

**B. Mehdipour**

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

**e-mail:** zipaton@yahoo.com

**B. Nadi\***

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

**e-mail:** nadi@pci.iaun.ac.ir

**H. Hashemalhosseini**

Civil Engineering Group,  
Isfahan university of  
technology, Isfahan, Iran.

**e-mail:** hamidh@cc.iut.ac.ir

**M. Mirmohammadsaegh**

Departeman of Water and  
Natural Environment, Isfahan  
Higher Education and  
Research Institute (IHEARD);  
Mimistry of Energy, Isfahan,  
Iran.

**e-mail:** Msadeghi84@yahoo.com

## Laboratory Study of Reinforce Slop Behavior in Unsaturated Conditions

*Construction of road foundations or embankments on soft soil bed, due to bearing capacity, usually causes bed rupture with high subsidence. Soil reinforcement using geocell has been proposed by various researchers as a suitable solution. In the present study, experiments have been performed to investigate the behavior of armed slopes by changing the geocell position as well as the change in the percentage of soil moisture. A total of seven laboratory samples were designed and built, and the test program was designed according to two variables. These two variables are reinforcement (geocell) and moisture content. For moisture content, the values of 10%, 15%, and 20% were considered, and the geocell was examined in both the middle, and end modes of the work. The results show the positive performance of Geocell in increasing shear strength, load-bearing and flexural strength, and finally reducing displacement and increasing gable stability. The positive effect of geocell presence can be expressed according to the triple action mechanism of geocell in the reinforced soil mass. The results show that with increasing soil suction with the location of the geocell layer is constant, the displacement changes are reduced by about thirty percent, but by changing the location of the geocell layer ( $u/h=1$  to  $u/h=0.5$ ) in constant moisture, the amount decreases. Settlement and displacement is about fifteen percent.*

**Keywords:** Unsaturated soil, slop, geocell, physical model.

---

\* Corresponding author

Received 06 March 2021, Revised 28 March 2021, Accepted 06 April 2021.

DOI: 10.22091/cer.2021.6444.1234

## مطالعه آزمایشگاهی رفتار شیروانی مسلح شده در شرایط غیراشباع

ساخت پی یا خاکریز جاده بر روی بستر خاک نرم، به علت کم بودن ظرفیت باربری معمولاً سبب بروز گسیختگی بستر توأم با نشست زیاد می‌گردد. تسلیح خاک با استفاده از ژئوسل به عنوان یک راه حل مناسب توسط محققین مختلف ارائه شده است. در پژوهش حاضر به منظور بررسی رفتار شیروانی مسلح با تغییر جایگاه ژئوسل و همچنین تغییر در درصد رطوبت خاک آزمایش‌هایی انجام شده است. در مجموع، هفت نمونه آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده که برنامه آزمایش‌ها با توجه به دو متغیر طراحی شده‌اند. این دو متغیر عبارتند از مسلح کننده (ژئوسل) و درصد رطوبت. برای درصد رطوبت مقادیر ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ در نظر گرفته شد و ژئوسل در دو حالت میانی ( $u/h=0.5$ ) و انتهایی شیروانی ( $u/h=1$ ) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده تأثیر مثبت وجود ژئوسل را با توجه به مکانیزم عملکرد سه‌گانه ژئوسل در توده خاک مسلح، بیان می‌کند. از نتایج به دست آمده اینگونه تعبیر می‌گردد که با افزایش مکش خاک و ثابت بودن محل قرارگیری لایه ژئوسل، تغییرات جابه‌جایی در حدود ۳۰ درصد کاهش یافته، اما با تغییر محل لایه ژئوسل ( $u/h=0.5$  به  $u/h=1$ ) در رطوبت ثابت مقدار کاهش نشست و جابه‌جایی شیروانی در حدود ۱۵ درصد می‌باشد.

واژگان کلیدی: خاک غیراشباع، شیروانی، ژئوسل، مدل فیزیکی.

### بهنام مهدی پور

گروه مهندسی عمران، واحد  
نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی،  
نجف‌آباد، ایران.  
پست الکترونیک:  
zipaton@yahoo.com

### بهرام نادی\*

گروه مهندسی عمران، واحد  
نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی،  
نجف‌آباد، ایران.  
پست الکترونیک:  
nadi@pci.iu.ac.ir

### حمید هاشم‌الحسینی

گروه مهندسی عمران، دانشگاه  
صنعتی اصفهان، ایران.  
پست الکترونیک:  
hamidh@cc.iut.ac.ir

### مسعود میرمحمدصادقی

گروه آب و محیط‌زیست، مجتمع  
عالی آموزشی و پژوهشی صنعت  
آب و برق اصفهان، وزارت نیرو،  
اصفهان، ایران.  
پست الکترونیک:  
Msadeghi84@yahoo.com

### ۱- مقدمه

در خاک قرار می‌گیرند. این نوع مسلح کننده از مصالح انعطاف‌پذیر و نیمه انعطاف‌پذیر نظیر ژئوتکستایل‌ها یا ژئوگریدها ساخته می‌شوند. یکی از نخستین مطالعات در مورد استفاده از ژئوسل‌ها توسط مهندسين ارتش آمریکا در سپتامبر ۱۹۷۵ به منظور بررسی امکان ساخت پل روی زمین نرم انجام شد. آنها با انجام آزمایش‌های مختلف گزارش نمودند که ماسه محصور شده توسط ژئوسل،

در تسلیح خاک با مسلح کننده سه بعدی (ژئوسل)،  
المان‌های تسلیح به صورت عمودی و به شکل لانه زنبوری

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۶، بازنگری: ۱۴۰۰/۰۱/۰۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۱۷.  
DOI: 10.22091/cer.2021.6444.1234 شناسه دیجیتال

قابلیت خوبی در افزایش باربری زمین‌ها و در نتیجه کاهش تغییرشکل‌های بستر دارند.

ژئوسل ساختاری سه بعدی، پلیمری و لانه زنبوری از سلول‌های به هم پیوسته است و برای تسلیح بستر شیب‌های تند و سایر مواردی که خاک متحمل تنش‌های کششی بالا می‌شود، مفید ارزیابی شده است. خاک درون ژئوسل مانند یک دال نیمه صلب عمل می‌کند، فشار پی را در مساحت بیشتری به خاک زیرین توزیع کرده و نشست و تنش را کاهش می‌دهد [۱ و ۲].

