

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



# پایدارسازی شیروانی‌های خاکی با ژئوسل

نویسنده  
فرشاد کیبیری



سرشناسه	:	کبیری، فرشاد، ۱۳۷۱-
عنوان و نام پدیدآور	:	پایدارسازی شیروانی‌های خاکی با ژئوسل/ نویسنده فرشاد کبیری.
مشخصات نشر	:	کرج: موسسه نشر سیمرخ آسمان آذرگان، ۱۴۰۰.
مشخصات ظاهری	:	۱۰۲ص: مصور، جدول، نمودار (رنگی).
شابک	:	978-622-282-181-4: ۴۰۰۰۰۰ ریال
وضعیت فهرست نویسی	:	فیا
یادداشت	:	کتابنامه: ص. [۱۰۱] - ۱۰۲.
موضوع	:	ژئوگریدها
موضوع	:	Geogrids
موضوع	:	شیروانی
موضوع	:	Pitched roof*
موضوع	:	ژئوسنتز -- آزمایش
موضوع	:	Geosynthetics -- Testing
رده بندی کنگره	:	۴۵۵TA
رده بندی دیویی	:	۶۲۴/۱۸۹۲۳
شماره کتابشناسی ملی	:	۷۵۹۹۸۷۰

پایدارسازی شیروانی‌های خاکی با ژئوسل

نویسنده: فرشاد کبیری

مؤسسه نشر سیمرخ آسمان آذرگان

نوبت چاپ: اول ۱۴۰۰

چاپ و لیتوگرافی: چاپ فاطر

شمارگان: ۵۰۰

قیمت: ۴۰۰۰۰۰ ریال

شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۲۸۲-۱۸۱-۴

آدرس: کرج، جاده ملارد، گلستان ۴۳، ساختمان دیبا، واحد ۲۹ - کد پستی: ۳۱۶۶۹۳۶۸۶۹



## فهرست

مقدمه	۷
<b>فصل اول: آشنایی با ژئوسل</b>	<b>۱۱</b>
۱-۱ ژئوسینتتیک‌ها	۱۱
۲-۱ ساختار کلی ژئوسل	۱۵
۳-۱ جنس ژئوسل	۱۶
۴-۱ ماده پرکننده	۱۶
۵-۱ عملکرد تسلیح سه بعدی	۱۶
۶-۱ موارد استفاده از ژئوسل	۱۶
۷-۱ ویژگی‌های خاک مسلح به ژئوسل (با توجه به تئوری غشای الاستیک)	۱۸
۸-۱ روش‌های مدل‌سازی عددی خاک مسلح به ژئوسل	۲۲
۹-۱ مروری بر مطالعات پیشین	۲۳
<b>فصل دوم: مواد و روش‌ها</b>	<b>۴۱</b>
۱-۲ کلیات	۴۱
۲-۲ مدل آزمایشگاهی	۴۱
۳-۲ مدل نرم‌افزاری	۴۵
۴-۲ مقایسه نتایج	۵۲
<b>فصل سوم: پایدارسازی شيرروانی‌ها با ژئوسل</b>	<b>۵۵</b>
۱-۳ کلیات	۵۵
۲-۳ معرفی مدل ساخته شده	۵۵
۳-۳ مقایسه مدل‌های غیرمسلح و مسلح	۵۷
۴-۳ تأثیر نوع خاک پرکننده سلول‌های ژئوسل	۶۲
۵-۳ تأثیر سختی محوری ژئوسل	۶۴
۶-۳ تأثیر نحوه آرایش لایه‌های مسلح‌کننده (تسلیح شيرروانی در عمق علاوه بر نما)	۶۷
۷-۳ تأثیر طول لایه‌های مسلح‌کننده	۷۲
۸-۳ تأثیر سربار	۸۰
<b>فصل چهارم: جمع‌بندی</b>	<b>۹۹</b>
۱-۴ مقدمه	۹۹
۲-۴ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری	۱۰۰
<b>مراجع</b>	<b>۱۰۱</b>



