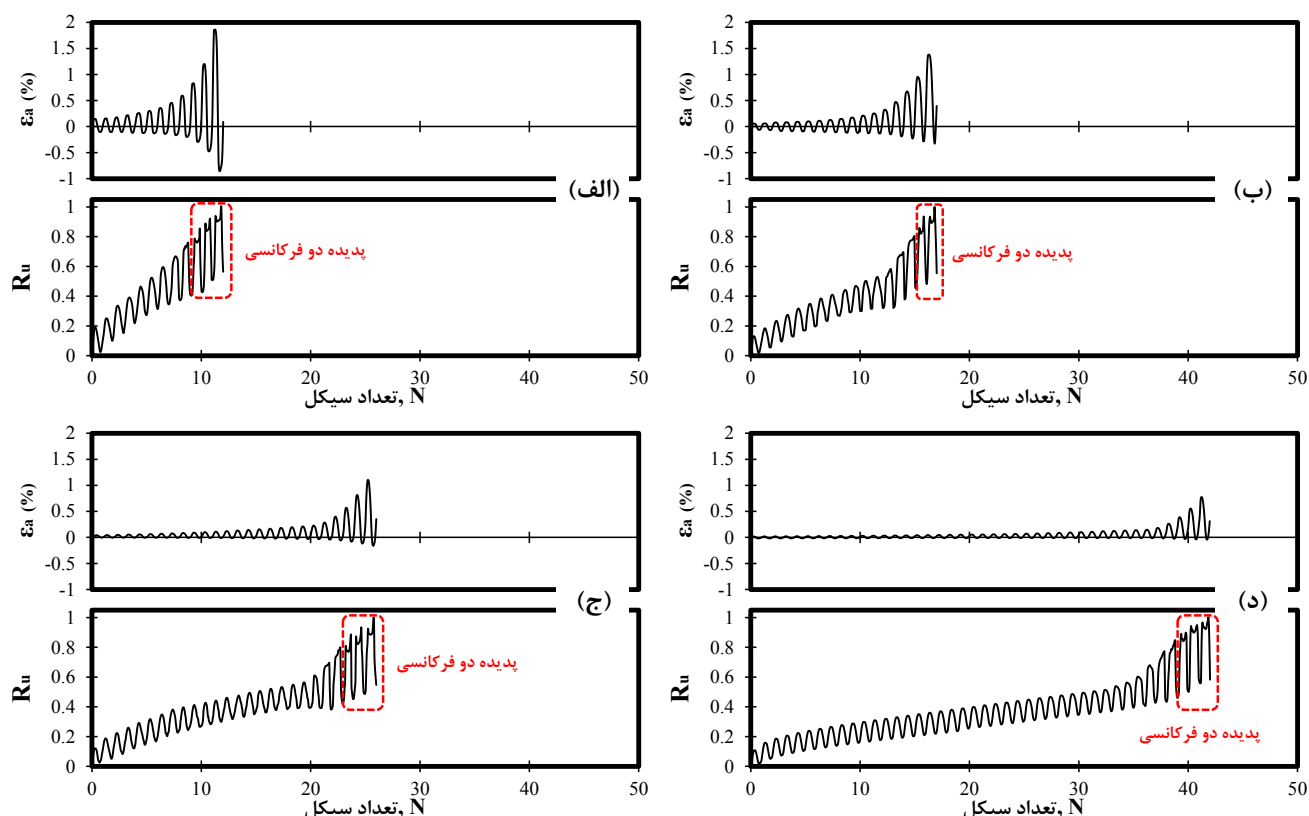
روکش بر بهبود رفتار ستون‌های دانه‌ای در سیکل‌های اول بارگذاری است. این موضوع که به دلیل نیاز به تغییر شکل‌های شعاعی قابل توجه در ستون جهت بسیج شدن نیروی کششی در روکش است، به ناکارآمدی روکش‌ها با هرگونه سختی در کنترل تغییر شکل‌های کوچک اشاره دارد.

به منظور بررسی مکانیزم وقوع روانگرایی در نمونه‌ها، مسیرهای تنش مؤثر در صفحه $p'-q$ برای آزمایشات با نسبت تنش تناوبی 0.255 در شکل ۶ ارائه شده است. در شکل ۶ به وضوح مشاهده می‌شود که توسعه نرخ کرنش ناشی از تحرک چرخه‌ای علت وقوع روانگرایی در تمام نمونه‌ها بوده است. همانطور که دیده می‌شود، هنگامی که مسیر تنش به خط حالت بحرانی نزدیک شد، شروع به پیروی از یک حلقه پروانه‌ای شکل نموده و دامنه کرنش محوری با هر سیکل بارگذاری افزایش می‌یابد. چنین رفتاری که به عنوان تحرک چرخه‌ای شناخته می‌شود، با وقوع انقباض و اتساع در یک سیکل واحد و شکل‌گیری حلقه‌های S شکل هیسترسیز^۳ در چند سیکل آخر همراه بود. این نوع مسیر تنش به دلیل پاسخ‌های متمایز انقباضی و اتساعی مرتبط با انتقال فاز نمونه‌ها در طول بخش‌های بارگذاری و باربرداری می‌باشد. وقوع انقباض و اتساع در یک سیکل منفرد که پدیده دو فرکانسی شدن نامیده می‌شود، در چند سیکل آخر نمودارهای تاریخچه زمانی فشار آب حفره‌ای مشاهده می‌شود (شکل ۸). همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، مسیر تنش در تمام نمونه‌ها بر خطی شد که با خط حالت بحرانی به دست آمده از آزمون بارگذاری مونوتونیک پیش از تجربه بارهای تناوبی متفاوت بود

نشست تجمعی آن در طول بارگذاریهای متوالی^۱ می‌شود. از سوی دیگر، عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین روند δ در مقابل N در نمونه‌های SG-GC و SG-GEGC(I) نشان می‌دهد که استفاده از روکش ژئوگرید زمانی در کاهش نشست‌های تجمعی مؤثر خواهد بود که سختی مناسبی برای آن انتخاب شود. این موضوع اهمیت توجه به سختی ژئوگرید در انتخاب روکش جهت استفاده در ستون‌های دانه‌ای تحت بارگذاری تناوبی را برجسته می‌کند. تفاوت بین سرعت رشد فشار آب حفره‌ای در نمونه‌های مختلف نکته دیگری بود که در شکل ۷ و همچنین شکل ۸ جلب توجه مینماید. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، اضافه فشار آب حفره‌ای ناشی از بارگذاری تناوبی (Δu_c) به طور غیرخطی با تعداد سیکل‌های بارگذاری در تمام نمونه‌ها افزایش می‌یابد که بیشترین این افزایش در ۴ تا ۶ سیکل پایانی که مرتبط با تحرک چرخه‌ای^۲ است رخ داد (شکل ۸). روند تغییرات Δu_c در مقابل تعداد سیکل بارگذاری نشان داد که بیشترین و کمترین میزان افزایش Δu_c به ترتیب مربوط به نمونه زمین سست و ستون دانه‌ای محصور شده با ژئوگرید نوع دو بود و تفاوت بین نمونه ستون دانه‌ای و ستون دانه‌ای محصور شده با ژئوگرید نوع یک قابل توجه نبود. این تفاوت نامحسوس که در مورد δ نیز مشاهده شد، بر ناکارآمدی روکش‌های ژئوستنتیکی انعطاف‌پذیر در به تأخیر انداختن و کاهش پتانسیل روانگرایی در ستون‌های دانه‌ای با امکان انسداد تأکید می‌کند. نکته دیگری که از شکل ۷ دریافت می‌شود، تأثیر ناچیز

1. consecutive loading
2. cyclic mobility

3. S-shaped hysteresis loops



شکل ۸. تغییرات کرنش محوری و فشار آب منفذی نسبی در مقابل تعداد سیکل برای: (الف) زمین سست، (ب) زمین سست بهسازی شده با ستون دانه‌ای، (ج) ستون دانه‌ای با روکش ژئوگرید نوع ۱، (د) ستون دانه‌ای با روکش ژئوگرید نوع ۲

