

Investigating the Effect of Geocell Changes on Slope Stability in Unsaturated Soil

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

The purpose of this research is to investigate the performance and efficiency of reinforced slope in the stability of geocell layers in unsaturated soil conditions. Slope reinforced with geocell, due to the fact that the geocell has a height (three-dimensional), acts as a beam in the soil, and because of its flexural properties, it has a moment of inertia as well as bending strength, which reduces the displacement and increases the coefficient reliability of the slope.

Considering unsaturated conditions of soil contributes a lot to make results close to reality. One of the well-known models among elastoplastic models for modeling unsaturated soils is Barcelona's basic model, which has been added to the FLAC2D software by codification. Changes in thickness, length, and number of geocell layers are remarkably effective on slope stability. The results show that the geocell's reinforcing efficiency depends on the number of layers and the depth of its placement. As the depth of the geocell's first layer increases, the lateral and vertical side elevation of the upper part of the slope increases with respect to the elevation. Load capacity increases with increasing geocell length. By increasing the length of the geocell layer, the joint strength, the tensile strength of the mobilized, and the bending moment are increased. Also, by increasing the thickness of the geocell, the amount of moment of the inertia increases, and as a result, the amount of geocell reinforcement bending moment increases.

Keywords: barcelona basic model, FLAC2D, geocell, slope, unsaturated soil.

* Corresponding author

Received 19 April 2019, Revised 24 November 2019, Accepted 29 November 2019.

DOI: 10.22091/cer.2019.4270.1147

بررسی تأثیر تغییرات ژئوسل بر پایداری شیروانی در خاک غیراشباع

این پژوهش به بررسی عملکرد و بازدهی مسلح‌کننده ژئوسل در پایداری شیروانی مسلح شده با لایه ژئوسل در شرایط خاک غیراشباع می‌پردازد. شیروانی مسلح شده با ژئوسل به دلیل اینکه مسلح‌کننده ژئوسل دارای ارتفاع (سه بعدی) بوده، همانند یک تیر در خاک عمل می‌کند و به دلیل داشتن خصوصیات خمشی، دارای ممان اینرسی و در نتیجه مقاومت خمشی نیز می‌باشد. این امر، سبب کاهش جابه‌جایی شیروانی و افزایش ضریب اطمینان شیروانی خواهد شد. در نظر گرفتن شرایط غیراشباع برای خاک، کمک زیادی در ایجاد نتایج نزدیک به واقعیت می‌کند. یکی از مدل‌های شناخته شده در میان مدل‌های الاستوپلاستیک برای مدل‌سازی خاک‌های غیراشباع، مدل بنیادی بارسلون می‌باشد که این مدل به نرم‌افزار FLAC2D توسط کدنویسی اضافه شده است. در این مطالعه، به بررسی تغییرات ضخامت، طول و تعداد لایه ژئوسل بر پایداری شیروانی پرداخته شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بازده مسلح‌کننده ژئوسل در افزایش ضریب اطمینان به تعداد لایه و عمق قرارگیری آن بستگی دارد. با افزایش عمق قرارگیری اولین لایه ژئوسل نسبت به ارتفاع شیروانی، مقدار جابه‌جایی جانبی و قائم خاک در قسمت بالای شیروانی افزایش خواهد یافت. همچنین ظرفیت باربری با افزایش طول لایه ژئوسل افزایش می‌یابد. با افزایش طول لایه ژئوسل، مقاومت سطح مشترک، مقاومت کششی بسیج شده و ممان خمشی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ضخامت ژئوسل مقدار ممان اینرسی افزایش یافته و در نتیجه، مقدار لنگر خمشی مسلح‌کننده ژئوسل افزایش پیدا می‌کند.

واژگان کلیدی: خاک غیراشباع، مدل پایه‌ای بارسلون، شیروانی، ژئوسل، FLAC2D.

بهنام مهدی‌پور

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.iaun.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

تسلح‌کننده‌ها بر رفتار شیروانی خاکی مسلح به‌طور وسیعی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد چنانچه فواصل مسلح‌کننده‌ها افزایش یابد، بار موجود در لایه‌های مسلح‌کننده و در نتیجه تغییرشکل دیوار، افزایش می‌یابد. به منظور بررسی سازوکار گسیختگی شیروانی خاکی مسلح به ژئوسنتتیک و ارزیابی فرضیه طراحی و روش‌های طراحی برای اینگونه دیوارها پژوهش‌های آزمایشگاهی و عددی مختلفی انجام شد. نتایج حاصل از

در سالیان اخیر، پژوهش‌های بسیاری در زمینه شیروانی خاکی مسلح انجام شده است. تأثیر طول و فاصله

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۳۰، بازنگری: ۱۳۹۸/۰۹/۰۳، پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۰۸.
DOI: 10.22091/cer.2019.4270.1147 شناسه دیجیتال

محققان، از طریق کار آزمایشگاهی مشاهده کردند که لایه ژئوسل مانند تیر عمل کرده و دارای رفتار خمشی می‌باشد. نتایج کار آن‌ها نشان داد که با افزایش ارتفاع لایه ژئوسل، رفتار تیر عمیق در لایه ژئوسل غالب می‌شود [۱۱]. پژوهشگران دیگری نشان دادند که ژئوسل مقاومت خمشی نسبتاً قابل توجهی دارد و در نظر گرفتن سختی خمشی در مدل‌سازی لایه ژئوسل، امری ضروری است [۱۲]. در این پژوهش، برای در نظر گرفتن خصوصیات لایه ژئوسل از المان تیر در نرم‌افزار FLAC2D برای شبیه‌سازی مسلح‌کننده ژئوسل استفاده شده است.

هر روزه ساخت انواع پروژه‌ها با تکنولوژی‌های پیشرفته‌تر در حال توسعه است. یکی از عوامل محدودکننده چنین پروژه‌هایی، مناسب نبودن زمین محل اجرای پروژه به‌عنوان پی سازه است. تشخیص مناسب بودن زمین برای اجرای پی سازه، بستگی به شناخت و علم مهندسی و پژوهشگران از رفتار خاک در شرایط و حالات مختلف دارد. به‌عبارت دیگر، پژوهشگران برای ارزیابی کیفی و کمی رفتار خاک در شرایط مختلف باید عالم بر تغییر رفتار خاک در حالت‌های مختلف باشند. این در حالی است که اصول مکانیک خاک کلاسیک که بنیان‌گذار آن کارل ترزاقی است، بیشتر برای خاک‌ها در حالت اشباع شده پی‌ریزی شده است [۱۳ و ۱۴].

خاک غیراشباع نوع خاصی از خاک نیست؛ بلکه حالتی از خاک است که برای انواع خاک‌ها با توجه به شرایط سیال پرکننده آن‌ها ممکن است رخ دهد. اشباع یا غیراشباع بودن خاک در هر ناحیه از زمین متأثر از عوامل زیست‌محیطی مانند باران یا تبخیر و یا بالا آمدن سطح سفره آب زیرزمینی است. به‌عبارت دیگر، همه خاک‌ها در معرض خشک‌شدگی یا ترشدگی قرار دارند. بنابراین تغییر در وضعیت فشار آب حفره‌ای و بروز شرایط غیراشباع برای همه خاک‌ها محتمل است [۱۵].