چن<sup>۱</sup> و همکاران رفتار دیوار مسلح شده با ژئوسل تحت فشار سربار را بررسی نمود. در این تحقیق، لایه ژئوسل بر روی پوسته شیروانی به کار گرفته شده بود که نتایج نشان می‌دهد استفاده از مسلح کننده ژئوسل باعث کاهش مقدار نشست و تغییرمکان دیوار مسلح شده می‌گردد. این امر ناشی از نیروی کششی شکل گرفته میان مسلح کننده و خاک می‌باشد. با افزایش مقدار فشار سربار، مقدار نیروی بسیج شده نیز افزایش می‌یابد. همچنین ناحیه مسلح شده به صورت قابل ملاحظه‌ای بر تغییرشکل دیوار تأثیرگذار می‌باشد. وقتی از لایه مسلح کننده در قسمت بالای دیوار استفاده می‌شود، مقدار تغییرشکل جانبی دیوار کاهش یافته و مقدار حداکثر تغییرشکل جانبی، در نیمه ارتفاع دیوار شکل می‌گیرد. زمانی که مسلح کننده در قسمت پایین دیوار قرار گرفته، حداکثر جابه‌جایی و تغییرمکان در بالای دیوار رخ می‌دهد [۳].

شین<sup>۲</sup> و همکاران به بررسی عملکرد خاک مسلح شده توسط ژئوسل با انجام مدل فیزیکی پرداختند. آنالیز عملکرد تنشی و برشی خاک تحت بار استاتیکی با ایجاد تغییرات در خواص ژئوسل مصرفی در مدل فیزیکی از اهداف آنان در طی آزمایش بود. مقایسه بین نمونه‌ای مورد آزمایش با بارگذاری‌های مختلف نشان می‌دهد که در خاک مسلح شده بیشترین تنش برشی خاک نسبت به

حالت غیرمسلح خاک تا ۶۰ درصد کاهش یافته که منجر به پراکنده شدن تنش‌های برشی جزئی در اطراف پی می‌شود. البته استفاده از ژئوسل با طول‌های بیشتر با ثابت بودن عرض آن تأثیر بسزایی در حفظ انسجام خاک مسلح شده دارد. همچنین در تعیین مکانیزم گسیختگی خاک زاویه برش خاک مسلح شده تقریباً ۱۵ درصد بیشتر از حالت غیرمسلح می‌باشد [۴].

آردا و فرساخ<sup>۳</sup> به بررسی اثر تعداد لایه مسلح کننده در فواصل متفاوت پرداختند. نتایج نشان داد که تأثیر لایه دوم تسلیح بر پایداری نمونه، ناچیز بوده (کمتر از ده درصد) و رفتار بستر با دو لایه ژئوسل، مشابه رفتار آن با یک لایه تسلیح است. در این حالت، فشار منتقل شده از لایه اول ژئوسل در لایه غیرمسلح بین دو لایه ژئوسل حبس می‌گردد و عملاً کارایی لازم را ندارد. همچنین آنها شبکه گسیختگی بین دو لایه متوالی را کمتر از نیم برابر بعد پی توصیه کرده‌اند [۵].

محققان پارامترهای مختلفی نظیر شکل سلول‌های ژئوسل مدول الاستیسیته مصالح ژئوسل و تعداد لایه‌های ژئوسل را در یک بارگذاری دایره‌ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان داد که شکل دایره‌ای مسلح کننده دارای بازده بیشتر نسبت به شکل بیضوی برای روزه‌های ژئوسل دارد. همچنین بازدهی مسلح کننده ژئوسل به مقدار سختی مصالح شکل‌دهنده ژئوسل بستگی داشته به طوری که با افزایش مقدار مدول الاستیسیته مقدار سختی و ظرفیت باربری سیستم افزایش و تغییرمکان شیروانی کاهش می‌یابد [۶].

ونکاتس و هگ<sup>۴</sup> با انجام ۳۸ آزمایش بزرگ مقیاس و تأثیر یک و دو لایه‌های ژئوگرید و ژئوسل در گودالی به ابعاد دو متر در دو متر به بررسی لایه ژئوسل بر پایداری نمونه پرداختند. نتایج به دست آمده دامنه جابه‌جایی ارتعاش در حضور ژئوسل به طور قابل توجهی کاهش

<sup>3</sup>- Ardah and Farsakh

<sup>4</sup>- Venkates and Hegde

<sup>1</sup>- Chen

<sup>2</sup>- Shin

کاهش در نشست پی برای حالت تسلیم با ژئوسل، بیشتر از تسلیم با ژئوتکستایل است [۹].

با تحلیل مطالعات پیشین، لزوم بررسی ژئوسل در ترازهای مختلف خاکریز و تعداد لایه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. بر همین اساس، در پژوهش حاضر، به بررسی اثر رطوبت و نحوه قرارگیری لایه‌های ژئوسل در ترازهای متفاوت بر پایداری شیروانی تحت بارگذاری استاتیکی پرداخته شده است.

## ۲- برنامه آزمایش‌ها

برای مطالعه مسائل ژئوتکنیکی از طریق مدل‌سازی سازه ژئوتکنیکی، چهار روش مدل‌سازی فیزیکی، عددی، تحلیلی و آمار و احتمالاتی وجود دارد. پس از طرح یک مساله ژئوتکنیکی، مهمترین گام، انتخاب روش تحقیق مناسب است. مسائل مختلفی در شاخه‌های گوناگون مهندسی با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی مطالعه شده‌اند. همچنین استفاده از مدل فیزیکی سابقه‌ای طولانی در تحقیقات و همچنین مطالعات مهندسی در پروژه‌های مختلف دارد. مزیت مدل‌سازی فیزیکی نسبت به مدل‌های تحلیلی و عددی، عدم لزوم فرض کردن سازوکار خاص برای گسیختگی است. همچنین در مدل‌سازی فیزیکی لازم نیست رفتاری خاص برای مصالح خاکی یا سایر مصالح فرض شود. بنابراین مدل‌های فیزیکی از این دیدگاه که خاک یا سایر مصالح واقعی را به کار می‌برند، نسبت به مدل‌های تحلیلی و عددی ارجحیت دارند. مدل‌های فیزیکی قادرند که مسائل سه‌بعدی را مانند مسائل دوبعدی به سادگی مدل کنند؛ اما مدل‌های تحلیلی و عددی در شرایط سه‌بعدی نیازمند تحقیقات بیشتری هستند [۱۰].

برای انجام آزمایش محفظه‌ای به طول یک متر، عرض ۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. دیواره‌های طولی مدل با استفاده از ورق پلکسی گلاس به ضخامت ۱ سانتی‌متر ساخته شده است

می‌یابد. بیشترین کاهش در حضور تقویت کننده ژئوسل در مقایسه با سایر شرایط مشاهده می‌شود. همچنین مشاهده شد در حضور تقویت کننده ژئوسل، دامنه تشدید ۶۱ درصد کاهش می‌یابد [۷].