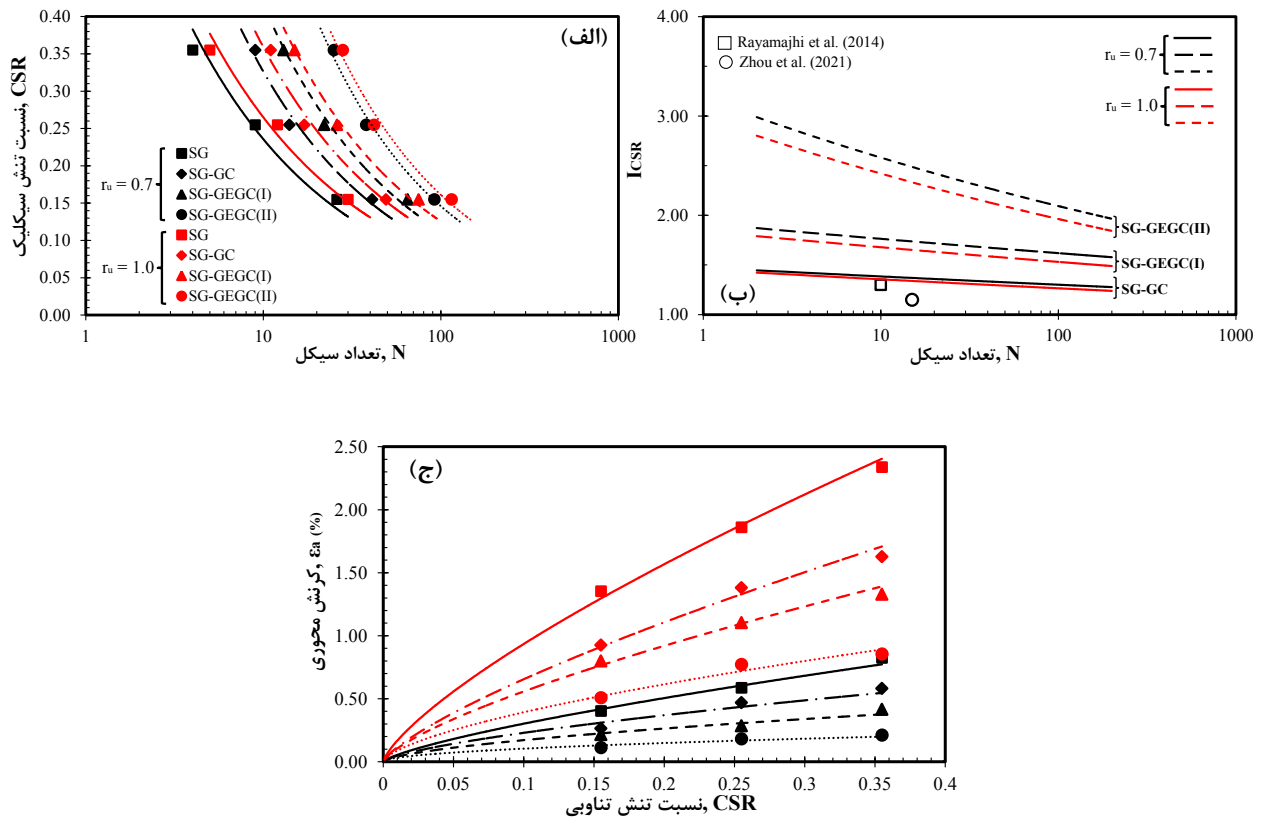
Fig. 8. Variation of axial strain and pore-water pressure ratio versus cycle number for tests with CSR = 0.255: (a) SG; (b) SG-GC; (c) SG-GEGC(I); (d) SG-GEGC(II).

می‌نماید. از آنجا که حالت انتقال فاز تناوبی^۱ (PT_{cyc}) به عنوان یک نقطه عطف در حلقه‌های مسیر تنش ظاهر می‌شود، یک جفت از خطوط حالت انتقال فاز تناوبی برای هر نمونه قابل تعیین می‌باشد (شکل ۶). این جفت خطوط انتقال فاز تناوبی در هر دو جهت صفحه $p'-q$ متقارن بوده و در زیر خط حالت بحرانی تناوبی قرار دارد. مشابه آنچه برای خطوط حالت بحرانی تناوبی مشاهده شد، شیب خطوط حالت انتقال فاز تناوبی نیز کمتر از خطوط انتقال فاز به‌دست‌آمده از آزمون‌های بارگذاری مونوتونیک بود. این موضوع توسط مائو و فاهی^۲ و هاید^۳ و همکاران نیز گزارش شده است [۴۵ و ۴۳]. شیب خط حالت انتقال فاز تناوبی برای زمین سست، زمین بهسازی شده با ستون دانه‌ای و ستون دانه‌ای محصور شده با ژئوگریدهای نوع یک و دو به ترتیب ۰/۸۶، ۰/۹۰، ۰/۹۱ و ۰/۹۴ تعیین شد. مقایسه این شیب‌ها با آنچه

و در زیر آن قرار داشت. به عبارت دیگر، بارگذاری سیکلی منجر به کاهش شیب خط حالت بحرانی گردید با این تفاوت که وجود یک ستون دانه‌ای محصور شده با ژئوگرید سخت، این کاهش را به حداقل رساند. کاهش شیب خط انتقال فاز به دلیل بارگذاری سیکلی برای نمونه نماینده زمین سست برابر ۱۴/۵٪ بود در حالیکه این کاهش هنگام استفاده از ستون دانه‌ای و ستون دانه‌ای محصور شده با ژئوگرید نوع یک و دو به ترتیب به ۹/۷٪، ۷/۲٪ و ۲/۵٪ رسید. مقایسه این مقادیر نقش استفاده از یک روکش با سختی مناسب در حفظ مقاومت زمین تثبیت شده با ستون‌های دانه‌ای هنگام تجربه بارهای لرزه‌ای را برجسته می‌سازد.

همانند آنچه که در آزمایشات بارگذاری مونوتونیک مشاهده شد، یک حالت انتقال فاز نیز در آزمایشات بارگذاری سیکلی شناسایی شد که مسیرهای تنش تناوبی زهکشی نشده را به فازهای انقباضی و اتساعی تقسیم

1. cyclic phase-transformation
2. Mao and Fahey
3. Hyde



شکل ۹. تغییرات (الف) نسبت تنش تناوبی، (ب) فاکتور بهبود نسبت تنش تناوبی در مقابل تعداد سیکل‌های بارگذاری و (ج) تغییرات کرنش محوری در مقابل نسبت تنش تناوبی در مقادیر مختلف r_u

Fig. 9. Variation of: (a) CSR and (b) CSR improvement factor versus number of loading cycles; (c) variation of axial strain versus critical stress ratio.

اضافه فشار حفره‌ای ۰/۷ و ۱/۰ برای هر نمونه تعیین و در شکل ۹-الف ارائه شده است.

همانطور که در شکل ۹-الف مشاهده می‌شود، تعداد سیکل‌های مورد نیاز برای رسیدن به یک فشار آب حفره‌ای خاص، با کاهش مقدار CSR تمام نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این روند که در هر دو مقدار اضافه فشار حفره‌ای ۰/۷ و ۱/۰ مشاهده شد، از یک معادله نمایی با یک ضریب همبستگی بالا به شرح رابطه (۷) پیروی کرد:

$$CSR = b_1 N^{-c_1} \quad (7)$$

که در آن b_1 و c_1 ضرایب ثابت بوده که مقادیر آن با توجه به مشخصات نمونه و مقدار r_u در جدول ۲ ارائه شده است. این منحنی‌های به دست آمده می‌توانند به عنوان ورودی یک مدل ساده جهت شبیه‌سازی رفتار زمین بهسازی شده با ستون‌های دانه‌ای با و بدون روکش در شرایط روانگرایی مورد

از آزمایشات بارگذاری مونوتونیک به دست آمده نشان داد که بالاترین و پایین‌ترین تغییرات در خط حالت انتقال فاز به دلیل بارگذاری سیکلی بترتیب مربوط به زمین سست و زمین بهسازی شده توسط ستون دانه‌ای محصورشده با ژئوگرید نوع دو بوده است. این یافته به مزیت استفاده از ستون‌های دانه‌ای محصورشده با ژئوسنتتیک با سختی کششی مناسب جهت به حداقل رساندن تغییرات در رفتار یک زمین سست در طول تجربه بار دینامیکی اشاره دارد. از طرف دیگر، کاهش نسبی شیب خط حالت انتقال فاز تناوبی به دلیل استفاده از ستون‌های دانه‌ای با و بدون روکش نشان داد که این نوع روش بهسازی خاک نقش برجسته‌ای در کاهش تمایل زمین به رفتار انقباضی در حین بارگذاری دینامیکی دارد.

با توجه به رابطه بین میزان انسداد ستون دانه‌ای و افزایش فشار آب حفره‌ای در ستون‌های دانه‌ای هنگام زلزله، بررسی رابطه بین تنش تناوبی و تعداد سیکل‌های بارگذاری برای تشکیل یک فشار آب حفره‌ای معین ضروری است. برای این منظور، تغییر CSR در مقابل N در نسبت‌های

جدول ۲. لیست ضرایب استفاده شده در محاسبه مقاومت روانگرایی

Table 2. List of factors used in calculating liquefaction resistance.