شرایط خشکی کامل خاک به‌ویژه برای خاک‌های دانه‌ای، ممکن است با خیس شدن و جذب رطوبت در پایان مراحل ساخت‌وساز، سازه را با کاهش ضریب ایمنی

این بررسی‌ها نشان داد که سطح گسیختگی متفاوت از امتداد ناحیه گسیختگی بوده و موقعیت آن به هندسه، مقاومت و سختی عناصر تسلیح بستگی دارد [۱-۶]. استفاده از ژئوسل به‌عنوان روشی سریع و موثر در مسلح کردن خاک‌ها در پروژه‌های عمرانی کاربرد وسیعی دارد. مهمترین هدف استفاده از ژئوسل، تقویت خاک برای تحمل بارهای استاتیکی و سیکی می‌باشد. این مسلح‌کننده برای افزایش ظرفیت باربری خاک نرم و کاهش نشست و تغییر مکان شیروانی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. ژئوسل مانند یک لایه محصورکننده خاک عمل کرده و از حرکت آن به طرف بیرون از منطقه بارگذاری جلوگیری می‌کند. همچنین از مقدار بالازدگی خاک کاسته می‌گردد و موجب تغییراتی در ضریب اطمینان شیروانی خواهد شد. ژئوسل مقاومت خمشی، کششی و برشی خاک را افزایش می‌دهد و به‌دلیل داشتن ارتفاع، مانند یک تیر^۱ عمل کرده که دارای ممان اینرسی و در نتیجه مقاومت خمشی نیز می‌باشد. هرچند که سختی خمشی با توجه به ضخامت، کم می‌باشد، اما می‌تواند از تغییر شکل‌های لایه‌ها کاسته و باعث کاهش نشست سیستم خاک-سازه گردد [۷].

فاخر و جونز^۲، با استفاده از نرم‌افزار FLAC2D به بررسی تأثیر سختی خمشی مسلح‌کننده ژئوگرید پرداخته‌اند. نتایج کار آن‌ها نشان می‌دهد که سختی خمشی برای ژئوگرید اگرچه با توجه به ضخامت ناچیز لایه ژئوگرید دارای مقدار ناچیزی می‌باشد، اما می‌تواند از تغییر شکل لایه ژئوگرید کاسته و در نتیجه سبب کاهش نشست سیستم گردد [۸].

زانگ^۳ و همکارانش عملکرد مسلح‌کننده ژئوسل را با در نظر گرفتن مقاومت سطح تماس خاک با ژئوسل شبیه‌سازی کردند و مسلح‌کننده ژئوسل را به‌عنوان یک تیر بر روی یک بستر الاستیک در نظر گرفتند [۹ و ۱۰].

^۱- Beam

^۲- Fagher and Jones

^۳- Zhang

نتیجه کار بیشتر پژوهشگران در سه مورد زیر خلاصه شده است:

الف- مباحث کلی از حالت‌های تنش و متغیرهای اساسی به‌کارگرفته شده برای ساخت مدل‌های متعدد.

ب- تجزیه و تحلیل دقیق مدل‌های بنیادین و بررسی نقاط ضعف و قدرت آن‌ها.

پ- پیشرفت در حوزه نمونه‌سازی خاک غیراشباع [۱۴].

در نظر گرفتن شرایط غیراشباع برای خاک باعث می‌گردد مطالعه وضعیت خاک به حالت واقعی نزدیک‌تر باشد. این مطالعه، با هدف بررسی پایداری شيروانی مسلح‌شده در شرایط خاک غیراشباع انجام شده است. همچنین اثرات تغییر طول و ضخامت ژئوسل بر پایداری لحاظ می‌گردد. استفاده از مدل بارسلون به دلیل مشابهت بسیار زیاد با شرایط واقعی خاک مورد استفاده قرار گرفته است.

۲- مروری بر ادبیات فنی

۲-۱- مدل پایه‌ای بارسلون

در این پژوهش از مدل پایه‌ای بارسلون^۶ که به صورت الاستوپلاستیک عمل می‌کند و برای بیان تنش- کرنش خاک‌های غیراشباع می‌باشد که در قالب پلاستیسیته سخت‌شونده عمل می‌کند، استفاده می‌شود. این مدل توسط پروفیسور آلونسو در سال ۱۹۹۰ در دانشگاه کتلونیا اسپانیا معرفی گردید. مدل بارسلون بر پایه مدل کم- کلی می‌باشد و قادر به بیان بسیاری از جنبه‌های اساسی رفتار خاک‌های غیراشباع است. این مدل به قصد بیان رفتار خاک‌های غیراشباع، سیلت‌ها، ماسه‌های رسی، رس‌های ماسه‌ای و رس با پلاستیسیته کم می‌باشد. مدل پایه‌ای بارسلون را می‌توان توسعه مفهوم

مواجه کند. همچنین از آنجا که مقاومت برشی خاک نیز به شدت تحت تأثیر درجه اشباع خاک تغییر می‌کند، بنابراین در نظرگرفتن شرایط صحیحی از اشباع یا غیراشباع بودن خاک در بررسی رفتار خاک اهمیت دارد. در واقع طراحی در مهندسی ژئوتکنیک بدون در نظرگرفتن شرایط خاک غیراشباع گرچه ساده‌تر است، اما هزینه‌های ساخت‌وساز را افزایش می‌دهد [۱۶].

در سال ۱۹۷۸، فردلاند و مورگنسترن^۴، رابطه‌ای برای بیان مقاومت برشی خاک‌های اشباع نشده ارائه کردند که به گونه مناسب، مقاومت برشی ناشی از تنش مؤثر را از مقاومت برشی ناشی از تنش خالص جدا می‌کرد [۱۷]. در سال‌های اخیر، علاقه پژوهشگران به استفاده از روش تنش مؤثر در تعیین مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع گسترش زیادی یافته است [۱۸-۲۱].

در سال ۱۹۹۸، رابطه‌ای برای بیان مقاومت برشی خاک رس غیراشباع ارائه شد که مبتنی بر تنش مؤثر، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک بود [۲۲]. از طرفی، تنش مؤثر در خاک‌های غیراشباع، در ارتباط مستقیم با مقدار مکش بافتی درون خاک است. از جمله پیشگامان پژوهش در این راستا آلونسو^۵ و همکارانش بودند. پژوهش آن‌ها توجه زیادی را به خودش جلب کرد. به گونه‌ای که اکنون تعداد زیادی از مدل‌های اساسی را می‌توان در منابع علمی مربوطه یافت [۱۵].

این مدل که از معروف‌ترین مدل‌های معرفی شده در تحلیل خاک غیراشباع می‌باشد، بر مبنای سه اصل عمده معرفی شده است: مفهوم سطوح حالت، توسعه مفهوم وضعیت بحرانی خاک و آزمایش‌های تجربی. این مدل را می‌توان توسعه مفهوم وضعیت بحرانی در حالت غیراشباع و با در نظر گرفتن اثر پدیده مکش دانست [۲۳].

^۴- Fredlund and Morgenstern.

^۵- Alonso

^۶- Barcelona Basic Model

$$\lambda(s) = \lambda(0)[(1-r)\exp(\beta s + r)] \quad (۶)$$

α پارامتری است که معرف حداکثر سختی خاک بوده و β نرخ افزایش سختی خاک با مکش را کنترل می‌کند. در مدل پایه‌ای بارسلون، منحنی فروریزی - بارگذاری (LC^A) نامیده می‌شود. مشابه کنش‌های ناشی از تنش خالص اعمال شده، مکش نیز موجب ایجاد کرنش‌های الاستیک و پلاستیک می‌گردد. زمانی که خاک به حداکثر مکشی که قبلاً تجربه کرده است می‌رسد، کرنش برگشت‌ناپذیر از آنجا شروع می‌شود [۲۳].