پژوهشگران به بررسی دیوار حائل مسلح شده با ژئوسل تحت بار زلزله پرداختند. نتایج از کار آزمایشگاهی با نتایج به دست آمده از تعادل حدی در حالت شبه استاتیکی مقایسه شده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که خط لغزش بحرانی در هر دو حالت تطابق خوبی با یکدیگر دارد و همچنین استفاده از مسلح کننده ژئوسل به صورت قابل ملاحظه سبب بهبود عملکرد دیوار مسلح شده (از لحاظ افزایش ضریب اطمینان و پایداری) می‌گردد. همچنین آنها در ادامه به بررسی عملکرد دیوار حائل مسلح شده با ژئوسل و ژئوگرید تحت بار زلزله پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از لایه ژئوسل در قسمت بالایی دیوار حائل می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای از توسعه سطح لغزش بحرانی جلوگیری کند؛ در حالی که بقیه لایه‌های ژئوسل و ژئوگرید در بهبود عملکرد دیوار تأثیر بسزایی دارند. بیشترین مقدار تنش کششی بسیج شده لایه ژئوگرید مربوط به آخرین لایه ژئوگرید بوده که در پایین‌ترین قسمت دیوار حائل قرار گرفته است. نتایج مؤید آن است زمانی که از شن برای پرکردن چشمه‌های مسلح کننده‌های ژئوسل استفاده شده، دیوار حائل دارای نشست کمتری از حالت ماسه‌ای است؛ در حالی که مقدار جابه‌جایی و تغییر شکل دیوار در هر دو حالت یکسان است [۸].

مقدس تفرشی و همکاران با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی به بررسی مقایسه رفتار توده مسلح شده با مسلح کننده صفحه‌ای (ژئوتکستایل) و مسلح کننده سه بعدی خاک (ژئوسل) تحت بارهای استاتیکی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که برای مقادیر یکسان از مصالح مصرفی برای مسلح کننده‌ها، افزایش در ظرفیت باربری و



شکل ۱- دستگاه ترانسفورماتور

ابزار مذکور یک دستگاه ثبت داده استاتیکی بوده و قادر به اندازه‌گیری داده‌ها در واحدهای زمانی ۱ ثانیه می‌باشد. این دستگاه به‌طور کامل با رایانه کنترل می‌شود و کلیه اندازه‌گیری‌های آنالوگ در آن تبدیل به داده‌های دیجیتال می‌گردد. همراه این دستگاه، نرم‌افزاری تحت عنوان TDS\_7130 ارائه گردیده است که دستگاه ثبت داده را کنترل می‌کند.

#### ۲-۱- مشخصات مصالح

خاک مورد مطالعه در این تحقیق به‌صورت ترکیبی از ماسه و رس می‌باشد. خاک ماسه مورد استفاده از شرکت ماسه ریخته‌گری ایران تهیه شده که از جنس سیلیس می‌باشد و از معدن سنگ سیلیس فیروزکوه تهیه شده است. این خاک کاملاً درشت‌دانه بوده و اندازه تمامی دانه‌های آن بزرگتر از  $0.075$  میلی‌متر می‌باشد. خاک رس مورد مطالعه از نوع کائولینیت انتخاب شده است. کائولینیت عمدتاً در صنایع ساخت ظروف چینی به‌کار برده می‌شود و از مواد معدنی شامل  $Al_2O_3$ ،  $Fe_2O_3$  و  $SiO_2$  تشکیل شده است.

مصالح ترکیبی این تحقیق شامل ۶۰ درصد ماسه و ۴۰ درصد کائولینیت بوده که به‌صورت درصد وزنی و در حالت کاملاً خشک با یکدیگر ترکیب شده‌اند (شکل ۲). آزمایش‌های محدود روانی بر روی ترکیب ماسه و کائولینیت مطابق استاندارد ASTM D-4318 انجام شده است، با تکرار این آزمایش‌ها مقادیر حدود روانی و خمیری به ترتیب برابر  $23/5$  و  $14$  محاسبه شده‌اند، در

تا امکان رؤیت نحوه انتشارگسیختگی خاک از طریق آن وجود داشته باشد. همچنین به منظور حفظ صلبیت و جلوگیری از خم شدن احتمالی صفحات، تسمه‌هایی فولادی به قاب‌های فلزی جوش داده شده است. ابعاد انتخاب شده برای تحلیل شیروانی براساس ضرابی است که برای طول و ارتفاع و عمق شیروانی در مراجع [۱۱] و [۱۲] تعریف شده است. در شرایط متفاوت از این ابعاد، نتایج حاصل دور از مقادیر حقیقی می‌باشد. البته باکس مورد استفاده برای شرایط مرطوب مناسب نبوده که توسط مواد و محافظ‌های شیمیایی موجود آب‌بند گردید. برای اندازه‌گیری تغییرمکان ایجاد شده از دستگاه LVDT<sup>۵</sup> (ترانسفورماتور تفاضلی متغیر خطی) استفاده می‌شود. ترانسفورماتور LVDT نوعی ترانسفورماتور برقی است که برای اندازه‌گیری جابه‌جایی خطی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ابزارها در اندازه‌گیری‌های استاتیکی و دینامیکی از دقت بالایی برخوردار می‌باشند. نمونه ظاهری LVDT در شکل ۱ نشان داده شده است که با گیره به پایه وصل شده و به وسیله آهنربا به بدنه جعبه متصل می‌شود تا شاخص آن به صورت قائم قرار گیرد. دستگاه LVDT از طریق سیم رابط به دستگاه ثبت داده متصل شده و تغییرمکان قرائت شده از این طریق ثبت می‌گردد. در این پژوهش از دو LVDT برای اندازه‌گیری جابه‌جایی (از نوع CDP-100 با ظرفیت اندازه‌گیری ۱۰۰ میلی‌متر) یکی بر روی شیب شیروانی و دیگری سطح افقی شیروانی استفاده شده است.

ثبت کننده داده<sup>۶</sup> و وسیله‌ای الکترونیکی است که داده‌هایی را که به وسیله حسگرهای تعبیه شده در دستگاه یا ابزار و حسگر خارجی تأمین می‌شوند، ذخیره می‌کند. در مطالعه حاضر، از دستگاه TDS-602 محصول شرکت Tokyo sokki kenkyujo ژاپن استفاده شده است.

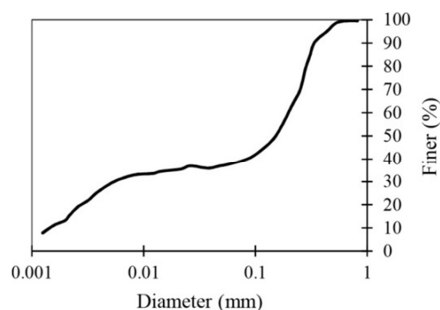
<sup>۵</sup>- linear variable differential transformer

<sup>۶</sup>- Data Logger



شکل ۳- تست کشش ژئوسل

نتیجه پلاستیسیته خاک ترکیبی ۹/۵ می باشد. مقدار چگالی ویژه دانه های خاک ترکیبی ۲/۷۳ است [۱۳].