$r_u = 1.0$				$r_u = 0.7$				نمونه
c_2	c_1	b_2	b_1	c_2	c_1	b_2	b_1	
۰/۷۴۶	۰/۵۰۹	۵/۲۰۴	۰/۸۵۶	۰/۷۴۲	۰/۵۲۹	۱/۶۶۷	۰/۷۹۷	زمین سست
۰/۷۵۷	۰/۵۳۹	۳/۷۴۰	۱/۲۴۲	۰/۶۸۴	۰/۵۵۶	۱/۱۱۰	۱/۱۷۴	زمین سست بهسازی شده با ستون دانه‌ای
۰/۷۲۱	۰/۵۴۹	۲/۹۳۷	۱/۵۷۴	۰/۶۱۹	۰/۵۶۶	۰/۷۱۴	۱/۵۲۳	زمین سست بهسازی شده با ستون دانه‌ای مسلح به ژئوگرید ۱
۰/۶۴۷	۰/۶۰۰	۱/۷۴۱	۲/۵۵۳	۰/۵۱۳	۰/۶۲۰	۰/۳۳۹	۲/۵۳۶	زمین سست بهسازی شده با ستون دانه‌ای مسلح به ژئوگرید ۲

که در آن $b_{1(I)}$ ، $b_{1(U)}$ ، $c_{1(I)}$ و $c_{1(U)}$ ضرایب ثابت مربوط به زمین بهسازی شده و بهسازی نشده بوده که مقادیر آن با توجه به مشخصات نمونه و مقدار I_{CSR} در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به رابطه ۹، مقادیر I_{CSR} برای ستون‌های دانه‌ای با و بدون روکش محاسبه و نتایج در شکل ۹-ب نشان داده شده است. تغییرات I_{CSR} در مقابل N نشان داد که اثر استفاده از ستون‌های دانه‌ای روکش‌دار قبل از وقوع روانگرایی بیشتر بوده و پس از آن دچار افت می‌شود بطوریکه این پدیده در روکش با سختی بالا، بارزتر است. همچنین مشاهده شد که با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری، تأثیر مثبت ستون دانه‌ای با روکش نوع ۲ در ممانعت از وقوع روانگرایی ۳۴٪ کاهش یافت حال آن که این کاهش در ستون دانه‌ای و ستون دانه‌ای با روکش نوع ۱ به ترتیب حدود ۱۲٪ و ۱۶٪ بود. تأثیر سختی روکش نکته دیگری است که در شکل ۹-ب جلب توجه می‌نماید. این تأثیر که با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری کاهش می‌یابد، به شکل یک افزایش ۲۴ تا ۵۴ درصدی در I_{CSR} هنگام ۱۰ برابر شدن سختی ژئوگرید ظاهر شد. علاوه بر این، مقدار I_{CSR} برای نمونه‌های بهسازی شده با ستون دانه‌ای در حدود ۱/۴۴-۱/۲۴ به دست آمد که کمی بالاتر از مقادیر گزارش شده توسط ژو^۱ و همکاران بر اساس آزمایشات سانتریفیوژ دینامیکی بود [۸].

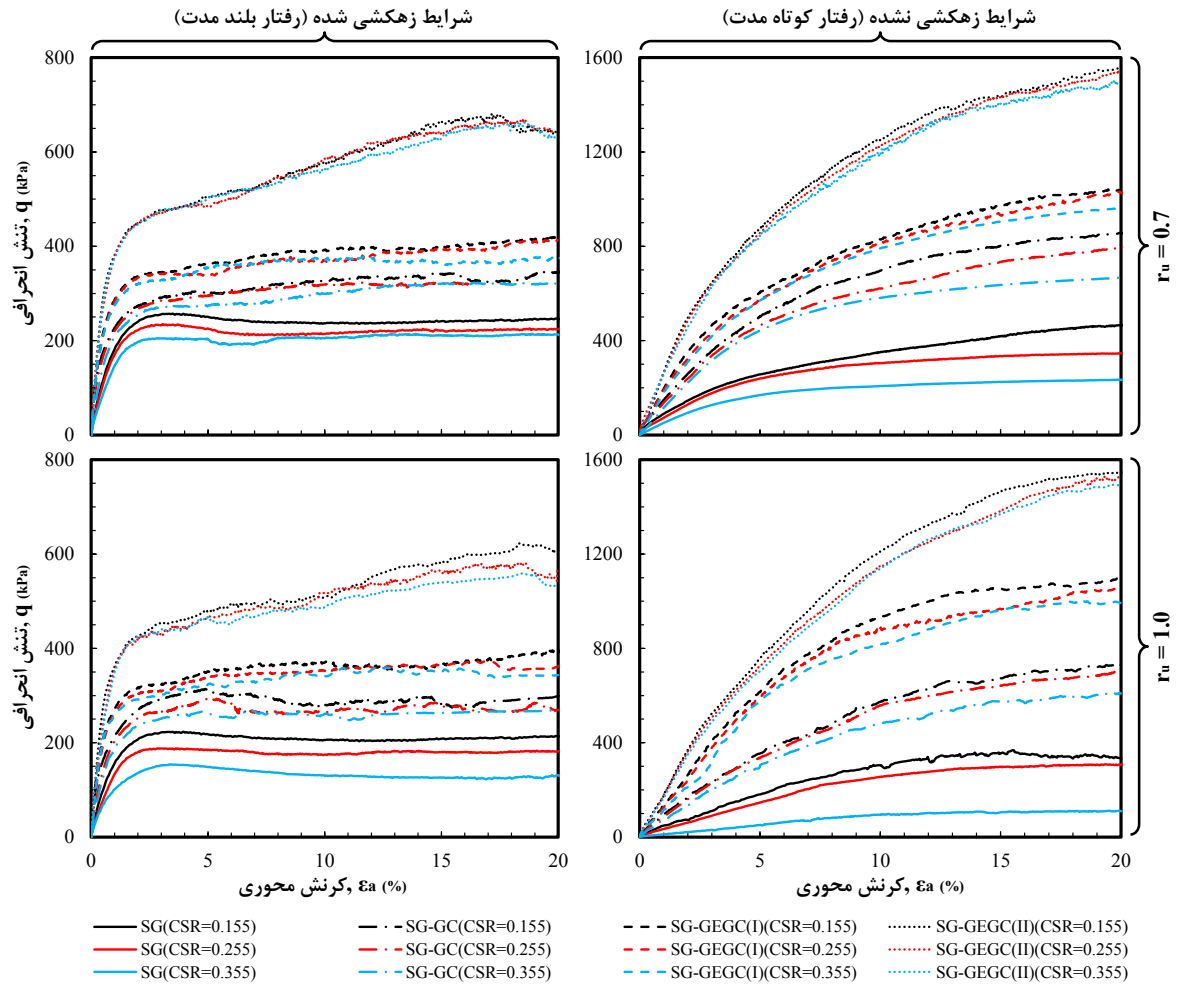
نشست زمین ناشی از روانگرایی یکی دیگر از معیارهای عملی برای ارزیابی عملکرد ستون‌های دانه‌ای است. جهت ارزیابی این معیار، که در مطالعه‌های پیشین نیز مورد استفاده قرار گرفته است [۸ و ۱۴ و ۴۸]، از کرنش محوری (ϵ_a) نمونه‌ها استفاده شد. به عبارت دیگر، کرنش محوری به عنوان نماینده تغییر شکل زمین در نظر گرفته شده که بر این اساس رابطه بین ϵ_a و CSR تعیین گردید (شکل ۹-ج). مشابه آنچه در روابط $CSR-N$

استفاده قرار گیرند. مقایسه منحنی‌های مذکور در شکل ۹-الف نشان می‌دهد که برای یک CSR معین، تعداد سیکل‌های مورد نیاز برای رسیدن به یک فشار آب حفره‌ای خاص ضمن استفاده از ستون‌های دانه‌ای و پوشاندن آن‌ها با روکش ژئوگریدی افزایش می‌یابد. این افزایش که در روکش با سختی بالا بارزتر بود، بدان معنی است که ستون‌های دانه‌ای با روکش مناسب می‌توانند یک راه حل کارآمد جهت به تأخیر انداختن روانگرایی باشند. علاوه بر این، افزایش CSR به دلیل استفاده از ستون‌های دانه‌ای نیز نشان داد که زمین بهسازی شده با ستون‌های دانه‌ای روکش‌دار، توانایی بیشتری برای جلوگیری از روانگرایی در زلزله‌های بزرگ را دارند. این موضوع که در مطالعات پیشین نیز به آن اشاره شد است را می‌توان دومین مزیت این روش بهسازی خاک در نظر گرفت [۴۶]. برای ارزیابی کمی اثر استفاده از ستون‌های سنگی، از نسبت CSR زمین بهبود یافته ($CSR_{(I)}$) به CSR زمین بهبود نیافته ($CSR_{(U)}$) استفاده شد. این عامل که ضریب بهبود نسبت تنش تناوبی (I_{CSR}) نامیده می‌شود به صورت رابطه (۸) بیان می‌گردد [۴۷]:

$$I_{CSR} = \frac{CSR_{(I)}}{CSR_{(U)}} \quad (8)$$

با جایگزینی رابطه (۷) در رابطه (۸)، معادله I_{CSR} می‌تواند به عنوان تابعی از تعداد سیکل‌ها به شکل رابطه (۹) بیان شود:

$$I_{CSR} = \frac{b_{1(I)} N^{-c_{1(I)}}}{b_{1(U)} N^{-c_{1(U)}}} = \frac{b_{1(I)}}{b_{1(U)}} N^{(c_{1(U)} - c_{1(I)})} \quad (9)$$