در مدل پایه ای بارسلون، کرنش حجمی جزئی $d\varepsilon_v$ وابسته به تغییرات تنش میانگین خالص p است که به صورت رابطه (۷) بیان می‌شود:

$$d\varepsilon_v = d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2 + d\varepsilon_3 \quad (۷)$$

$$d\varepsilon_q = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2)^2 + (d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3)^2 + (d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3)^2} \quad (۸)$$

کرنش جزئی ایجاد شده توسط تنش میانگین خالص و تنش انحرافی به دو مؤلفه تقسیم می‌شود: کرنش الاستیک $d\varepsilon^e$ و کرنش پلاستیک $d\varepsilon^p$. از طرف دیگر، کرنش حجمی جزئی از کاهش مکش به دلیل ترشدگی و یا افزایش مکش به دلیل خشک شدگی $d\varepsilon^f$ به صورت خالص الاستیک است.

$$d\varepsilon = (d\varepsilon^e + d\varepsilon^p)_p + (d\varepsilon^e + d\varepsilon^p)_s \quad (۹)$$

این مدل شامل یک منحنی تسلیم کاهش مکش می‌باشد که اثر تغییر مکش بر روی رسیدن حالت خاک به نقطه تسلیم اهمیت یکسانی با اثر تغییر تنش متوسط خالص دارد. در مدل پایه‌ای بارسلون، کرنش الاستیک حجمی $d\varepsilon_{vp}^p$ (رابطه ۱۰) توسط تنش میانگین خالص در ناحیه الاستیک ایجاد می‌گردد.

وضعیت بحرانی در حالت غیراشباع و با در نظر گرفتن اثر پدیده مکش دانست. مدل پایه‌ای بارسلون دارای دو متغیر تنش مستقل به صورت تنش خالص و مکش خاک می‌باشد.

$$\bar{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij} - \partial_{ij} u_{ij} \quad (۱)$$

$$S = u_a - u_w \quad (۲)$$

که در رابطه (۱)، $\bar{\sigma}_{ij}$ معرف تانسور تنش خالص، σ_{ij} تانسور تنش کل، ∂_{ij} دلتای کرونیگر و در رابطه (۲)، S مکش خاک، u_a فشار هوای حفره‌ای و u_w فشار آب حفره‌ای است. روابط مدل پایه‌ای بارسلون برحسب چهار متغیر تنش میانگین خالص P ، تنش انحرافی q ، مکش خاک S و حجم مخصوص v نوشته می‌شود.

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (۳)$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad (۴)$$

در روابط (۳) و (۴)، σ_1 ، σ_2 و σ_3 معرف تنش‌های اصلی خاک هستند. زمانی که خاک به صورت همسان تا تنش میانگین خالص در طول خط تحکیم عادی، تحت مکش ثابت بارگذاری شود، حجم مخصوص از رابطه زیر حاصل می‌گردد:

$$v = N(s) - \lambda(s) \ln \frac{P}{P^c} \quad (۵)$$

که $\lambda(s)$ پارامتر سختی^۷ در طول خط عادی تحکیم یافته در مکش ثابت S و P^c فشار مرجع در $v = N(s)$ است. اگر باربرداری و بارگذاری مجدد در مکش ثابت S رخ دهد، رفتار خاک، الاستیک فرض خواهد شد. در مدل پایه‌ای بارسلون، برای تمامی سطوح، مکشی ثابت فرض می‌شود. پارامتر سختی بر روی مسیر تحکیم عادی در مکش ثابت به صورت رابطه زیر تعریف می‌گردد:

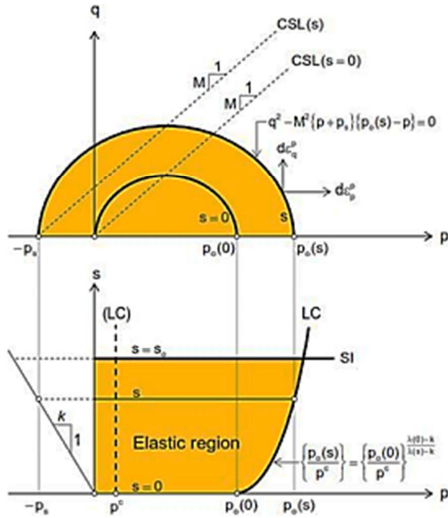
^۸- Load Collapsing

^۷- Stiffness Parameter

کلی می‌باشد. روند محاسبات در نرم‌افزار براساس الگوریتم تهیه شده در شکل ۲ است.

۲-۲- منحنی مشخصه آب- خاک

تاکنون توابع زیادی جهت توصیف یک منحنی مشخصه آب- خاک پیشنهاد شده است.



شکل ۱- سطح گسیختگی در فضای (q, p, s) [۲۳]

در این پژوهش، از مدل ارائه شده توسط ون جنختن^{۱۰} استفاده شده است. این مدل توسط رابطه (۱۶) تعریف می‌گردد [۲۵]:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + (\alpha \psi)^n]^m} \quad (16)$$

در رابطه (۱۶)، پارامترهای α ، m و n ، پارامترهای برازش بوده، ψ مکش خاک و θ_r و θ_s به ترتیب میزان آب پسماند و حالت اشباع می‌باشند. شیب منحنی، متأثر از پارامتر m در محدوده مکش‌های بالا است. براساس رابطه (۱۷) پارامترهای m و n با یکدیگر در ارتباط هستند.

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (17)$$

$$d\varepsilon_{vp}^p = \frac{k}{v} \frac{dp}{p} \quad (10)$$

در این رابطه، v ضریب پواسون و k چسبندگی مکشی می‌باشد.

زمانی که تنش میانگین خالص به مقدار فشار پیش‌تحکیمی p_0 در مکش ثابت S می‌رسد، خاک هنوز در حالت عادی تحکیم‌یافته است. در این حالت، کرنش حجمی کل در رابطه (۱۱) بیان شده است.

$$d\varepsilon_{vp}^p = \frac{\lambda(s)}{v} \frac{dp_0}{p_0} \quad (11)$$

از اینرو، کرنش پلاستیک حجمی به وسیله تفاضل کرنش حجمی الاستیک (رابطه ۱۰) از کرنش حجمی کل (رابطه ۱۱) به صورت زیر بیان می‌گردد.

$$d\varepsilon_{vp}^p = \frac{\lambda(0) - k}{v} \frac{dp^*}{p^*} \quad (12)$$

به طور مشابه کرنش حجمی الاستیک، پلاستیک و کل، وابسته به تغییرات مکش به ترتیب روابط زیر است:

$$d\varepsilon_{vk}^p = \frac{k_s}{v} \frac{ds}{s + p_{atm}} \quad (13)$$

$$d\varepsilon_{vs} = \frac{\lambda(s)}{v} \frac{ds_0}{s_0 + p_{atm}} \quad (14)$$

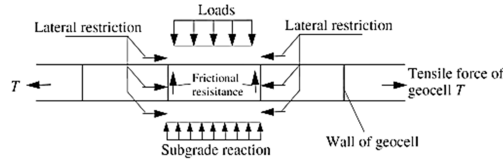
$$d\varepsilon_{vs}^p = \frac{\lambda(s) - ks}{v} \frac{ds_0}{s_0 + p_{atm}} \quad (15)$$

خط حالت بحرانی^۹ در هر مکش ثابت (s) در شرایط اشباع موازی است (شکل ۱).

برای کدنویسی مدل پایه بارسلون در نرم‌افزار FLAC2D از FISH استفاده می‌گردد. روش نوشتن کد مدل پایه‌ای بارسلون بسیار شبیه مدل رس اصلاح شده

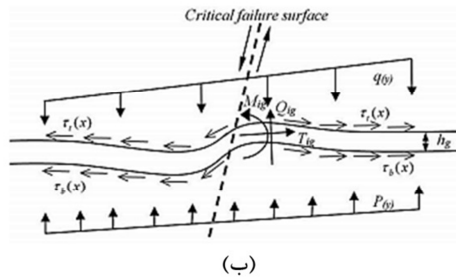
¹⁰- Van Genuchten

⁹- Critical state Line



شکل ۵- اثر مقاومت جانبی مسلح‌کننده ژئوسل [۲۸]

مسلح‌کننده ژئوسل علاوه بر نیروی کششی و برشی در فصل مشترک خاک با ژئوسل، به دلیل داشتن ضخامت و مدول الاستیسیته، دارای ممان اینرسی و در نتیجه لنگر خمشی می‌باشد. همانطور که در شکل ۶ ملاحظه می‌گردد، نیروی کششی، M لنگر خمشی و Q نیروی برشی ژئوسل می‌باشد. همچنین O مرکز سطح لغزش دایره‌ای، r شعاع دایره لغزش و W وزن گوه گسیختگی می‌باشد. تنش $q(y)$ در قسمت بالایی لایه ژئوسل و $p(y)$ ناشی از عکس‌العمل بستر در قسمت پایینی لایه ژئوسل وارد می‌گردد. از طرفی، h ضخامت مسلح‌کننده ژئوسل و $\tau(x)$ مقاومت سطح مشترک بین خاک و ژئوسل می‌باشد (شکل ۶-ب).