## مقدمه

استفاده از خاک به عنوان مصالح باربر و پی سازه‌های مختلف از گذشته رواج داشته است. در بیشتر مواقع خاک موجود، خاک مقاومی نبوده و جهت ساخت و ساز ایمن، نیاز به مقاوم سازی خاک می‌باشد. مجموعه فعالیت‌هایی که منجر به افزایش کارایی خاک (افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست) می‌گردد، بهسازی خاک<sup>۱</sup> نام دارد. یکی از مهم‌ترین این روش‌ها، تکنیک تسلیح خاک است. تسلیح خاک به طور خلاصه، اضافه کردن المان‌هایی با قابلیت تحمل کششی به خاک است. با آنکه استفاده از المان‌های کششی به طور نسبی از قدیم کاربرد فراوان داشته، ولی آندره کلوین<sup>۲</sup> (۱۹۲۸) و هنری ویدال<sup>۳</sup> (۱۹۶۲) اولین کسانی بودند که تکنیک خاک مسلح را به صورت علمی پایه گذاری کردند. بعد از ارائه ویدال و پذیرش تکنیک خاک مسلح، با مرور زمان این ابتکار کامل شده و گسترش می‌یابد. در ابتدا از مسلح کننده‌های فلزی استفاده می‌شد. تسمه‌های صاف از اصطکاک کافی برخوردار نبوده و جای خود را به تسمه‌های آجدار دادند. نگرانی عمده در مورد فلزات، زنگ زدگی این مصالح است. مدت طولانی بهره‌برداری از این سیستم‌ها و مرطوب و خیس شدن‌های متوالی مشکل را بیشتر می‌کند. علاوه بر این، فلز محصول گران و پر کاربردی بوده و نیز سختی بالای فلزات در سیستم‌های خاک مسلح ضروری به نظر نمی‌رسد. کمبود، گرانی و مسئله خوردگی فلزات از یک سو و گسترش پلیمرها از سوی دیگر، باعث استفاده بیشتر از این مصالح در فعالیت‌های ژئوتکنیکی شد. ژئوسینتتیک‌ها<sup>۴</sup> دچار خوردگی نشده و صرفه اقتصادی بالایی دارند. یکی از انواع جدید ژئوسینتتیک‌ها، ژئوسل<sup>۵</sup> است که با توجه به هندسه و رفتار سه بعدی، نسبت به مسلح کننده‌های صفحه‌ای، عملکرد بهتری دارد.

پایداری شیروانی‌ها تحت بار استاتیکی یا دینامیکی، از مهم‌ترین مسائل در مهندسی ژئوتکنیک است. زیرا در بسیاری از موارد، سازه‌ها، راه‌ها و ... در حریم شیروانی‌ها قرار دارند و

---

<sup>1</sup> Soil Improvement

<sup>2</sup> Andre Kelvin

<sup>3</sup> Henri Vidal

<sup>4</sup> Geosynthetic

<sup>5</sup> Geocell

خرابی این شیب‌ها می‌تواند تلفات جانی و مالی فراوانی به وجود آورد. از این رو مهندسان ژئوتکنیک همواره به دنبال راه‌هایی برای افزایش پایداری این شیب‌ها بوده‌اند. برای پایدارسازی شیروانی‌ها، از مسلح‌کننده‌ها استفاده می‌شود. امروزه مسلح‌کننده‌های پلیمری با توجه به مزایایی که نسبت به مسلح‌کننده‌های فلزی دارند، مقبولیت و کاربرد بیشتری در پروژه‌ها دارند. از سوی دیگر اغلب این مسلح‌کننده‌های پلیمری، دارای هندسه و عملکرد صفحه‌ای هستند، اما نسل جدید این مسلح‌کننده‌ها، ژئوسل می‌باشد که هندسه و عملکرد سه بعدی دارد. به طوری که برای خاک داخل خود، تنش همه جانبه ایجاد می‌کند که منجر به افزایش کارایی می‌گردد.

از سوی دیگر استفاده از ژئوسل در نمای شیب‌ها، زیبایی بصری دارد که بر محبوبیت آن بین مهندسان افزوده است. تا کنون اغلب مطالعات انجام شده در این زمینه، در مورد پایداری شیروانی‌های مسلح تحت بارهای استاتیکی است. در این کتاب پایداری دینامیکی شیروانی مسلح با ژئوسل بررسی می‌گردد. به این مفهوم که با اعمال زلزله به شیروانی مسلح به ژئوسل، پایداری آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