شکل ۱۰. منحنی تنش-کرش نمونه‌ها پس از تجربه بار تناوبی با CSR مختلف در شرایط بلند مدت و کوتاه مدت

Fig. 10. Results of post-cyclic monotonic tests in long-term and short-term conditions

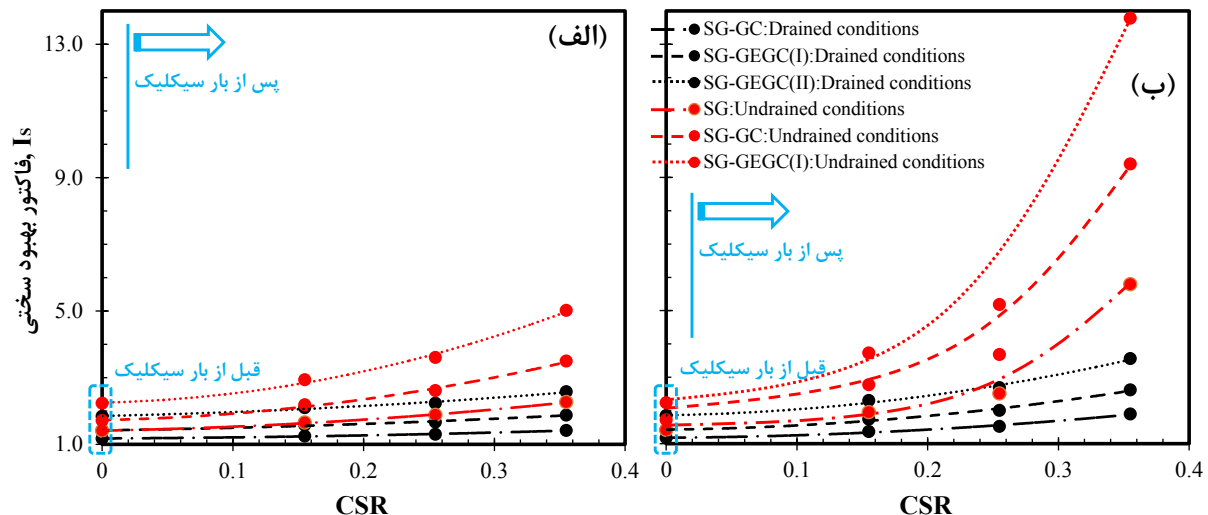
۳-۴ رفتار مونوتونیک پس از تجربه بارهای تناوبی

همانطور که اشاره شد، رفتار فرا سیکلیک کوتاه مدت و بلند مدت نمونه‌ها با استفاده از بارگذاری مونوتونیک در شرایط زهکشی نشده و زهکشی شده بلافاصله پس از بارگذاری سیکلی مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی اثر میزان انسداد ستون دانه‌ای بر رفتار فرا سیکلیک نمونه‌ها، بارگذاریهای مونوتونیک مذکور پس از تجربه بارهای سیکلیک تا رسیدن به دو مقدار نسبت فشار آب حفره‌ای مختلف ($1/0$ و $0/7$) اعمال شد. رفتار فرا سیکلیک کوتاه مدت و بلند مدت نمونه‌ها در شکل ۱۰ ارائه شده است.

مشابه آنچه برای رفتار نمونه‌ها پیش از تجربه بار سیکلیک مشاهده شد، تأثیر استفاده از ستون دانه‌ای با و بدون روکش بر رفتار فرا سیکلیک کوتاه مدت و بلند مدت یک زمین سست به وضوح مشاهده می‌شود. استفاده از ستون دانه‌ای و متعاقباً پوشاندن آن با روکش ژئوگریدی باعث

مشاهده شد، کرش محوری در تمام نمونه‌ها و در هر دو مقدار I_u ، با افزایش CSR به صورت غیرخطی افزایش یافت. روند رشد کرش محوری در مقابل تعداد سیکل که می‌تواند به فرم یک رابطه نمایی بیان شود (رابطه ۱۰)، در تمام نمونه‌ها مشابه بود با این تفاوت که نرخ افزایش ε_a در اثر استفاده از ستون دانه‌ای و همچنین روکش آن کاهش یافت. این بدان معناست که با تسلیح زمین با ستون‌های دانه‌ای روکش‌دار، نه تنها تغییرشکل زمین ناشی از روانگرایی کاهش می‌یابد بلکه تأثیر دامنه زلزله بر تغییرشکل زمین نیز ناچیز می‌شود. این یک مزیت مهم برای این روش بهسازی خاک محسوب می‌شود. ضرایب ثابت رابطه ۱۰ (b_1 و c_1) در جدول ۲ ارائه شده است.

$$\varepsilon_a = b_2 CSR^{c_2} \quad (10)$$



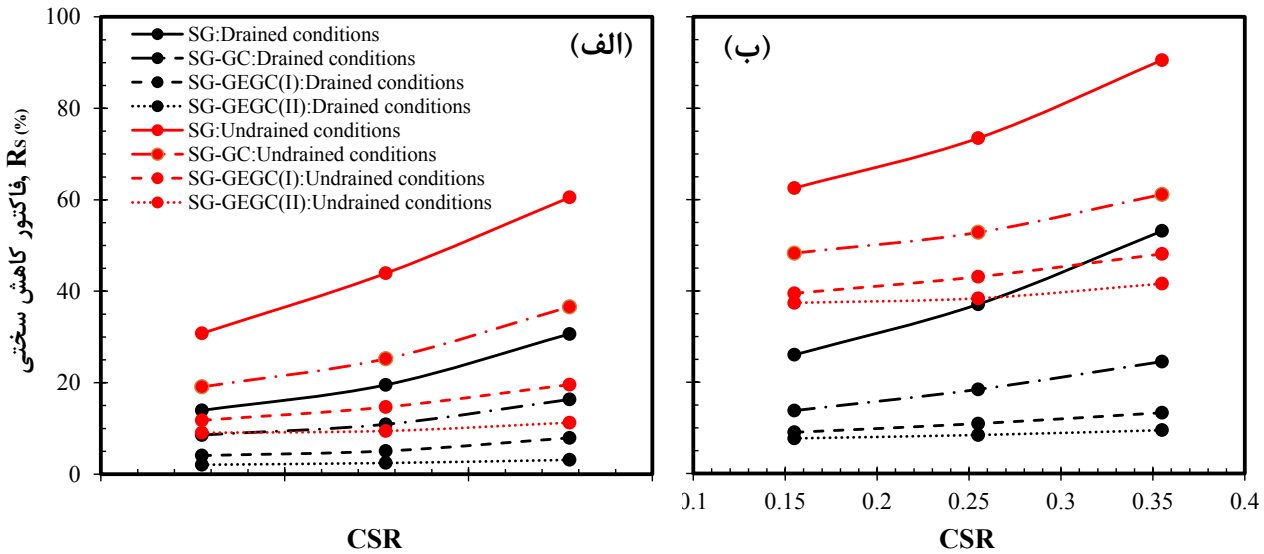
شکل ۱۱. تغییرات فاکتور بهبود سختی در مقابل نسبت تنش تناوبی در: (الف) $r_u=0.7$ و (ب) $r_u=1.0$

Fig. 11. Variation of stiffness improvement factor versus CSR for: (a) $r_u=0.7$; (b) $r_u=1.0$