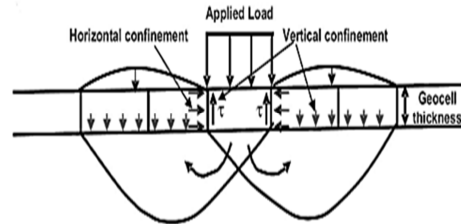
شکل ۶- (الف) مکانیزم گسیختگی مسلح شده با ژئوسل و (ب) نیروهای وارد بر ژئوسل [۲۹]

مقدار جابه‌جایی نسبی برشی، σ_n تنش نرمال، K_n و K_s به ترتیب سختی نرمال و سختی برشی، A سطح مشخصه اختصاص یافته برای هر گره و σ_{si} تنش برشی اضافی به علت ایجاد تنش در المان تماسی است. مقدار سختی نرمال و برشی نیز از رابطه (۲۱) به دست می‌آید [۳۱]:

$$k_n = k_s = 10 \times \max \left[\frac{k + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{\min}} \right] \quad (21)$$

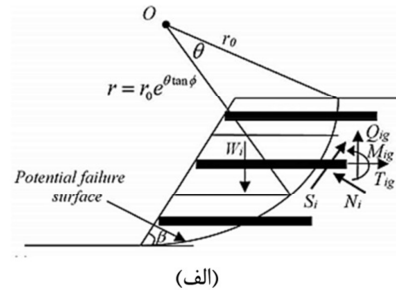
مسلح‌کننده ژئوسل مانند یک لایه محصورکننده خاک عمل می‌کند که از حرکت خاک به طرف بیرون از منطقه بارگذاری جلوگیری می‌کند [۲۶].

اثر کششی لایه ژئوسل نیز در اثر مقاومت در برابر بارهای قائم، به صورت نیروی کششی در لایه مسلح‌کننده ژئوسل توسعه پیدا می‌کند (شکل ۴).



شکل ۴- خاصیت محصورکنندگی خاک توسط ژئوسل [۲۷]

مقاومت‌های تماسی ناشی از اندرکنش میان لایه ژئوسل و خاک دو طرف لایه ژئوسل، سبب افزایش خاصیت محصورکنندگی جانبی و کاهش کرنش جانبی می‌شود. در نتیجه، مقدار مدول الاستیسیته سیستم ژئوسل - خاک افزایش می‌یابد (شکل ۵).



نیروهای نرمال و برشی که باعث پاسخ المان‌های تماسی می‌شوند، به کمک محاسبات صورت گرفته در زمان $t + \Delta t$ و توسط معادلات زیر به دست می‌آید [۳۰]:

$$F_n^{(t+\Delta t)} = K_n u_n A + \sigma_n A \quad (19)$$

$$F_{si}^{(t+\Delta t)} = F_{si}^{(t)} + K_s \Delta u_{si}^{(t+0.5\Delta t)} A + \sigma_{si} A \quad (20)$$

که در آن $F_n^{(t+\Delta t)}$ و $F_{si}^{(t+\Delta t)}$ به ترتیب نیروی نرمال و نیروی برشی در زمان $t + \Delta t$ مقدار مطلق نفوذ گره المان تماسی در راستای عمود بر سطح هدف، $\Delta u_{si}^{(t+0.5\Delta t)}$

در الگوریتم‌های تولید، پارامترهای p ، q ، v و ε پیش‌بینی شده است. مشخصات خاک در جدول ۲ آمده است. شرایط مدل‌سازی عددی در چهار مرحله خلاصه می‌شود:

- ۱- ساخت هندسه مدل و شیروانی مسلح شده،
- ۲- تنظیم شرایط مرزی و تنش‌های مربوطه،
- ۳- اجرای برنامه و رسیدن به تعادل اولیه،
- ۴- بررسی ضریب اطمینان و تغییرشکل شیروانی مسلح‌شده و تغییرات خمشی ژئوسل در شرایط خاک غیراشباع.

که k مدول بالک و G مدول برشی خاک می‌باشد. Δz_{\min} عرض کوچک‌ترین ناحیه تماسی در جهت نرمال است.

۳- مدل عددی

مدل رفتاری خاک برای تحلیل شیروانی مسلح‌شده، مدل پایه‌ای بارسلون می‌باشد. این مدل، به‌واسطه کدنویسی به محیط نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC اضافه شده است. در کد FISH که براساس آزمایش سه محوری برای صحت‌سنجی مدل اساسی بارسلون نوشته شده است،

جدول ۲- پارامترهای مورد استفاده در مدل [۲۳]

پارامتر	مقدار	توصیف
G	۳/۳ (Mpa)	مدول برشی
M	۰/۸۲	شیب خط حالت بحرانی
λ	۰/۱۴	شیب خط اصلاح ایزوتروپیک
K	۰/۰۱۵	شیب خط الاستیک تورم
β	$۱۶/۴ (Mpa^{-1})$	پارامتری که میزان افزایش سفتی خاک را با مکش کنترل می‌کند
r	۰/۲۶	ثابت مربوط به حداکثر سختی خاک
k	۱/۲۴	پارامتر افزایش چسبندگی با مکش
k_s	۰/۰۱	پارامتر سختی الاستیک برای تغییر در مکش
v	۱/۹۱۵	نسبت پواسون
P^c	۰/۰۴۳ (Mpa)	تنش مرجع

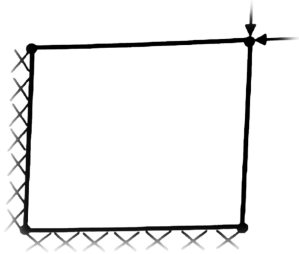
یابد. مرز پایینی مدل در برابر هرگونه حرکت و جابه‌جایی در تمام جهات گیردار شده و مرز عمودی تنها در جهت افقی محدود گردیده و در جهت قائم امکان حرکت دارد (شکل ۶). پارامترهای مورد بررسی به‌منظور تأثیر مسلح‌کننده ژئوسل بر روی ضریب اطمینان و سطوح گسیختگی عبارتند از:

- u ، عمق قرارگیری اولین لایه ژئوسل از تراز بالای شیروانی.
- h ، ضخامت لایه ژئوسل.
- L ، طول ژئوسل.