شکل ۲- نمودار دانه بندی ترکیب ماسه و کائولینیت

تمامی مراحل تست مانند پارامترهای ورودی نمونه، روش تست، گزارش تست، کنترل حرکت دستگاه و نشان دادن مقادیر ابزارهای اندازه گیری همگی توسط نرم افزار صورت می گیرد. استاندارد ASTM-D 6693 با عنوان روش آزمایش استاندارد برای مشخصات کششی ژئوسلها برای انجام این آزمایش استفاده گردیده است. مشخصات کششی به دست آمده از این آزمایش برای تعیین مشخصات مواد با هدف کنترل و تشخیص دارای اعتبار است [۱۴].

### ۲-۲- آزمایش های انجام شده بر روی ژئوسل

برای به دست آوردن خصوصیات کششی مواد استفاده شده برای ساخت ژئوسل از دستگاه تست مواد GOTECH ساخت تایوان مدل MB ۵۰۰ با ظرفیت ۲ تن استفاده شده است (شکل ۳).

دستگاه های تست مواد سری MB برای تست آسان و دقیق مواد با هزینه کم طراحی شده اند. همراه این دستگاه، نرم افزار MB Controller ارائه شده است که قادر است دستگاه را کنترل کرده و مقادیر ثبت شده توسط ابزارهای اندازه گیری آن را نشان دهد (جدول ۱).

جدول ۱- مشخصات مواد تشکیل دهنده ژئوسل

مدول سکانتی در کرنش ۲ درصد (kN/m)	مدول خمشی نهایی (MPa)	درصد کرنش در مقاومت نهایی (%)	نیروی کششی نهایی (kN/m)	دانسیته (gr/cm <sup>3</sup> )
۱۰/۷۲	۵۹۵	۳۴/۸	۲۷/۱	۱/۳۸

برخی از پارامترهای مقیاس مصالح ژئوسنتتیکی که توسط ویسوندهام و کونینگ<sup>۷</sup> مطرح شده اند در جدول ۲ آمده است (N بعد مقیاس است).

### ۳- نمونه های مورد بررسی

برنامه آزمایشها با توجه به دو متغیر، طراحی شد. این دو متغیر عبارت از مسلح کننده (ژئوسل) و درصد

انتخاب مقیاس مدل می بایست به گونه ای باشد که نیروهای غالب در پدیده مورد بررسی، به درستی مدل شده و نیروهایی که در نمونه اصلی تأثیر زیادی ندارند، در مدل نیز تأثیر زیادی نداشته باشند. با تشابه سازی مناسب، نتایج حاصل از مدل قابل تعمیم به نمونه واقعی نیز خواهد بود [۱۵].

7- Viswandham Konig

رطوبت می‌باشند. در مورد درصد رطوبت نیز مقادیر ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد در نظر گرفته شدند.

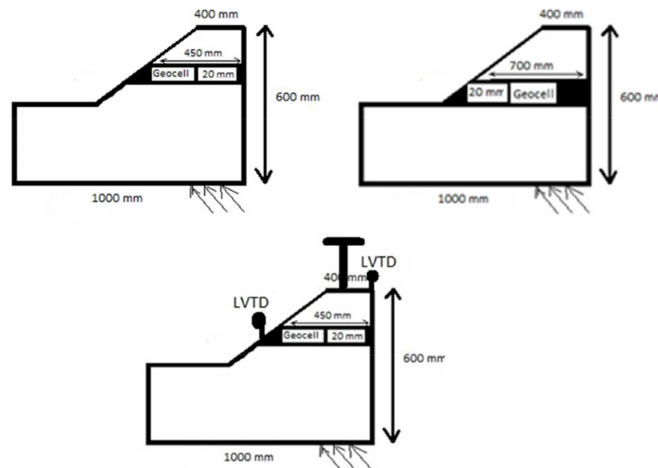
جدول ۲- تحلیل ابعادی ژئوسنتیک [۱۶]

پارامتر	کرنش (%)	طول	سختی محوری (EA)	مقاومت کششی	سختی خمشی (EI)
مقیاس	۱	۱/N	۱/N <sup>3</sup>	۱/N <sup>2</sup>	۱/N <sup>5</sup>

به‌دست آمده پارامترهای موجود به‌صورت بدون بعد برحسب ارتفاع شیروانی بیان شده‌اند: نسبت عمق ژئوسل برای لایه مسلح سازی شده به ارتفاع شیروانی ( $u/H$ ). جهت اعمال نیرو، جک با ظرفیت ۲ تن استفاده شده است. این جک از پایین به نمونه متصل بوده و باعث اعمال نیرو به فضای ایجاد شده می‌گردد. از آنجا که هدف از انجام آزمایش‌های انجام شده بررسی اثر رطوبت بر پایداری شیروانی و همچنین تعیین مقدار جابه‌جایی با ایجاد تغییرات در جابجاشت لایه ژئوسل ( $0.5$  و  $u/h=1$ ) می‌باشد، در طول آزمایش فواصل چشمه‌های ژئوسل و نسبت پی به ضخامت ژئوسل ثابت لحاظ شده است (شکل ۴).

همچنین درصد رطوبت‌های ذکر شده یکبار شیروانی در شرایط مسلح شده با ژئوسل و بار دیگر در شرایط غیرمسلح مورد آزمایش قرار گرفته است. برای درصد رطوبت ۱۵ و ۱۰، یکبار لایه ژئوسل در مرکز شیروانی و یکبار در شروع شیروانی قرار می‌گیرد. بنابراین در مجموع، تعداد ۷ آزمایش انجام شده است.

دو حالت کلی برای قرارگیری لایه ژئوسل با درصد متفاوت رطوبت در نظر گرفته شده است. پارامترهای مورد بررسی به منظور تأثیر مسلح کننده ژئوسل بر جابه‌جایی و سطوح گسیختگی عبارتند از:  $u$  عمق قرارگیری لایه ژئوسل از تراز بالای شیروانی،  $H$  ارتفاع شیروانی،  $L$  طول ژئوسل،  $D$  فواصل چشمه ژئوسل. برای ساده‌سازی نتایج



شکل ۴- ابعاد مدل و نحوه قرارگیری ژئوسل

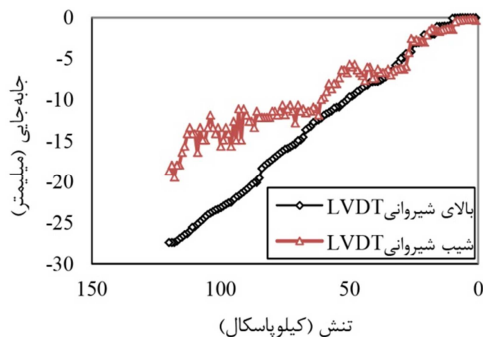
از نرم‌افزار RETC برای به‌دست آوردن منحنی مشخصه آب خاک<sup>۸</sup> استفاده شد. این نرم‌افزار توسط

لایه ژئوسل در ابتدای شیروانی و میانه شیروانی قرار گرفته و تمام عرض مدل را پوشانده است. فواصل چشمه‌های ژئوسل پنج سانتیمتر می‌باشد (شکل ۵).