به ویژه پس از روانگرایی کامل است. به این معنی که استفاده از ستون‌های دانه‌ای (اعم از روکش‌دار یا بدون روکش) می‌تواند نقش برجسته‌ای در جلوگیری از سختی زمین بلافاصله پس از وقوع روانگرایی داشته باشد با این تفاوت که این نقش با استفاده از روکش با سختی مناسب برجسته‌تر می‌شود. همانطور که در شکل ۱۱-ب برای شرایط انسداد کامل ستون مشاهده می‌شود، پوشاندن ستون دانه‌ای با ژئوگرید نوع ۲، کارایی ستون را در حفظ سختی زمین در شرایط کوتاه‌مدت $1/9$ تا $2/4$ برابر و در شرایط بلند مدت $1/7$ تا $1/9$ برابر افزایش می‌دهد. حال آن که استفاده از ژئوگرید نوع ۱ بازده ستون را به ترتیب $1/35$ و $1/5$ برابر افزایش می‌دهد. تفاوت بین نرخ بهبود کارایی ستون‌ها به دلیل استفاده از این دو ژئوگرید، تأثیر سختی روکش بر رفتار ستون‌های دانه‌ای محصورشده با روکش ژئوگرید را پس از تجربه بارهای تناوبی برجسته می‌کند. وابستگی اثربخشی ستون‌های دانه‌ای در حفظ سختی زمین به نسبت تنش بحرانی و رشد آن با افزایش CSR، نکته مهم دیگری است که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. این وابستگی که در رفتار کوتاه‌مدت بیشتر مشهود بود و با وقوع روانگرایی کامل بیشتر نمایان می‌شود، به این معنی است که استفاده از ستون‌های دانه‌ای برای شرایط لرزه‌ای شدیدتر توجیه پذیرتر است. به عبارت دیگر، کارایی واقعی ستون‌های دانه‌ای در مواجهه با زلزله‌های بزرگ آشکار می‌شود، به‌ویژه ستون‌هایی که توسط روکش‌هایی با سختی بالا پوشانده شده‌اند.

استفاده از ضریب کاهش سختی (R_S) روش دیگری برای ارزیابی اثر

شد که رفتار نمونه‌ها از حالت نرم شونده به سخت شونده تغییر کند. رفتار سخت شونده که هم در نمونه‌ها با انسداد کامل که دچار روانگرایی کامل شدند ($r_u = 1/0$) مشاهده شد و هم در نمونه‌هایی با انسداد جزئی که دچار روانگرایی کامل نشدند ($r_u = 0/7$)، می‌تواند به تمایل نمونه‌ها به اتساع در هنگام اعمال تنش برشی که منجر به کاهش فشار آب حفره‌ای و افزایش تنش برشی می‌شود نسبت داده شود. با افزایش سختی روکش، این رفتار برجسته‌تر شد و باعث گردید که حداکثر مقاومت در کرنش‌های بزرگتر رخ دهد. این بدان معناست که جهت بسیج تمام ظرفیت ستون‌های محصورشده با ژئوستتیک جهت بهبود زمین سست نشست‌های بزرگی مورد نیاز است. نیاز به نشست‌های نسبتاً بزرگ که گاهی اوقات ممکن است بیشتر از مقادیر مجاز باشد را می‌توان یک نقطه ضعف ستون‌های دانه‌ای با روکش ژئوستتیک دانست. با این حال، کارایی روکش‌های ژئوستتیک در کرنش‌های کوچک را نباید نادیده گرفت حتی اگر به اندازه اثربخشی آن‌ها در کرنش‌های بزرگ نباشد [۱۸]. مقدار این اثربخشی را می‌توان به صورت کمی با استفاده از ضریب بهبود سختی (I_S) تخمین زد که پیش‌تر در معادله (۳) تعریف شده است. برای این منظور، مقادیر I_S برای ستون‌های دانه‌ای با و بدون روکش تحت نسبت‌های تنش بحرانی مختلف محاسبه و در شکل ۱۱ به طور جداگانه برای هر دو مقدار $r_u = 1/0$ و $r_u = 0/7$ ارائه شده است. تغییرات I_S در مقابل CSR در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که اثربخشی ستون‌های دانه‌ای بر رفتار کوتاه‌مدت یک زمین سست بسیار بیشتر از رفتار بلندمدت آن



شکل ۱۲. تغییرات فاکتور کاهش سختی در مقابل نسبت تنش تناوبی در: الف) $r_u=0.7$ و ب) $r_u=1.0$

Fig. 12. Variation of stiffness reduction factor versus CSR for: (a) $r_u=0.7$; (b) $r_u=1.0$

با مدول‌های بلندمدت، نکته دیگری است که در شکل ۱۲ توجه را به خود جلب می‌کند. این کاهش که در هنگام روانگرایی در زمین سست حدود ۹۰-۶۳٪ بود، در هنگام استفاده از ستون دانه‌ای و پوشاندن آن توسط ژئوگرید نوع دو به ترتیب به ۴۸-۶۱٪ و ۳۷-۴۰٪ رسید. مقایسه مقادیر کوتاه‌مدت و بلندمدت R_s نشان می‌دهد که استفاده از ستون دانه‌ای و پوشاندن آن توسط روکش با سختی بالا در کاهش تأثیر یک بار لرزه‌ای مؤثر است و این تأثیر در رفتار بلندمدت بیشتر مشهود می‌باشد. این را می‌توان به توانایی ستون‌های دانه‌ای برای تخلیه سریع اضافه فشار آب حفره‌ای پس از روانگرایی نسبت داد [۸].

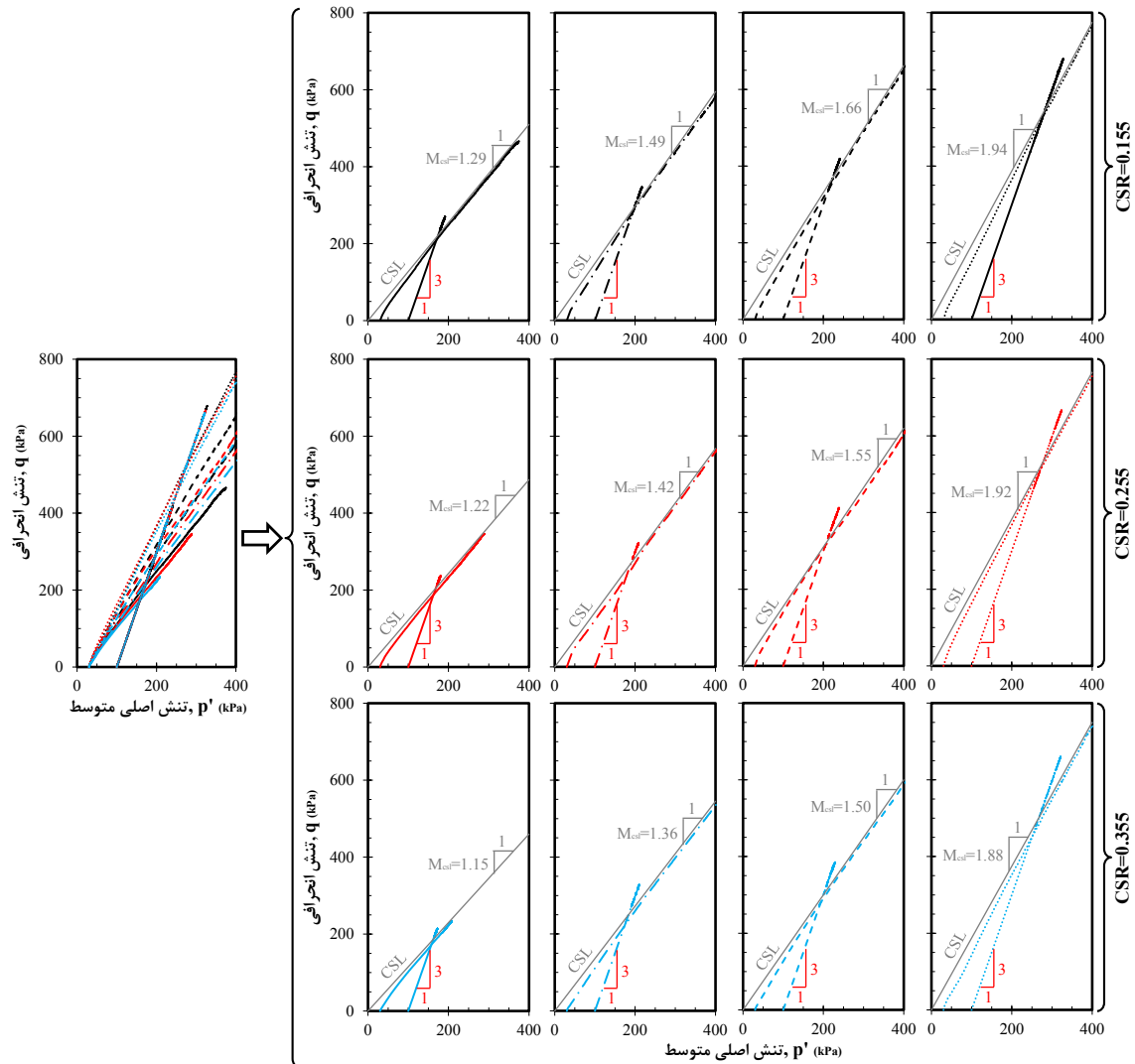
کاهش وابستگی مدول تغییرشکل زمین به تغییرات CSR یکی دیگر از مزایای استفاده از ستون‌های دانه‌ای است. این وابستگی که هم در رفتار کوتاه‌مدت و هم بلندمدت مشاهده گردید، با استفاده از روکش با سختی مناسب به حداقل رسید. این بدان معنی است که استفاده از ستون‌های دانه‌ای روکش‌دار در یک زمین سست می‌تواند وابستگی تغییرشکل زمین به دامنه بارگذاری سیکلیک را به حدی کاهش دهد که ارزیابی تغییرشکل زمین ناشی از بارهای سیکلیک بتواند مستقل از دامنه بارگذاری انجام شود.