برای ساده‌سازی نتایج به‌دست آمده تمامی پارامترهای موجود به‌صورت بدون بعد برحسب ارتفاع شیروانی بیان شده‌اند: نسبت عمق برای اولین لایه

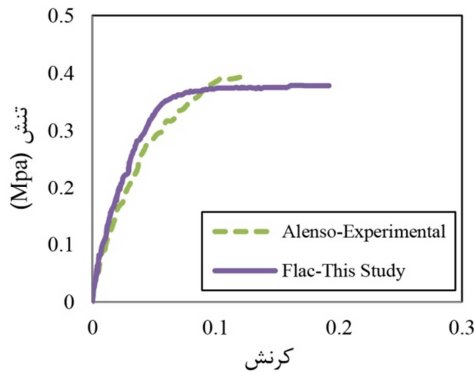
شیروانی مورد بررسی دارای ۵۰ متر عرض و ۳۰ متر ارتفاع می‌باشد. محدوده‌های انتخاب شده در مدل، توسط آنالیز حساسیت و پس از چندسری مدل‌سازی انجام شده است. به‌طوری که با افزایش بیشتر محدوده در نتایج تغییری ایجاد نشده و فقط زمان تحلیل افزایش یافته است. به‌دلیل تقارن، تنها نیمی از خاکریز شبیه‌سازی شده است. خط تقارن در سمت راست مدل قرار دارد. به‌منظور تحلیل دقیق‌تر مدل در تعیین ضریب اطمینان (FOS^{12}) و تغییرشکل شیروانی خاکی مسلح شده، از مش‌بندی ریزتری استفاده شده و با دور شدن از شیروانی اندازه مش‌بندی بزرگ‌تر شده است تا زمان تحلیل کاهش

¹²-Factor of safety



شکل ۸- شرایط مرزی و بارگذاری یک‌چهارم المان

برای شبیه‌سازی، تک المانی که دارای شرایط متقارن محوری است در نظر گرفته شده است تا آزمایش‌های سه محوری بر روی خاک مدل مرجع مدل‌سازی شود. شرایط مرزی، تک المان، در نظر گرفته شده است. در عمل، این تک المان، نشان‌دهنده یک‌چهارم نمونه سه محوری تحت آزمایش است که از دو جهت دیگر ثابت شده است (شکل ۸). براساس شکل ۹، اختلاف بین نمودار موجود در کار آزمایشگاهی مرجع [۲۳] و نمودار حاصل از نتایج نرم‌افزار FLAC بسیار اندک و درصد خطا کمتر از ۵ درصد است. نتایج اعتباربخشی نشان می‌دهد که مدل در مجموع در حد قابل‌قبولی، ظرفیت بیان رفتار خاک غیراشباع را دارد.



شکل ۹- صحت‌سنجی مدل ایجاد شده در FLAC با مدل

پایه‌ای بارسلون (مکش ۹۰ کیلوپاسکال) [۲۳]

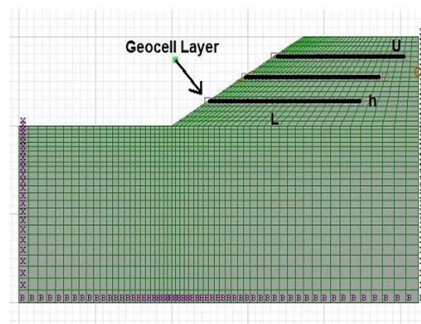
۴- بررسی تأثیر تعداد لایه ژئوسل و عمق قرارگیری اولین لایه بر پایداری شیروانی مسلح شده

مسلح‌سازی شده (u/H)، نسبت طول ژئوسل به ارتفاع خاکریز (L/H) و نسبت ضخامت ژئوسل به ارتفاع خاکریز (h/H). مشخصات ژئوسل در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- مشخصات ژئوسل [۲۹]

پارامترهای ژئوسل	مقدار (واحد)
مدول الاستیسیته	۵۰ (Mpa)
مدول سکانت	۱۵۰ (kN/m)
مقاومت کششی	۶۵ (kN/m)
ضخامت ژئوسل	۰/۵ و ۰/۱ (m)

شیروانی مورد بررسی در شرایط غیرمسلح دارای ضریب اطمینان ۱/۱۰ و میزان جابه‌جایی شیروانی غیرمسلح در شرایط خاک خشک، ۱۵/۶ سانتیمتر می‌باشد. خاک فونداسیون شیروانی در شرایط اشباع بوده و خاک قسمت خاکریز در شرایط غیراشباع قرار دارد. تمام مدل‌ها در مکش ۱۰ کیلوپاسکال و درصد رطوبت ۴۸٪ می‌باشند (براساس منحنی SWCC).



شکل ۷- نمای شیروانی مورد مطالعه با ژئوسل

۳-۱- صحت‌سنجی

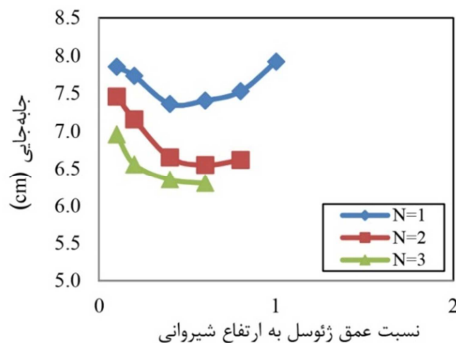
به‌کارگیری مدل پایه‌ای بارسلون در نرم‌افزار FLAC با فرضیات زیر انجام شده است:

۱- تنش میانگین خالص برابر با تنش میانگین کل می‌باشد.

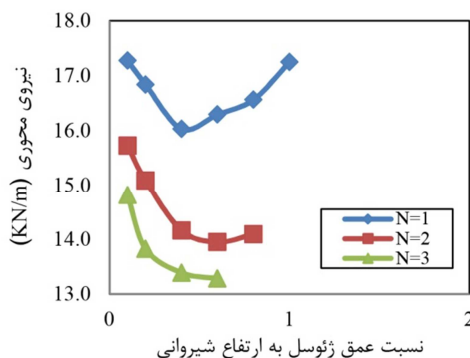
۲- مکش خاک متغیری است که بر هر دو شاخصه مقاومت و سختی خاک تأثیر می‌گذارد.

تنش می‌شود. در $u/H=0.6$ با افزایش تعداد لایه، جابه‌جایی شیروانی ۱۵ درصد کاهش می‌یابد. اولین لایه ژئوسل به‌صورت قابل ملاحظه‌ای نیرو را به قسمت‌های پایین‌تری انتقال داده و در نتیجه باعث انتقال نیرو به سایر لایه‌های ژئوسل شده و بنابراین سبب افزایش بهبود عملکرد پایداری می‌شود.

با توجه به شکل ۱۲، با افزایش تعداد لایه نیروی محوری لایه ژئوسل به‌صورت محسوسی کاهش یافته است. بیشترین تغییر نیروی محوری با افزایش تعداد لایه در $u/H=0.6$ ایجاد می‌گردد که تقریباً ۲۰ درصد نیروی محوری لایه ژئوسل کاهش می‌یابد.



شکل ۱۱- تغییرات جابه‌جایی با تعداد لایه ژئوسل

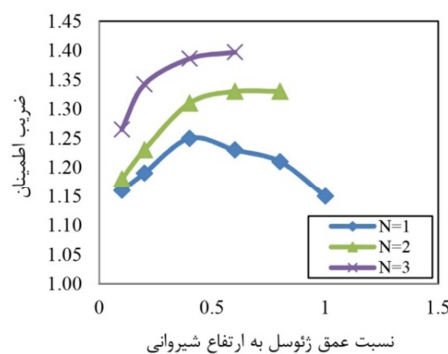


شکل ۱۲- تغییرات نیروی محوری لایه ژئوسل با تعداد لایه ژئوسل

با افزایش مقدار فشار سربار، مقدار نیروی بسیج‌شده در سطح مشترک خاک-ژئوسل افزایش یافته و در نتیجه، مقدار نیروی کششی در مسلح‌کننده‌ها افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، اولین لایه ژئوسل به‌صورت قابل ملاحظه‌ای مقدار جابه‌جایی افقی و کرنش برشی در ارتفاع شیروانی را

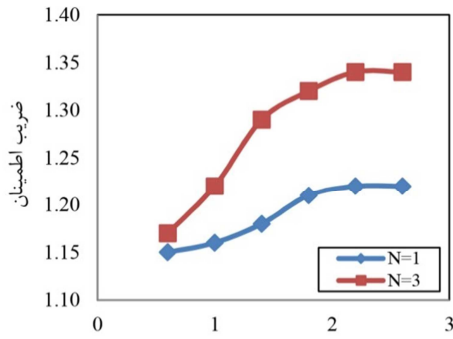
همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، افزایش تعداد لایه‌های مسلح‌کننده باعث افزایش ضریب اطمینان می‌شود. چنین رفتاری را می‌توان ناشی از وسیع‌تر شدن ناحیه تماس و مقاومت اصطکاکی بیشتر در سطح مشترک خاک و ژئوسل دانست. در نتیجه، تنش برشی افقی بزرگتری در قسمت خاک پشت سطح گسیختگی ایجاد می‌شود. در این شرایط، سختی خمشی و مقاومت برشی تقویت‌کننده‌ها نیز افزایش پیدا کرده و از اینرو از جابه‌جایی‌های افقی خاک جلوگیری می‌شود.