<sup>8</sup>- soil-water characteristic curve (SWCC)

۳-۱- شیروانی با درصد رطوبت ۲۰ در حالت مسلح نشده (a<sub>0</sub>)

a<sub>0</sub> شامل آزمایش بر روی شیروانی مسلح نشده است. هدف از انجام این آزمایش، به دست آوردن مبنایی برای مقایسه با حالت‌های مسلح شده است (شکل ۷).



شکل ۷- جاب‌جایی در شرایط غیرمسلح با درصد رطوبت ۲۰

دلیل انتخاب رطوبت ۲۰ درصد به عنوان حد بالا این است که اغلب خاک‌های درشت‌دانه در شرایط محلی در درصد رطوبت بالای ۲۰ درصد در شرایط تقریباً اشباع قرار می‌گیرند. ضمن اینکه به دلیل عدم آب‌بندی بودن مخزن خاک، امکان رسیدن به درصد‌های رطوبت و اشباع بالاتر، دشوار بود. در جدول ۳ تعداد آزمایش‌های انجام شده نشان داده شده است. لازم به ذکر است که هر یک از آزمایش‌ها ۲ بار تکرار شده است.

۳-۲- شیروانی مسلح شده با ژئوسل درصد رطوبت ۲۰ (a<sub>1</sub>)

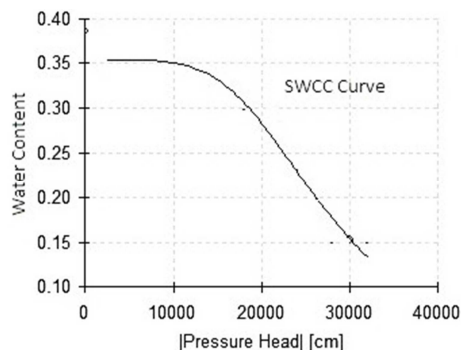
بر اساس نتایج به دست آمده در شکل ۸ می‌توان بیان کرد، زمانی که تنش قائم به یک لایه ژئوسل و خاک داخل آن به عنوان یک لایه مرکب انتقال می‌یابد، ساختار سه بعدی ژئوسل به صورت حلقوی ضمن جلوگیری از حرکت مفرط دانه‌های خاک به اطراف، باعث افزایش مقاومت برشی لایه می‌گردد. این عملکرد به لایه ژئوسل اجازه می‌دهد تا به جای انتقال مستقیم بار به بستر و زیر سطح بارگذاری، با ایجاد یک دال یکنواخت، همانند یک

آزمایشگاه پژوهش ایالات متحده (USSL<sup>۹</sup>) وابسته به سرویس پژوهش کشاورزی USDA<sup>۱۰</sup> (USDA-ARS) برای برآورد پارامترهای مدل‌های رایج منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی خاک تهیه شده که به مفهوم منحنی نگهداشت<sup>۱۱</sup> آب- خاک می‌باشد.



شکل ۵- مدل شیروانی ساخته شده

این برنامه از توابع انتقالی با ماهیت شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده می‌کند. اساس این برنامه استفاده از مدل‌های بروکس و کوری و ون‌گنیختن برای منحنی نگهداشت رطوبتی خاک و مدل‌های بردین و معلم برای برآورد هدایت هیدرولیکی می‌باشد [۱۷]. براساس خاک ماسه رسی و مدل ون گنیختن تحلیل‌ها در نرم‌افزار انجام شده و منحنی ایجاد می‌گردد (شکل ۶).



شکل ۶- منحنی مشخصه آب- خاک

<sup>۹</sup>- US Science Laboratory

<sup>۱۰</sup>- U.S. Department of Agriculture's Agricultural Research Service

<sup>۱۱</sup>- Retention Curve



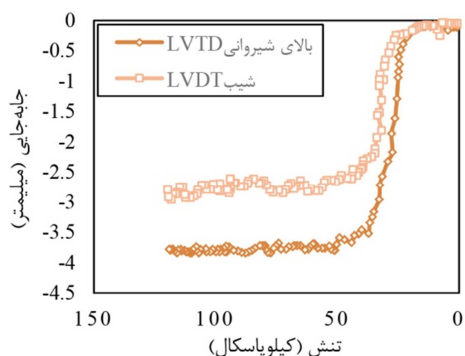
پی گسترده بار وارده را به سطح وسیع‌تری در زیر خود پخش نماید و موجب افزایش ظرفیت باربری بستر گردد.

جدول ۳- آزمایش‌های انجام شده در طی پژوهش

درصد رطوبت	قرارگیری ژئوسل (u/H)	طول ژئوسل (cm)	آزمایش
۲۰٪	---	---	مسلح نشده $a_0$
۲۰٪	۱	۷۰	مسلح شده $a_1$
۲۰٪	۰/۵	۴۵	مسلح شده $a_2$
۱۵٪	۱	۷۰	مسلح شده $b_1$
۱۵٪	۰/۵	۴۵	مسلح شده $b_2$
۱۰٪	۱	۷۰	مسلح شده $c_1$
۱۰٪	۰/۵	۴۵	مسلح شده $c_2$

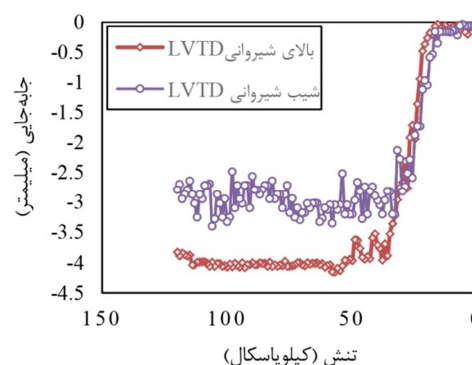
(حداکثر نشست در حالت مسلح حدود ۵۷٪ نشست در حالت غیرمسلح است).

همچنین با توجه به شکل ۹، جابه‌جایی خاک در حالت مسلح بسیار کمتر از حالت غیرمسلح می‌باشد (حداکثر مقدار جابه‌جایی شیب در حالت مسلح حدود ۳۸٪ تورم در خاک غیرمسلح است). در واقع کم شدن جابه‌جایی نشان‌دهنده تأثیر ژئوسل در کنترل گسیختگی برشی کلی می‌باشد، زیرا خاک دچار گسیختگی برشی می‌شود و این گسیختگی خود را به صورت تغییر شکل و جابه‌جایی در خاک نشان می‌دهد. در حالت خاک مسلح به ژئوسل، بارگذاری قائم منجر به ایجاد شدن تنش‌های جانبی قابل توجه در دیواره ژئوسل می‌شود و این امر منجر به کاهش برش و در نتیجه کاهش تورم خاک می‌شود.