مسیرهای تنش مؤثر (ESP) مربوط به بارگذاری فرا سیکلیک در مقادیر نسبت فشار آب حفره‌ای ۰/۷ و ۱/۰ به ترتیب در اشکال ۱۳ و ۱۴ ارائه شده

بارگذاری لرزه‌ای بر رفتار زمین است. این عامل که به طور گسترده در ارزیابی رفتار خاک‌ها پس از تجربه بارهای سیکلیک مورد استفاده قرار گرفته است [۵۰-۵۲]، به صورت رابطه (۱۱) بیان می‌شود:

$$R_s = \frac{E_{S1\%(pre-cyclic)} - E_{S1\%(post-cyclic)}}{E_{S1\%(pre-cyclic)}} \times 100 \quad (11)$$

که در آن $E_{S1\%}$ مدول تغییرشکل سکانتی در $\epsilon_a = 1\%$ می‌باشد. مقادیر R_s برای همه نمونه‌ها تحت نسبت‌های تنش بحرانی مختلف محاسبه و به طور جداگانه برای مقادیر $r_u = 0.7$ و $r_u = 1.0$ در شکل ۱۲ ارائه شده است. تغییر R_s در مقابل CSR نشان می‌دهد که استفاده از یک روکش با سختی مناسب، اثر منفی بارگذاری تناوبی و دامنه آن را بر مدول تغییرشکل بلندمدت یک زمین سست بهسازی شده با ستون دانه‌ای به حداقل می‌رساند. این اثر منفی که در ستون دانه‌ای مسدود محصورشده با ژئوگرید نوع ۲ به صورت ضریب کاهش سختی ۹٪ تخمین زده شد، در شرایط انسداد جزئی به قدری ناچیز بود که می‌توان آن را به طور کامل نادیده گرفت. شایان ذکر است که R_s به ترتیب در حدود ۲۶-۵۳٪ و ۱۴-۲۴٪ برای زمین سست و زمین سست بهسازی شده با ستون دانه‌ای هنگام وقوع روانگرایی می‌باشد. کاهش بیشتر مدول‌های تغییرشکل کوتاه‌مدت به دلیل تجربه بار لرزه‌ای در مقایسه

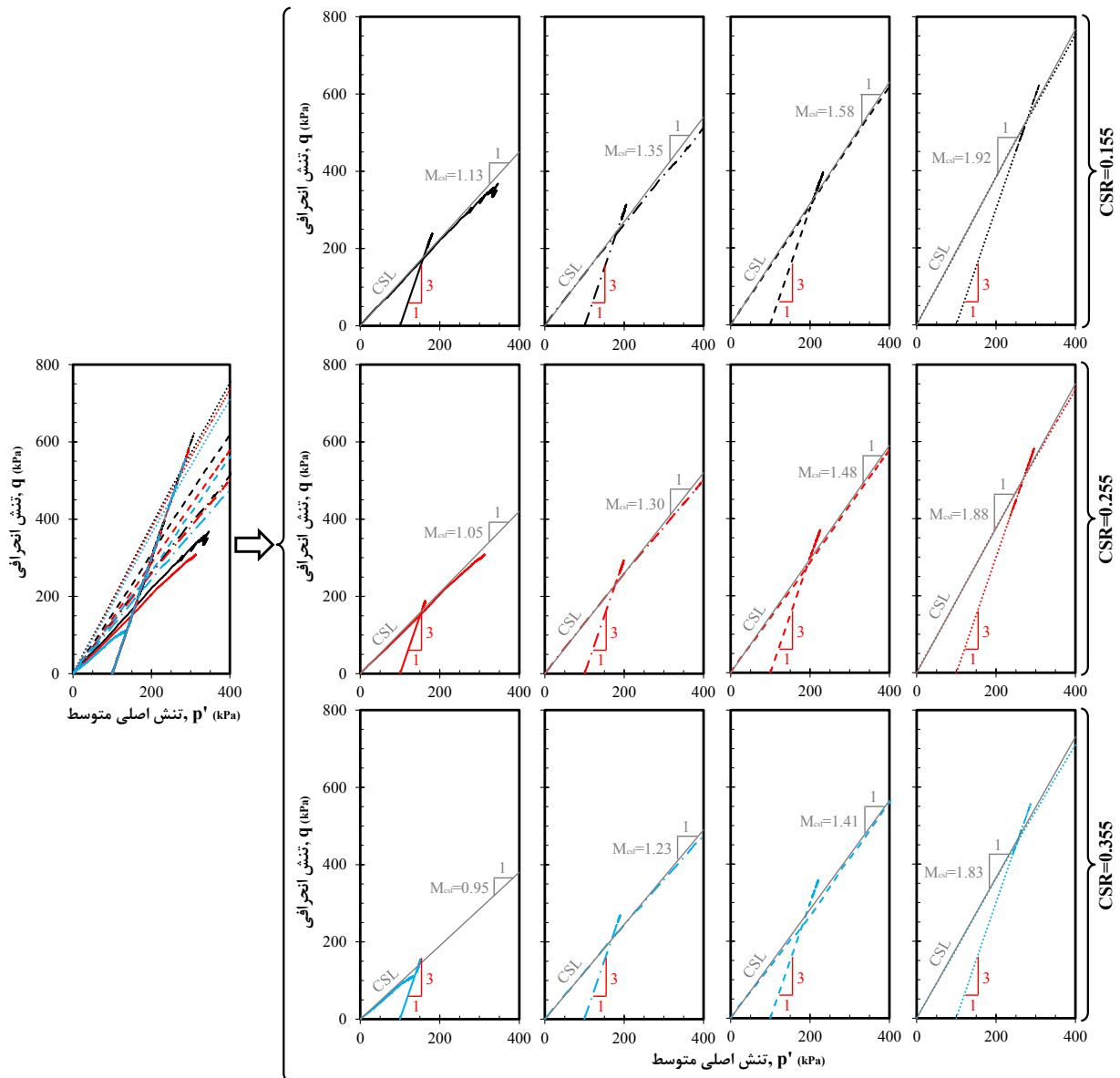


شکل ۱۳. مسیر تنش نمونه‌ها پس از تجربه بار سیکلیک با نسبت‌های تنش تناوبی مختلف و رسیدن به $r_u = 0.7$

Fig. 13. Effective stress paths of specimens after experiencing cyclic loading with different cyclic stress ratios and reaching $r_u = 0.7$

با روکش ژئوگریدی سخت این کاهش را به حداقل رساند. کاهش M_{cs} به دلیل بارگذاری سیکلی با $CSR = 0.155$ برای نمونه روانگرا نشده زمین سست برابر $6/5\%$ بود در حالیکه هنگام استفاده از ستون دانه‌ای و ستون دانه‌ای محصورشده با ژئوگرید نوع ۱ و ۲ این کاهش به ترتیب به $3/2\%$ ، $1/2\%$ و $0/5\%$ رسید. میزان کاهش M_{cs} نیز برای نمونه‌هایی با روانگرایی کامل به ترتیب $1/1$ ، $12/3$ ، $6/0$ و $1/5$ درصد بود. با افزایش CSR به $0/355$ ، مقادیر کاهش M_{cs} برای نمونه‌های روانگرا نشده و روانگرا شده زمین سست به ترتیب به $16/6\%$ و $31/2\%$ رسید حال آن که این کاهش برای نمونه‌های روانگرا نشده و روانگرا شده ستون دانه‌ای محصورشده با ژئوگرید نوع ۲ به ترتیب $3/6\%$ و $6/2\%$ اندازه‌گیری