ضریب اطمینان براساس تعداد لایه‌ها تا حد زیادی به عمق قرارگیری اولین لایه مسلح‌کننده ژئوسل بستگی دارد. علت این موضوع را می‌توان توانایی اولین لایه مسلح‌کننده در جلوگیری از گسترش سطح لغزش دانست که در نتیجه، می‌تواند پایداری کل شیروانی را تحت تأثیر قرار دهد. عملکرد سایر لایه‌های ژئوسل را می‌توان تا حد زیادی در بهبود تغییرشکل جانبی شیروانی مرتبط دانست. طول ژئوسل ۲۲ و ضخامت آن ۰/۵ متر است. در $u/H=0.6$ با افزایش تعداد لایه، ضریب اطمینان ۱۳/۸ افزایش می‌یابد (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- تغییرات ضریب اطمینان شیروانی با تعداد لایه ژئوسل

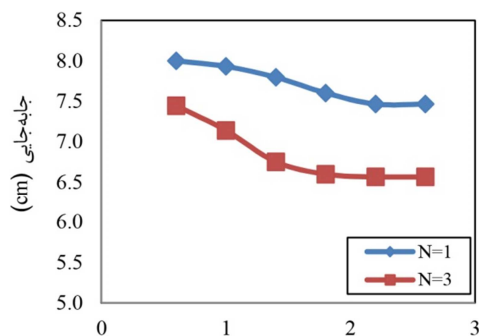
همانگونه که در شکل ۱۱ مشخص است، با افزایش مقدار u/H از ۰/۲ به ۰/۶ مقدار جابه‌جایی شیروانی ۲۲/۶ درصد کاهش یافته است. بنابراین نتایج نشان می‌دهد که اولین لایه ژئوسل مانند یک دال گسترده عمل کرده و سبب توزیع مجدد بار در سطح وسیع‌تر و کاهش شدت



شکل ۱۴- تغییرات ضریب اطمینان شیروانی تحت اثر طول لایه مسلح کننده

همانطور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، با افزایش طول لایه ژئوسل، مقدار جابه‌جایی و تغییرمکان شیروانی کاهش می‌یابد. با افزایش نسبت L/H از $0/6$ به $2/6$ در یک لایه ژئوسل مقدار جابه‌جایی $7/32$ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در سه لایه ژئوسل مقدار جابه‌جایی $13/81$ درصد کاهش داشته است. در L/H برابر $1/8$ با افزایش تعداد لایه از یک به سه، مقدار جابه‌جایی $15/2$ درصد کاهش یافته است.

با افزایش نسبت L/H از $0/6$ به $2/6$ در یک لایه ژئوسل نیروی محوری در ژئوسل 7 درصد کاهش می‌یابد. همچنین در سه لایه ژئوسل $14/44$ درصد کاهش داشته است. در L/H برابر $2/6$ با افزایش تعداد لایه از یک به سه، نیروی محوری $5/18$ درصد کاهش یافته است. تأثیر افزایش طول بر سه لایه ژئوسل محسوس‌تر از یک لایه ژئوسل می‌باشد (شکل ۱۶).

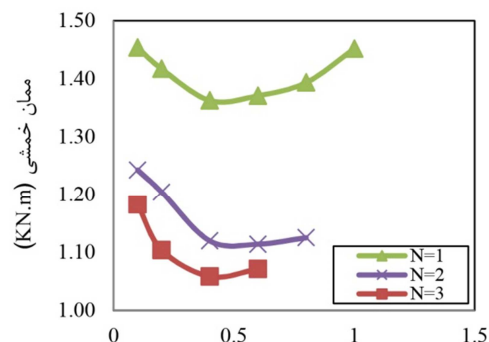


شکل ۱۵- تغییرات جابه‌جایی شیروانی تحت اثر طول لایه مسلح کننده

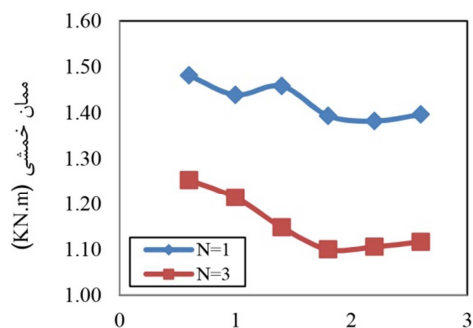
کاهش داده است. بنابراین با گرفتن بیشتر نیروها در اولین لایه ژئوسل ممان خمشی در اولین لایه ژئوسل به مقدار زیادی بسیج شده و در نتیجه مقدار ممان خمشی در سایر لایه‌ها کاهش می‌یابد. در حقیقت مقدار ممان خمشی در سایر لایه‌ها بدلیل اینکه بیشتر نیروها در اولین لایه ژئوسل به مقدار زیادی بسیج شده است، کاهش می‌یابد (شکل ۱۳).

۵- بررسی تأثیر طول لایه‌های ژئوسل بر پایداری شیروانی مسلح شده

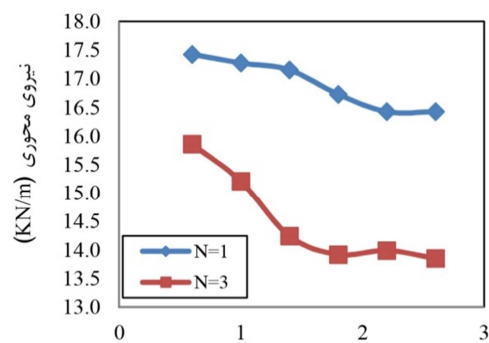
در شکل ۱۴ تغییرات ضریب اطمینان شیروانی را تحت اثر طول لایه مسلح کننده برای شیروانی مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش طول لایه مسلح، ضریب اطمینان نیز افزایش می‌یابد. علت این موضوع به دلیل افزایش مقاومت گیرداری، مقاومت سطح مشترک و مقاومت کششی و خمشی می‌باشد که با افزایش طول لایه ژئوسل، افزایش پیدا می‌کنند. مقدار $u/H=0/2$ لحاظ شده و ضخامت ژئوسل $0/5$ متر است.



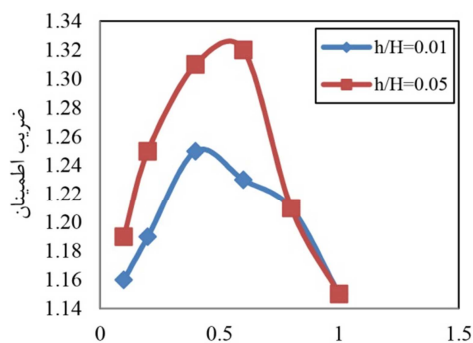
شکل ۱۳- تغییرات لنگر خمشی در لایه ژئوسل با تعداد لایه ژئوسل