شکل ۹- جابه‌جایی در شرایط مسلح با درصد رطوبت ۲۰٪ ( $a_2$ )

براساس شکل ۱۰، نتایج حاصل در مجموع، نشان‌دهنده کارایی مثبت ژئوسل در افزایش مقاومت



شکل ۸- جابه‌جایی در شرایط مسلح با درصد رطوبت ۲۰٪ ( $a_1$ )

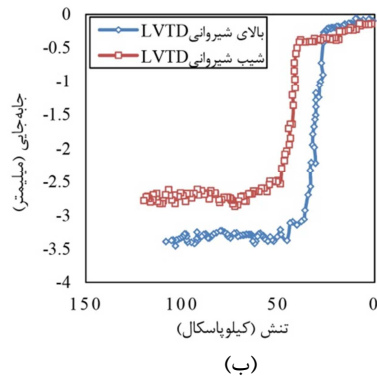
### ۳-۳- شیروانی مسلح شده با ژئوسل در درصد رطوبت ۲۰٪ ( $a_2$ )

شایان ذکر است که با افزایش عمق قرارگیری ژئوسل، جابه‌جایی نشان داده شده در LVTD افزایش می‌یابد. این افزایش را می‌توان از یک طرف به افزایش پوشش مناسب خاک روی ژئوسل و جلوگیری از انتقال مستقیم تنش به دیواره ژئوسل و از طرف دیگر به پخش و انتقال یکنواخت‌تر تنش به ژئوسل نسبت داد. این مطلب توسط محققین دیگر نیز گزارش شده است. آنها بیان نمودند که خاک بالای لایه تسلیح، سربار مورد نیاز برای تولید اصطکاک کافی بین مسلح کننده و خاک را فراهم نمی‌نماید [۱۸-۲۱].

همانطور که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود، نشست حداکثر در حالت مسلح کمتر از حالت غیرمسلح می‌باشد

با افزایش مکش بافتی در عمق قرارگیری مشابه لایه ژئوسل، جابه‌جایی‌های نشان داده شده توسط LVTD روندی نزولی را نمایش می‌دهد. در حالی که با توجه به شکل ۱۱-ب در رطوبت مشابه، زمانی که لایه ژئوسل از  $u/h=0.5$  به  $u/h=1$  می‌رسد، جابه‌جایی‌های نمایش داده شده در بستر و شیب شیروانی روندی صعودی در پیش می‌گیرند.

در واقع با افزایش عمق قرارگیری ژئوسل در رطوبت یکسان، شاهد افزایش جابه‌جایی و کاهش مقاومت خاک می‌باشیم. هرچند کاهش رطوبت با ژئوسل یکسان، باعث کاهش جابه‌جایی تا ۲۸ درصد خواهد شد. نتایج شکل ۱۲، نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه تسلیح با لایه‌های ژئوسل بر کاهش نشست پی، افزایش ظرفیت باربری آن و کاهش فشار منتقل شده به لایه‌های پایینی بستر می‌باشد.



شکل ۱۱- جابه‌جایی در شرایط مسلح با رطوبت ۱۵ درصد، (الف)  $b_1$  و (ب)  $b_2$

۳-۵- شیروانی مسلح شده با ژئوسل درصد رطوبت ۱۰  
( $c_1, c_2$ )

در نمونه سوم ماسه رس‌دار با ۱۰ درصد رطوبت تحت آزمایش قرار گرفته و نتایج جابه‌جایی در شکل ۱۳-الف مشخص می‌باشد. با توجه به نتایج فوق می‌توان گفت که لایه تسلیح با گسترش سطح بار براساس عملکرد یکپارچه توده مرکب ژئوسل و خاک درون آن، موجب کاهش تنش در لایه زیرین خود می‌گردد. این امر موجب

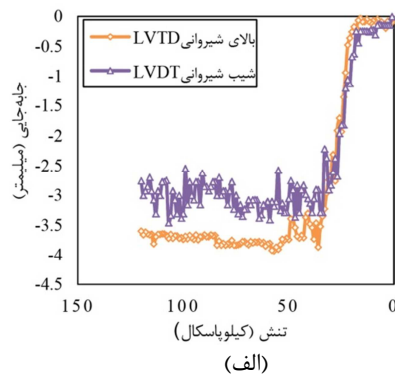
برشی، باربری و خمشی و در نهایت کاهش جابه‌جایی و افزایش پایداری شیروانی می‌باشد.



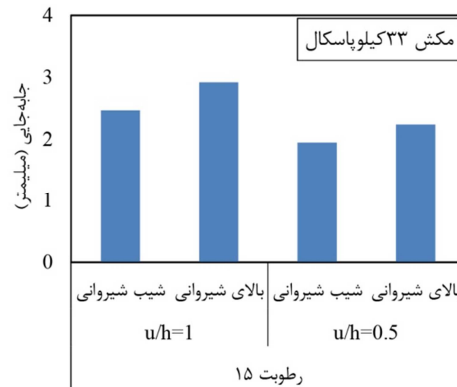
شکل ۱۰- نمودار مقایسه‌ای جابه‌جایی به درصد رطوبت ۲۰

۳-۴- شیروانی مسلح شده با ژئوسل درصد رطوبت ۱۵  
( $b_1, b_2$ )

کاهش رطوبت نمونه در جایگاه مشابه قرارگیری لایه ژئوسل، باعث کاهش جابه‌جایی تا حدود ۲۴ درصد می‌گردد. همانطور که در شکل ۱۱-الف ملاحظه می‌شود،