است. با توجه به مسیرهای تنش مؤثر، هیچ تغییر فازی در نمونه‌ها در رفتار کوتاه مدت نمونه‌ها رخ نمی‌دهد. از اینرو می‌توان گفت که رفتار کوتاه‌مدت یک زمین سست پس از تجربه بار لرزه‌ای، اتساعی خواهد بود و تقویت آن با ستون‌های دانه‌ای (چه روکش‌دار و چه بدون روکش) این رفتار را تغییر نخواهد داد. این را می‌توان به کرنش پلاستیک قابل توجه ایجاد شده توسط بار لرزه‌ای در خاک است که تمایل آن را برای رفتار انقباضی کاهش می‌دهد نسبت داد. از سوی دیگر، مسیر تنش در تمام نمونه‌ها مماس به خط حالت بحرانی شد که با CSL به‌دست‌آمده از آزمایش بارگذاری مونوتونیک پیش از تجربه بارهای تناوبی متفاوت و در زیر قرار داشت. به عبارت دیگر، بارگذاری سیکلی منجر به کاهش M_{cs} شد با این تفاوت که وجود یک ستون دانه‌ای



شکل ۱۴. مسیر تنش نمونه‌ها پس از تجربه بار سیکلیک با نسبت‌های تنش تناوبی مختلف و رسیدن به $r_u=1.0$

Fig. 14. Effective stress paths of specimens after experiencing cyclic loading with different cyclic stress ratios and reaching $r_u=1.0$

تأثیر وقوع پدیده انسداد در ستونهای دانه‌ای بر رفتار کوتاه‌مدت و بلندمدت زمین بهسازی شده با آن قبل و پس از تجربه بار سیکلیک مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، از آزمایشات زهکشی‌نشده جهت شبیه سازی پدیده انسداد در ستونهای دانه‌ای و آزمایشات مونوتونیک و سیکلیک-مونوتونیک برای شبیه سازی رفتار زمین قبل و پس از تجربه بار سیکلیک استفاده شد. با مقایسه نتایج بدست آمده، مجموعه‌ای از یافته‌های کمی و کیفی حاصل شد که به اهم آن در ادامه اشاره می‌شود.

• رفتار بلند مدت نمونه‌ها پیش از تجربه بارهای تناوبی نشان داد که

شد. مقایسه این مقادیر کاهش‌ی نقش استفاده از روکش با سختی مناسب در به حداقل رساندن افت مقاومت زمین تثبیت شده با ستونهای دانه‌ای پس از تجربه بارهای لرزه‌ای به ویژه تحت زلزله‌های بزرگ و پس از وقوع روانگرایی احتمالی را برجسته می‌سازد.

۵- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، با شبیه سازی یک توده خاک سست مسلح شده با ستون دانه‌ای (با و بدون روکش ژئوگریدی) در سلول دستگاه سه محوری،

با ستون دانه‌ای پس از تجربه بارهای لرزه‌ای، به‌ویژه تحت زلزله‌های بزرگ و پس از وقوع روانگرایی احتمالی برجسته نمود.

۶- فهرست علائم

A_r : نسبت جایگزینی مساحت

D : قطر ستون

D_e : قطر معادل

d : اندازه مصالح دانه‌ای

$E_{SI\%}$: مدول تغییرشکل سکانتی در کرنش محوری ۱ درصد

E_{SI} : مدول تغییرشکل سکانتی در سیکل اول

E_{SN} : مدول تغییرشکل سکانتی در سیکل $N^{\text{ام}}$

I_{CSR} : ضریب بهبود نسبت تنش تناوبی (CSR)

I_S : ضریب بهبود سختی

M : ضریب مقیاس بین نمونه اصلی و مدل فیزیکی

M_{csl} : شیب خط حالت بحرانی

R_S : ضریب کاهش سختی

S : فاصله ستون‌ها

δ : شاخص کاهش سختی

منابع

- [1] M. Gu, X. Cai, H. Mo, Q. Wang. "Unconfined compressive behavior of column with geogrid-encased recycled aggregate: Test and simulation." *Construction and Building Materials* 400 (2023): 132528.
- [2] A.R. Ghanizadeh, A. Ghanizadeh, P.G. Asteris, P. Fakharian, D.J. Armaghani. "Developing bearing capacity model for geogrid-reinforced stone columns improved soft clay utilizing MARS-EBS hybrid method." *Transportation Geotechnics* 38(2023): 100906.
- [3] B.K. Pandey, S. Rajesh, S. Chandra. "Time-Dependent Behavior of Embankment Resting on Soft Clay Reinforced with Encased Stone Columns." *Transportation Geotechnics* 36(2022): 100809.
- [4] L. Zhang, L. Wang, A. Zhou, Y. Xu, X. Xia. "Semi-analytical solutions to the consolidation of unsaturated composite ground enforced by stone columns under

استفاده از ستون دانه‌ای، مدول تغییرشکل را تا ۱۷٪ در شرایط بهبود می‌بخشد. حال آن که تسلیح آن توسط روکش ژئوگرید منجر به افزایش ۸۴٪-۴۱٪ در $E_{SI\%}$ شد. در مورد رفتار کوتاه مدت، این بهبود سختی در هنگام استفاده از ستون دانه‌ای و تسلیح آن توسط روکش ژئوگرید به ترتیب ۴۰٪ و ۱۳۳٪-۷۱٪ بود.

• افزایش ۷۳ درصدی مدول تغییرشکل به دلیل افزایش سختی روکش در شرایط کوتاه مدت در مقایسه با افزایش ۱۰۵ درصدی در شرایط بلند مدت نشان می‌دهد که بهبود مدول تغییرشکل به دلیل استفاده از روکش سخت‌تر در صورت گرفتگی ستون‌های دانه‌ای کمتر قابل توجه خواهد بود.

• تغییر شاخص کاهش سختی (δ) در مقابل تعداد سیکل‌های بارگذاری (N) نشان داد که بهسازی زمین سست با ستون دانه‌ای باعث کاهش نشست تجمعی آن در طی بارگذاری متوالی شده است و استفاده از روکش ژئوگریدی زمانی در کاهش نشست تجمعی مؤثر خواهد بود که سختی کششی آن به اندازه کافی بزرگ باشد.

• تفاوت نامحسوس بین اضافه فشار آب منفذی ناشی از بارهای تناوبی در نمونه‌های حاوی ستون دانه‌ای و نمونه‌های حاوی ستون دانه‌ای روکش شده با ژئوگرید نوع ۱ بر ناکارآمدی روکش‌های ژئوگریدی انعطاف‌پذیر جهت به تأخیر انداختن و کاهش درجه روانگرایی در ستون‌های دانه‌ای با امکان گرفتگی تأکید نمود.

• مشخص شد که بهسازی زمین سست با ستون‌های دانه‌ای روکش‌دار نه تنها تغییرشکل زمین ناشی از روانگرایی را کاهش می‌دهد بلکه به طور قابل توجهی منجر به کم‌رنگ شدن تأثیر دامنه بار سیکلی بر تغییرشکل زمین می‌گردد.

• رفتار نمونه‌ها پس از تجربه بارهای تناوبی نشان داد که استفاده از ستون‌های دانه‌ای وابستگی مدول تغییرشکل زمین به تغییرات CSR را کاهش می‌دهد. این وابستگی که در اثر استفاده از روکش با سختی مناسب به حداقل رسید، به این معنی است که استفاده از ستون‌های دانه‌ای روکش‌دار در یک زمین سست می‌تواند وابستگی تغییرشکل زمین به دامنه بارگذاری سیکلیک را به حدی کاهش دهد که ارزیابی تغییرشکل زمین ناشی از بارهای سیکلیک بتواند مستقل از دامنه بارگذاری انجام شود.