شکل ۱۷- تغییرات لنگر خمشی در لایه ژئوسل تحت اثر طول لایه مسلح‌کننده



شکل ۱۶- تغییرات نیروی محوری لایه ژئوسل تحت اثر طول لایه مسلح‌کننده



شکل ۱۸- تغییرات ضریب اطمینان شیروانی تحت اثر تغییرات ضخامت لایه ژئوسل

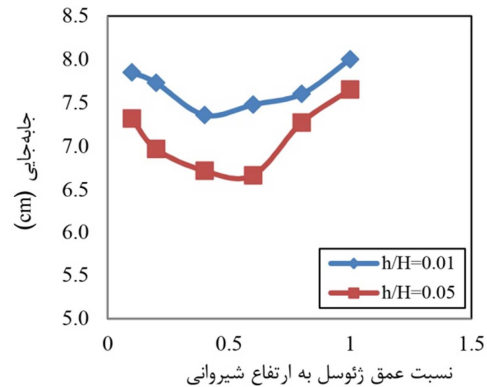
مطابق شکل ۱۹، بیشترین مقدار جابه‌جایی در نسبت $u/H=1$ رخ داده است. در این حالت، بیشتر جابه‌جایی‌ها در زیر لایه ژئوسل اتفاق می‌افتد و لایه ژئوسل تأثیری در مهار نیروهای ناشی از وزن خاک ندارد. از طرف دیگر، چنانچه لایه ژئوسل در این حالت عمق خیلی زیادی از سطح شیروانی قرار بگیرد ($u/H=1$)، مقدار جابه‌جایی قائم جانبی شیروانی در قسمت بالای شیروانی افزایش پیدا کرده و تمام جابه‌جایی در قسمت بالای شیروانی اتفاق می‌افتد. این امر سبب کاهش ضریب اطمینان شیروانی شده و در این حالت نیز شیروانی مانند شیروانی مسلح نشده رفتار می‌کند. در $u/H=0.2$ افزایش ضخامت باعث کاهش جابه‌جایی ۱۰ درصدی شده است که این نسبت، کمترین تأثیر افزایش را در مقایسه با بقیه نسبت‌ها دارد. با کاهش بیش از اندازه ارتفاع لایه ژئوسل، بازدهی مسلح‌کننده در توزیع مجدد بار در سطح وسیع‌تر

بررسی نتایج تغییرات لنگر خمشی نشان می‌دهد که در یک لایه ژئوسل نزدیک ۷ درصد کاهش مقدار لنگر خمشی حاصل شده است؛ در حالی که، در شرایط سه لایه، نزدیک به ۱۱/۴ درصد می‌باشد. زمانی که L/H برابر $2/6$ باشد، با افزایش تعداد لایه‌های ژئوسل لنگر خمشی ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. تأثیر نحوه قرارگیری لایه اول بر نتایج محسوس است (شکل ۱۷).

۶- بررسی تغییرات ضخامت لایه ژئوسل بر پایداری شیروانی مسلح شده

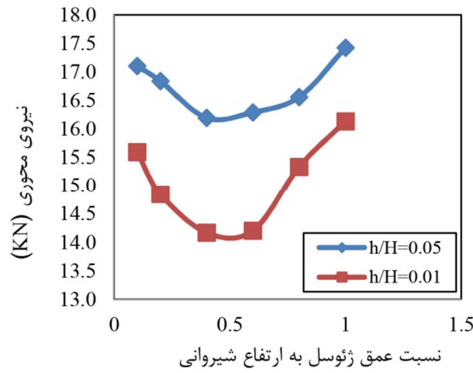
همانطور که انتظار می‌رود، براساس شکل ۱۸، مقدار ضریب اطمینان با افزایش ارتفاع لایه ژئوسل افزایش می‌یابد. مقدار حداکثر جابه‌جایی شیروانی و همچنین کرنش برشی در تراز از شیروانی که در بالای لایه ژئوسل قرار گرفته، رخ می‌دهد و در ارتفاع شیروانی در زیر لایه ژئوسل مقاومت در برابر حرکت جانبی خاک افزایش می‌یابد. در $u/H=0.6$ بیشترین تأثیر ضخامت لایه ژئوسل بر ضریب اطمینان حدود ۸ درصد می‌باشد. بررسی‌ها در شرایط یک لایه ژئوسل به طول ۱۸ متر انجام شده است.

و در اعماق بیشتر کاهش پیدا کرده و رفتار مسلح‌کننده سه‌بعدی ژئوسل مانند مسلح‌کننده‌های صفحه‌ای می‌شود.



شکل ۱۹- تغییرات جابه‌جایی شیروانی تحت اثر تغییر ضخامت لایه ژئوسل

و در نتیجه لنگر خمشی مسلح‌کننده کاهش می‌یابد. همچنین در $u/H=0.2$ حدود ۲۰ درصد افزایش ممان خمشی با افزایش ضخامت ژئوسل رخ داده است. از طرفی، در $u/H=1$ مقدار افزایش لنگر خمشی ۱۰/۴ درصد می‌باشد.



شکل ۲۰- تغییرات نیروی محوری لایه ژئوسل تحت اثر تغییر ضخامت لایه ژئوسل

۷- نتیجه‌گیری

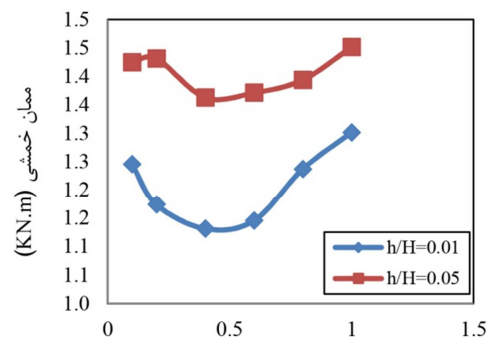
نتایج نشان می‌دهد که عمق جابه‌جایی مؤثر برای لایه ژئوسل، در قسمت میانی ارتفاع شیروانی می‌باشد و افزایش تعداد لایه‌های ژئوسل تأثیر بیشتری بر پایداری شیروانی نسبت به افزایش طول ژئوسل دارند. با قرارگیری اولین لایه ژئوسل در ناحیه مؤثر، توسعه صفحات شکست کاهش یافته و آنها را به عمق بیشتری سوق می‌دهد. در این رابطه، سایر تقویت‌کننده‌های ژئوسل نیز همچون یک دال رفتار کرده که فشارهای عمودی را از بالاترین لایه گرفته و آنها را در اعماق بیشتری از خاک انتقال می‌دهند. در حقیقت، اولین لایه سبب رابطه میان لایه‌های ژئوسل شده برای انتقال تنش می‌شود. چنانچه طول لایه ژئوسل نسبت به سطح لغزش بسیار کوچک 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.

با افزایش ضخامت ژئوسل مقدار ممان اینرسی افزایش یافته و در نتیجه مقدار لنگر خمشی مسلح‌کننده ژئوسل افزایش می‌یابد. در این حالت، رفتار لایه ژئوسل مانند یک تیر عمیق بوده که سبب کاهش تغییرشکل مسلح‌کننده و در نتیجه کاهش تغییرشکل جانبی شیروانی می‌شود. از طرف دیگر، با کاهش ارتفاع لایه ژئوسل مقدار بازدهی مسلح‌کننده به صورت چشمگیری کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار افزایش نیرو در $u/H=0.6$ حدود ۱۳ درصد و کمترین تأثیر در $u/H=0.8$ حدود ۸ درصد است (شکل ۲۰).

المان تیر به دلیل داشتن ارتفاع و مدول الاستیسیته می‌تواند ممان اینرسی ایجاد کرده و سبب ایجاد لنگر خمشی گردیده و در مقابل تغییرشکل مقاومت کند. به نظر می‌رسد در این حالت، لایه ژئوسل شبیه‌سازی شده با تیر می‌تواند مانند یک دال گسترده عمل کرده و سبب توزیع مجدد بار و انتقال بار در سطح بزرگتر و در عمق بیشتری از خاک شود. عمق قرارگیری اولین لایه ژئوسل نقش بسیار زیادی در افزایش ضریب اطمینان شیروانی و کاهش تغییرشکل‌های جانبی شیروانی دارد. با توجه به شکل ۲۱، مشاهده می‌شود که با کاهش ضخامت مسلح‌کننده ژئوسل، ممان اینرسی ایجاد شده کاهش یافته

نیروی محوری ۵/۱۸ درصد کاهش یافته است. تأثیر افزایش طول بر سه لایه ژئوسل محسوس‌تر از یک لایه ژئوسل می‌باشد. نرخ بهبود ضریب اطمینان براساس تعداد لایه‌های ژئوسل تا حد زیادی به عمق قرارگیری اولین مسلح‌کننده بستگی دارد. علت این موضوع، توانایی اولین لایه مسلح‌کننده در جلوگیری از گسترش سطح لغزش می‌باشد که در نتیجه، می‌تواند پایداری کل شیروانی را تحت تأثیر قرار دهد. عملکرد سایر لایه‌های ژئوسل را می‌توان تا حد زیادی در بهبود تغییرشکل جانبی شیروانی مرتبط دانست.