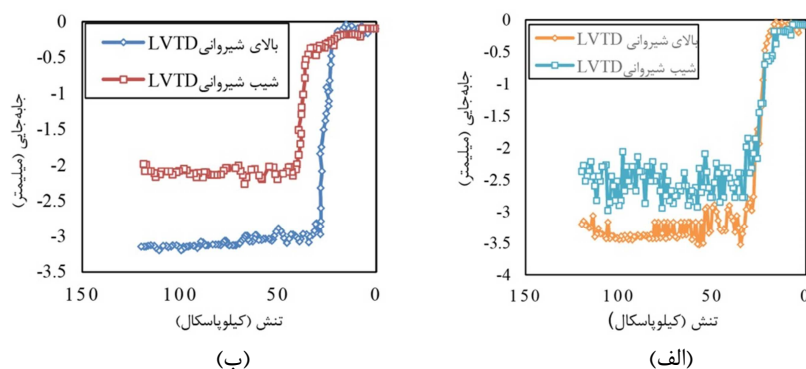


شکل ۱۱- جابه‌جایی در شرایط مسلح با رطوبت ۱۵ درصد، (الف)  $b_1$  و (ب)  $b_2$

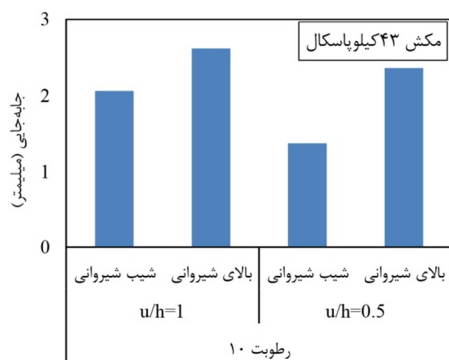


شکل ۱۲- نمودار مقایسه‌ای جابه‌جایی در رطوبت ۱۵ درصد

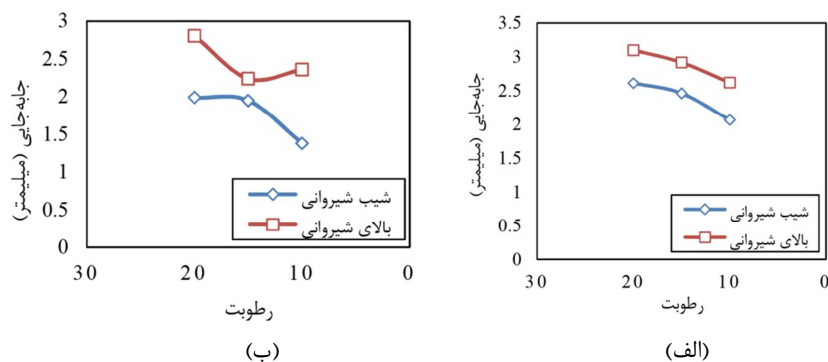
می‌یابد و در شرایط مشابه حدود ۳۳ درصد جابه‌جایی، شیب روندی کاهش در پیش می‌گیرد. زمانی که لایه ژئوسل در میانه شیروانی قرار گرفته است، با کاهش رطوبت، جابه‌جایی در بالای شیروانی، ۱۹ درصد کاهش یافته و جابه‌جایی در شیب شیروانی حدود ۴۴ درصد کاهش می‌یابد. تأثیر قرارگیری لایه ژئوسل در روند جابه‌جایی‌های شیروانی بسیار محسوس می‌باشد (شکل ۱۳).



شکل ۱۳- جابه‌جایی با رطوبت ۱۰ درصد، (الف)  $C_1$  و (ب)  $C_2$



شکل ۱۴- نمودار میانگین جابه‌جایی به در رطوبت ۱۰ درصد



شکل ۱۵- نمودار جابه‌جایی به رطوبت در عمق لایه ژئوسل، (الف)  $u/h=1$  و (ب)  $u/h=0.5$

تفاوت مکانیزم گسیختگی در خاک غیرمسلح و خاک مسلح با ژئوسل می‌گردد، به طوری که برای بستر مسلح با ژئوسل حالت گسیختگی پانچ یا موضعی محتمل در بستر غیرمسلح مشاهده نمی‌گردد.

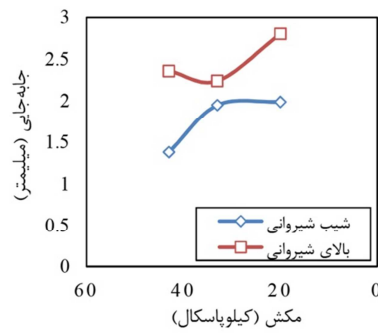
بر این اساس می‌توان پی برد که با افزایش رطوبت خاک غیراشباع از ۱۰ درصد تا ۲۰ درصد شرایط نمودارها دستخوش تغییر می‌شود. به این ترتیب وقتی که ژئوسل در ابتدای شیروانی قرار گرفته است، با افزایش رطوبت جابه‌جایی در بالای شیروانی در حدود ۲۶ درصد کاهش

با توجه به شکل ۱۴، با افزایش رطوبت، مقاومت برشی در خاک به طور محسوسی کاهش می‌یابد. ضمن اینکه با دور شدن لایه ژئوسل از رأس شیروانی ( $u/h=1$ )، جابه‌جایی خاک، بیشتر می‌گردد. بنابراین در رطوبت معین، هرچه ژئوسل به میانه شیروانی ( $u/h=0.5$ ) نزدیک‌تر باشد، پایداری شیروانی، بهتر و مطلوب‌تر می‌شود (شکل ۱۵).

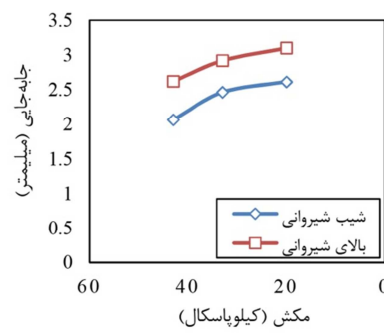
غیراشباع از ۲۰ کیلوپاسکال تا ۴۳ کیلوپاسکال شرایط نمودارها دستخوش تغییرات اساسی می‌شود. به این ترتیب زمانی که لایه ژئوسل در ابتدای شیروانی ( $u/h=1$ ) قرار گرفته است، با افزایش مکش، جابه‌جایی در بالای شیروانی در حدود ۳۵ درصد کاهش می‌یابد و در شرایط مشابه حدود ۴۴ درصد جابه‌جایی، شیب روندی کاهش در پیش می‌گیرد. زمانی که لایه ژئوسل در میانه شیروانی ( $u/h=0.5$ ) قرار گرفته است، با افزایش مکش، جابه‌جایی در بالای شیروانی ۳۰ درصد کاهش یافته و جابه‌جایی در شیب شیروانی، حدود ۵۶ درصد کاهش می‌یابد. تأثیر قرارگیری لایه ژئوسل در روند جابه‌جایی‌های شیروانی بسیار محسوس می‌باشد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که میزان رطوبت خاک و عمق قرارگیری لایه ژئوسل بر روی پایداری شیروانی مؤثر است. در تمام آزمایش‌های انجام شده، با افزایش عمق لایه ژئوسل ( $u/h=1$ ) و رطوبت خاک مقاومت برشی خاک به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد.



(ب)

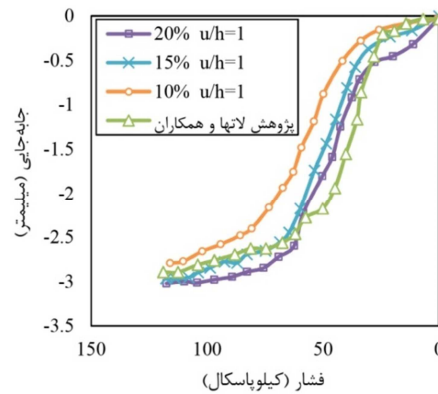


(الف)

شکل ۱۷- نمودار جابه‌جایی به مکش در (الف)  $u/h=1$  و (ب)  $u/h=0.5$

مکش، درصد افزایش در بسیج شدگی خاک مشاهده شده است. براساس نتایج حاصل شده، تأثیر تسلیح با ژئوسل به خصوص در تراز تنش یا درصد نشست‌های بالا مؤثرتر است. به عبارت دیگر، عملکرد تسلیح ژئوسل، زمانی فعال می‌گردد که تغییرمکان خاک درون چشمه‌های ژئوسل به حدی زیاد شود تا مقاومت پاسیو خاک در اثر فشار

همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، تطابق مناسبی بین نتایج لات‌ها [۲۲] و تحلیل حاضر برقرار است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش بارگذاری، مدل پژوهش حاضر بیشتر از مدل لات‌ها تغییرشکل می‌دهد. علت چنین رفتاری را می‌توان ناشی از این حقیقت دانست که خاک بستر پژوهش لات‌ها، خاک رسی فرض شده است. در تحقیق حاضر، ماسه رسی در نظر گرفته شده که باعث افزایش تغییرشکل گردیده است.