• مقایسه ویژگی‌های حالت بحرانی نمونه‌ها، نقش استفاده از روکش با سختی مناسب را در به حداقل رساندن افت مقاومت زمین تثبیت شده

- "Behavior of Floating Stone Columns in Soft Clay: Field Tests and Numerical Analysis." *International Journal of Geomechanics* 25(6) (2025): 04025094.
- [16] S. Pal, K. Deb. "Post-earthquake Reconsolidation Settlement of Stone Column-Treated Liquefiable Sand." *International Journal of Geomechanics* 20(10) (2020): 04020183.
- [17] W. Van Impe, P. Silence. "Improving of the bearing capacity of weak hydraulic fills by means of geotextiles." In *Proceedings of the 3rd international conference on geotextiles*, Vienna, Austria (1986) pp. 1411-1416.
- [18] C.S. Wu, Y.S. Hong. "Laboratory tests on geosynthetic-encapsulated sand columns." *Geotextiles and Geomembranes* 27(2) (2009): 107-120.
- [19] N. Kumar, R. Kumar. "Performance of geosynthetic-encased stone columns in sandy soils subjected to vertical cyclic loads." *International Journal of Geomechanics* 25(1) (2025): 04024323.
- [20] M. Gu, X. Cai, J. Qiu, X. Zhang, D. Han "Dynamic Behavior of Stone Column-Improved Soft Clay under Three-Stage Traffic Loads." *International Journal of Geomechanics* 25(1) (2025): 04024322.
- [21] Z. Xu, L. Zhang, S. Zhou. "Influence of encasement length and geosynthetic stiffness on the performance of stone column: 3D DEM-FDM coupled numerical investigation." *Computers and Geotechnics* 132 (2021):103993.
- [22] L. Tang, S. Cong, X. Ling, J. Lu, A. Elgamal. "Numerical study on ground improvement for liquefaction mitigation using stone columns encased with geosynthetics." *Geotextiles and Geomembranes* 43(2) (2015): 190-195.
- [23] C. Cengiz, E. Güler. "Seismic behavior of geosynthetic encased columns and ordinary stone columns." *Geotextiles and Geomembranes* 46(1) (2018): 40-51.
- [24] C. Cengiz, E. Guler. "Shaking table tests on geosynthetic encased columns in soft clay." *Geotextiles and Geomembranes* 46(6) (2018): 748-758.
- [25] C. Cengiz, E. Guler. "Load bearing and settlement characteristics of Geosynthetic Encased Columns equal strain condition considering smear effect." *Transportation Geotechnics* 31(2021): 100644.
- [5] E. Aghili, I. Hosseinpour, R.J. Chenari, H. Ahmadi. "Behavior of granular column-improved clay under cyclic shear loading." *Transportation Geotechnics* 31(2021): 100654.
- [6] Z. Guetif, M. Bouassida, J.M. Debats. "Improved soft clay characteristics due to stone column installation." *Computers and Geotechnics* 34(2) (2007): 104-111.
- [7] J.A. Black, V. Sivakumar, A. Bell. "The settlement performance of stone column foundations." *Géotechnique* 61(11) (2011): 909-922.
- [8] Y.G. Zhou, K. Liu, Z.B. Sun, Y.M. Chen. "Liquefaction mitigation mechanisms of stone column-improved ground by dynamic centrifuge model tests." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 150 (2021): 106946.
- [9] M. Ghazavi, J.N. Afshar. "Bearing capacity of geosynthetic encased stone columns." *Geotextiles and Geomembranes* 38(2013): 26-36.
- [10] B.K., Pandey, S. Rajesh, S. Chandra. "Performance enhancement of encased stone column with conductive natural geotextile under k0 stress condition." *Geotextiles and Geomembranes* 49(5) (2021): 1095-1106.
- [11] K. Deb, S. Shiyamala. "Effect of Clogging on Rate of Consolidation of Stone Column-Improved Ground by Considering Particle Migration." *International Journal of Geomechanics* 16(1) (2016): 1-10.
- [12] J. Sun, M. Lu, B. Xu, J. Shan. "Consolidation of high replacement ratio stone column-reinforced ground: Analytical solutions incorporating clogging effect." *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 16(8) (2024): 3311-3326.
- [13] S. Pal, K. Deb. "Filtration performance of geotextile encasement to minimize the clogging of stone column during soil liquefaction." *Geotextiles and Geomembranes* 49(3) (2021): 771-788.
- [14] K. Adalier, A. Elgamal. "Mitigation of liquefaction and associated ground deformations by stone columns." *Engineering Geology* 72(3-4) (2004): 275-291.
- [15] N. Rahman, M. Rokonuzzaman, T. Sakai, S. Rahman.

- “Uniaxial compression behavior of geotextile encased stone columns.” *Geotextiles and Geomembranes* 46(3) (2018): 277-283.
- [37] M. Gu, M. Zhao, L. Zhang, J. Han. “Effects of geogrid encasement on lateral and vertical deformations of stone columns in model tests.” *Geosynthetics International* 23(2) (2016): 100-112.
- [38] L. Zhang, Z. Xu, S. Zhou. “Vertical cyclic loading response of geosynthetic-encased stone column in soft clay.” *Geotextiles and Geomembranes* 48(6) (2020): 897-911.
- [39] M. Miranda, A. Da Costa, J. Castro, C. Sagaseta. “Influence of geotextile encasement on the behavior of stone columns: Laboratory study.” *Geotextiles and Geomembranes* 45(1) (2017): 14-22.
- [40] L.Y. Li, S. Rajesh, J.F. Chen. “Centrifuge model tests on the deformation behavior of geosynthetic-encased stone column supported embankment under undrained condition.” *Geotextiles and Geomembranes* 49(3) (2021): 550-563.
- [41] K. Liu, R. Qiu, T. Yan, B. Wu, J. Fan, F. Yue, G. Mei. “Model test of clogging effects on composite foundation of geosynthetic-encased steel slag column.” *Geotextiles and Geomembranes* 50(5) (2022): 858-867.
- [42] K. Ishihara, F. Tatsuoka, S. Yasuda. “Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses.” *Soils and foundations* 15(1) (1975): 29-44.
- [43] X. Mao, M. Fahey. “Behaviour of calcareous soils in undrained cyclic simple shear.” *Géotechnique* 53(8) (2003): 715-727.
- [44] I.M. Idriss, R. Dobry, R.D. Singh. “Nonlinear behavior of soft clays during cyclic loading.” *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 104(GT12) (1978): 1427-1447.
- [45] A.F. Hyde, T. Higuchi, K. Yasuhara. “Liquefaction, cyclic mobility, and failure of silt.” *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 132(6) (2006): 716-735.
- [46] R. Howell, E.M. Rathje, R. Kamai, R. Boulanger. “Centrifuge modeling of prefabricated vertical drains for liquefaction remediation.” *Journal of geotechnical and* under seismic loads.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 136(2020): 106244.
- [26] C. Yoo, Q. Abbas. “Laboratory investigation of the behavior of a geosynthetic encased stone column in sand under cyclic loading.” *Geotextiles and Geomembranes* 48(4) (2020): 431-442.
- [27] V. SivakumarD., McKelvey, J. Graham, D. Hughes. “Triaxial tests on model sand columns in clay.” *Canadian Geotechnical Journal* 41(2) (2004): 299-312.
- [28] J. Xue, Z. Liu, J. Chen. “Triaxial compressive behaviour of geotextile encased stone columns.” *Computers and Geotechnics* 108 (2019): 53-60.
- [29] R.D. Barksdale, R.C. Bachus. “Design and construction of stone columns.” Vol. 1, report no. FHWA/RD-83/026, National technical information service, Springfield, Virginia (1983).
- [30] N.P. Balaam, J.R. Booker. “Analysis of rigid rafts supported by granular piles.” *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics* 5(4) (1981): 379-403.
- [31] D. Muir Wood, W. Hu, D.F.T. Nash. “Group effects in stone column foundations: model tests.” *Geotechnique* 50(6) (2000): 689-698.
- [32] S. Rajesh. “Time-dependent behaviour of fully and partially penetrated geosynthetic encased stone columns.” *Geosynthetics International* 24(1) (2017): 60-71.
- [33] M. Hasan, N.K. Samadhiya. “Performance of geosynthetic-reinforced granular piles in soft clays: Model tests and numerical analysis.” *Computers and Geotechnics* 87(2017): 178-187.
- [34] Y. Zhou, G. Kong. “Deformation analysis of a geosynthetic-encased stone column and surrounding soil using cavity-expansion model.” *International Journal of Geomechanics* 19(5) (2019): 04019036.
- [35] M. Gu, J. Han, M. Zhao. “Three-Dimensional DEM Analysis of Axially Loaded Geogrid-Encased Stone Column in Clay Bed.” *International Journal of Geomechanics* 20(3) (2020): 04019180.
- [36] J.F. Chen, X.T. Wang, J.F. Xue, Y. Zeng, S.Z. Feng.

- [48] Y.Y. Ko, C.H. Chen. "On the variation of mechanical properties of saturated sand during liquefaction observed in shaking table tests." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 129 (2020): 105946.
- geoenvironmental engineering 138(3) (2012): 262-271.
- [47] S.M.R. Hosseini, S.A. Naeini, M. Hassanlourad. "Monotonic, cyclic and post-cyclic behaviour of an unsaturated clayey soil." *International Journal of Geotechnical Engineering* 11(3) (2017): 225-235.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Yazdandoust, A. Bastami, *Investigating the effect of clogging in a granular column on the cyclic and post-cyclic behavior of soft ground improved with it, Amirkabir J. Civil Eng., 57(7) (2025) 1113-1138.*

DOI: [10.22060/ceej.2025.22284.7945](https://doi.org/10.22060/ceej.2025.22284.7945)