نتایج نشان می‌دهد زمانی که ژئوسل در $u/H=0.2$ باشد، افزایش ضخامت مسلح‌کننده باعث کاهش جابه‌جایی ۱۰ درصدی شده است که این فاصله از راس شیروانی، کمترین اثر افزایشی را در مقایسه با بقیه نسبت‌ها دارد. همچنین با افزایش طول مسلح‌کننده ژئوسل، ممان اینرسی ایجاد شده کاهش یافته و در نتیجه لنگر خمشی مسلح‌کننده کاهش می‌یابد. در این حالت، رفتار مسلح‌کننده ژئوسل به مسلح‌کننده صفحه‌ای نزدیک می‌شود و مقدار بازدهی آن کاهش می‌یابد.



شکل ۲۱- تغییرات لنگر خمشی در لایه ژئوسل تحت اثر تغییر ضخامت لایه ژئوسل

طول مؤثر لایه مسلح‌کننده برابر است با طولی از لایه ژئوسل که در داخل سطح لغزش قرار گرفته و در این ناحیه مقدار زیادی از نیروی کششی، برشی و خمشی لایه ژئوسل بسیج می‌شود. از طرفی، طول لایه مسلح‌کننده می‌بایست مقداری از طول سطح لغزش بیشتر بوده تا بتواند از گسترش سطوح لغزش احتمالی جلوگیری کرده و همچنین طول گیرداری مناسبی برای مقابله با بیرون کشیدگی لایه مسلح‌کننده در برابر نیروهای وارده ایجاد کند. در L/H برابر ۲/۶ با افزایش تعداد لایه از یک به سه،

مراجع

- [1] Hegde, A. M., & Sitharam, T. G. (2015). "Three-dimensional numerical analysis of geocell-reinforced soft clay beds by considering the actual geometry of geocell pockets", *Canadian Geotechnical Journal*, 52(9), 1396-1407.
- [2] Skinner, G. D., & Rowe, R. K. (2005). "Design and behaviour of a geosynthetic reinforced retaining wall and bridge abutment on a yielding foundation", *Geotextiles and Geomembranes*, 23(3), 234-260.
- [3] Leshchinsky, B., & Ling, H. (2013). "Effects of geocell confinement on strength and deformation behavior of gravel", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(2), 340-352.
- [4] Zornberg, J. G., & Arriaga, F. (2003). "Strain distribution within geosynthetic-reinforced slopes", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(1), 32-45.
- [5] Belabed, L., Benyaghla, H., & Yahiaoui, J. (2011). "Internal stability analysis of reinforced earth retaining walls", *Geotechnical and geological engineering*, 29(4), 443-452.
- [6] Chen, R. H., & Chiu, Y. M. (2008). "Model tests of geocell retaining structures", *Geotextiles and Geomembranes*, 26(1), 56-70.
- [7] 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.
- [8] Fagher, A., & Jones, C. J. F. P. (2001). "When the bending stiffness of geosynthetic reinforcement is important", *Geosynthetics International*, 8(5), 445-460.
- [9] Zhang, L., Zhao, M., Zou, X., & Zhao, H. (2009). "Deformation analysis of geocell reinforcement using Winkler model", *Computers and Geotechnics*, 36(6), 977-983.
- [10] Zhang, L., Zhao, M., Zou, X., & Zhao, H. (2010). "Analysis of geocell-reinforced mattress with consideration of horizontal-vertical coupling", *Computers and Geotechnics*, 37(6), 748-756.

- [11] Dash, S. K., Rajagopal, K., & Krishnaswamy, N. R. (2007). "Behaviour of geocell-reinforced sand beds under strip loading", *Canadian Geotechnical Journal*, 44(7), 905-916.
- [12] Yang, X., Han, J., Parsons, R. L., & Leshchinsky, D. (2010). "Three-dimensional numerical modeling of single geocell-reinforced sand", *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 4(2), 233-240.
- [13] Roy, K., Hawlader, B., Kenny, S., & Moore, I. (2015). "Finite element modeling of lateral pipeline-soil interactions in dense sand", *Canadian Geotechnical Journal*, 53(3), 490-504.
- [14] Sheng, D. (2011). "Review of fundamental principles in modelling unsaturated soil behaviour", *Computers and Geotechnics*, 38(6), 757-776.
- [15] Sheng, D. (2011). "Constitutive modelling of unsaturated soils: Discussion of fundamental principles", *Unsaturated soils*, 1, 91-112.
- [16] Uchaipichat, A. (2011). "Effective stress parameter of unsaturated granular soils"; International Conference on Mechanical, Automobile and Robotics Engineering (ICMAR, 2011), 231-234.
- [17] Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., & Widger, R. A. (1978). "The shear strength of unsaturated soils", *Canadian geotechnical journal*, 15(3), 313-321.
- [18] Yang, K. H., Thuo, J. N., Chen, J. W., & Liu, C. N. (2019). "Failure investigation of a geosynthetic-reinforced soil slope subjected to rainfall", *Geosynthetics international*, 26(1), 42-65.
- [19] Oberg, A. L., & Sallfors, G. (1995). "A rational approach to the determination of the shear strength parameters of unsaturated soils", In *Proceedings of the first international conference on unsaturated soils/ unsat'95/ Paris/ France*, 1.
- [20] Bolzon, G., Schrefler, B. A., & Zienkiewicz, O. C. (1996). "Elastoplastic soil constitutive laws generalized to partially saturated states", *Géotechnique*, 46(2), 279-289.
- [21] Wu, L. Z., Huang, R. Q., Xu, Q., Zhang, L. M., & Li, H. L. (2015). "Analysis of physical testing of rainfall-induced soil slope failures", *Environmental earth sciences*, 73(12), 8519-8531.
- [22] Khalili, N., & Khabbaz, M. H. (1998). "A unique relationship for χ for the determination of the shear strength of unsaturated soils", *Geotechnique*, 48(5), 681-687.
- [23] Alonso, E. E., Gens, A., & Josa, A. (1990). "A constitutive model for partially saturated soils", *Géotechnique*, 40(3), 405-430.
- [24] Sreedeeep, S., & Singh, D. N. (2006). "Nonlinear curve-fitting procedures for developing soil-water characteristic curves", *Geotechnical Testing Journal*, 29(5), 409-418.
- [25] Van Genuchten, M. T. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1", *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.
- [26] Cheng, Y. M., Lansivaara, T., & Wei, W. B. (2007). "Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods", *Computers and geotechnics*, 34(3), 137-150.
- [27] Zhou, H., & Wen, X. (2008). "Model studies on geogrid-or geocell-reinforced sand cushion on soft soil", *Geotextiles and Geomembranes*, 26(3), 231-238.
- [28] Pokharel, S. K., Han, J., Leshchinsky, D., Parsons, R. L., & Halahmi, I. (2010). "Investigation of factors influencing behavior of single geocell-reinforced bases under static loading", *Geotextiles and Geomembranes*, 28(6), 570-578.
- [29] Mehdipour, I., Ghazavi, M., & Moayed, R. Z. (2013). "Numerical study on stability analysis of geocell reinforced slopes by considering the bending effect", *Geotextiles and Geomembranes*, 37, 23-34.
- [30] Zhao, M. H., Zhang, L., Zou, X. J., & Zhao, H. (2009). "Research progress in two-direction reinforced composite foundation formed by geocell reinforced mattress and gravel piles", *China Journal of Highway and Transport*, 22(1), 1-10.
- [31] 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.