شکل ۱۶- مقایسه نتایج پژوهش حاضر با مرجع [۲۲]

همانطور که از روند نمودارهای شکل ۱۷ مشهود است، می‌توان بیان کرد که با افزایش مکش خاک

• توزیع و پخش حداکثری بارهای قائم و افقی یا عبارتی کاهش تنش انتقال یافته در دو امتداد قائم و افقی.

چنانچه طول لایه ژئوسل نسبت به سطح لغزش بسیار کوچک (سطح لغزش عبور نکند) باشد، لنگر خمشی مقاوم لایه ژئوسل منفی می‌شود. دلیل این موضوع، ناشی از اندازه لنگر مقاوم بسیار کمی می‌باشد که توسط نیروی کششی لایه ژئوسل شکل گرفته است. لنگر خمشی منفی لایه ژئوسل سبب افزایش جابه‌جایی جانبی شیروانی و همچنین جابه‌جایی لایه ژئوسل می‌گردد. در حقیقت در این شرایط مانند شیروانی مسلح نشده عمل می‌کند و عملاً ژئوسل کارایی لازم را نخواهد داشت.

همه‌جانبه چشمه‌های ژئوسل فعال گردد. به طور خلاصه، عملکرد مثبت ژئوسل را در افزایش باربری و کاهش نشست می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

- محدودکنندگی جانبی مصالح داخل چشمه‌های ژئوسل به‌واسطه عملکرد مقاوم دیواره‌های قائم آن و جلوگیری از حرکت جانبی مصالح تحت بارهای وارده.
- افزایش سختی مصالح داخل چشمه‌های ژئوسل و انتقال بارهای قائم وارد بر لایه ژئوسل به تنش‌های دایره‌ای به‌وسیله مقاومت پاسیو.
- محدودکنندگی قائم به علت مقاومت اصطکاکی بین مصالح داخل چشمه‌ها و دیواره‌های سلول‌ها.

## مراجع

- [1] Kebaili, M., Mena, L., Kebaili, N., Tabti, S., Bedda, R., & Kabdi, F. (2020). "Development of dune sand by the inclusion of geotextile layers", *International Journal of Geotechnical Engineering*, 14(5), 490-496.
- [2] Diambra, A., Ibraim, E., Wood, D. M., & Russell, A. R. (2010). "Fibre reinforced sands: experiments and modelling", *Geotextiles and geomembranes*, 28(3), 238-250.
- [3] Chen, R. H., Huang, Y. W., & Huang, F. C. (2013). "Confinement effect of geocells on sand samples under triaxial compression", *Geotextiles and Geomembranes*, 37, 35-44.
- [4] Shin, E. C., Kang, H. H., & Park, J. J. (2017). "Reinforcement efficiency of bearing capacity with geocell shape and filling materials", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(5), 1648-1656.
- [5] Ardah, A., Abu-Farsakh, M., & Voyiadjis, G. (2021). "Numerical parametric study of geosynthetic reinforced soil integrated bridge system (GRS-IBS)", *Geotextiles and Geomembranes*, 49(1), 289-303.
- [6] Liu, Y., Deng, A., & Jaksa, M. (2019). "Failure mechanisms of geocell walls and junctions", *Geotextiles and Geomembranes*, 47(2), 104-120.
- [7] Venkateswarlu, H., Ujjawal, K. N., & Hegde, A. (2018). "Laboratory and numerical investigation of machine foundations reinforced with geogrids and geocells", *Geotextiles and Geomembranes*, 46(6), 882-896.
- [8] Leshchinsky, B., & Ling, H. I. (2013). "Numerical modeling of behavior of railway ballasted structure with geocell confinement", *Geotextiles and Geomembranes*, 36, 33-43.
- [9] Tafreshi, S. M., & Dawson, A. R. (2010). "Comparison of bearing capacity of a strip footing on sand with geocell and with planar forms of geotextile reinforcement", *Geotextiles and Geomembranes*, 28(1), 72-84.
- [10] Mirzaei, A. (2012). "Laboratory and Analytical Study of Hydromechanical Correlation Behavior in Unsaturated Soils", PhD Thesis in Civil Engineering-Geotechnics, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University. Iran.
- [11] Latha, G. M., & Manju, G. S. (2016). "Seismic response of geocell retaining walls through shaking table tests", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2(1), 54-64.
- [12] Banerjee, L., Chawla, S., & Bhandari, G. (2018). "Performance of Geocell Reinforced Embankment over Soft Soil Deposit", In *Civil Infrastructures Confronting Severe Weathers and Climate Changes Conference* 44(1), 69-82.
- [13] ASTM Committee D-18 on Soil and Rock. (2010). *Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils*. ASTM International.
- [14] ASTM. (2010). Standard test method for determining tensile properties of nonreinforced polyethylene and nonreinforced flexible polypropylene geomembranes. *D6693-04*.
- [15] Adams, M. T., & Collin, J. G. (1997). "Large model spread footing load tests on geosynthetic reinforced soil foundations", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(1), 66-72.
- [16] Milligan, G. W. E., Fannin, R. J., & Farrar, D. M. (1986). "Model and full-scale tests of granular layers reinforced with a geogrid", In *Proceedings of third international conference on geotextiles*, 1, 61-66.
- [17] Van Genuchten, M.Th., Leij, F.J., and Yates, S.R., (1991). *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*. Res. Rep. 600/2-91/065. USEPA, Ada, Ok.

- [18] Sireesh, S., Sitharam, T. G., & Dash, S. K. (2009). "Bearing capacity of circular footing on geocell-sand mattress overlying clay bed with void", *Geotextiles and Geomembranes*, 27(2), 89-98.
- [19] Thallak, S. G., Saride, S., & Dash, S. K. (2007). "Performance of surface footing on geocell-reinforced soft clay beds", *Geotechnical and Geological Engineering*, 25(5), 509-524.
- [20] Rajagopal, K., Krishnaswamy, N. R., & Latha, G. M. (1999). "Behaviour of sand confined with single and multiple geocells", *Geotextiles and Geomembranes*, 17(3), 171-184.
- [21] Tafreshi, S. M., & Dawson, A. R. (2012). "A comparison of static and cyclic loading responses of foundations on geocell-reinforced sand", *Geotextiles and Geomembranes*, 32, 55-68.
- [22] Madhavi Latha, G., Rajagopal, K., & Krishnaswamy, N. R. (2006). "Experimental and theoretical investigations on geocell-supported embankments", *International Journal of Geomechanics*, 6(1), 30-35.