با افزایش جمعیت و توسعه ساخت و ساز، با کمبود زمین‌های مقاوم جهت احداث سازه‌های مورد نظر مواجه می‌باشیم، لذا جهت ساخت و ساز ایمن، نیاز به مقاوم سازی خاک‌ها می‌باشد. یکی از روش‌های مناسب جهت مقاوم سازی خاک‌ها، تسلیح خاک با ژئوسینتتیک‌ها می‌باشد. در چند دهه اخیر پیشرفت قابل ملاحظه‌ای در زمینه ژئوسینتتیک‌ها و کاربردهایشان صورت گرفته است، بطوری که این مصالح پلیمری اکنون از مصالح اصلی در مهندسی عمران به حساب آمده و مانند مصالحی همچون فولاد و بتن جایگاه خاص خود را پیدا کرده‌اند و بسیاری از سازه‌های ژئوتکنیکی نظیر پی‌ها، دیوارهای حائل، خاکریزها و ... با استفاده از آن‌ها مسلح شده و به خوبی عمل کرده‌اند.

در این کتاب، ابتدا به مطالعه و بررسی پژوهش‌ها و مقالات موجود در ادبیات فنی در مورد شیروانی مسلح به ژئوسل می‌پردازیم. سپس با استناد به یکی از همین مراجع، با استفاده از نرم‌افزار دو بعدی پلکسیس<sup>۱</sup>، یک مدل نرم‌افزاری با شرایط مشابه با مرجع قوی ساخته می‌شود. با مقایسه نتایج بدست آمده از مدل کامپیوتری و مرجع اصلی، که نشان از قابل قبول بودن اختلاف جزئی نتایج دارد، ادامه مسیر با هدف بررسی پایدارسازی شیروانی‌های خاکی، با بررسی مدل‌های مسلح با ژئوسل و غیر مسلح، تأثیر نوع خاک پرکننده سلول‌های ژئوسل، تأثیر سختی محوری ژئوسل، تأثیر نحوه آرایش لایه‌های مسلح‌کننده (تسلیح

<sup>۱</sup> PLAXIS 2D



شیروانی در عمق علاوه بر نما، تأثیر طول لایه‌های مسلح کننده و تأثیر سربار انجام می‌گردد. در فصل اول این کتاب به معرفی کامل ژئوسل، نحوه عملکرد و تفاوت آن با سایر مسلح کننده‌ها پرداخته می‌شود. سپس مروری بر برخی مطالعات موجود در ادبیات فنی انجام می‌گردد. فصل دوم حاوی توضیحاتی در زمینه نحوه مدل‌سازی و فرضیات آن و نیز مقایسه نتایج حاصل از مدل نرم‌افزاری با مورد مرجع است. در فصل سوم با انجام مطالعات پارامتریک و تغییر پارامترهای مربوطه، نتیجه پایدارسازی شیروانی‌های خاکی با ژئوسل تحت شرایط مختلف بدست می‌آید. فصل آخر هم شامل خلاصه‌ای از نتیجه گیری کلی می‌باشد.



## فصل اول: آشنایی با ژئوسل

### ۱-۱ ژئوسینتتیک‌ها

واژه ژئوسینتتیک از دو بخش تشکیل شده، پیشوند «ژئو» به معنای زمین که اشاره به موارد استفاده نهایی از این محصول در پروژه‌های عمرانی مرتبط با زمین، خاک و سنگ داشته و پسوند «سینتتیک» به معنای مصنوعی (یا ساختگی که متضاد طبیعی است) اشاره به این مطلب دارد که این مصالح منحصراً از فراورده‌های ساخت انسان تولید می‌شوند. مصالح مورد استفاده در تولید ژئوسینتتیک‌ها عمدتاً پلیمرهای مصنوعی هستند که از نفت خام مشتق می‌شوند. گرچه از لاستیک (کائوچو)، پشم شیشه (فایبر گلاس) و دیگر مصالح نیز بعضی مواقع برای تولید ژئوسینتتیک‌ها استفاده می‌شود. ژئوسینتتیک، در واقع واژه‌ای عام است که دامنه وسیعی از فراورده‌های تولید شده توسط مصالح پلیمری را شامل می‌شود. رایج‌ترین محصولات پلیمری عبارتند از: ژئوتکستایل‌ها<sup>۱</sup>، ژئوگریدها<sup>۲</sup>، ژئونت‌ها<sup>۳</sup>، ژئوممبرین‌ها<sup>۴</sup> و ژئوکمپوزیت‌ها<sup>۵</sup> که همراه با خاک، سنگ و یا هر مصالح مهندسی دیگر در بسیاری از پروژه‌های ساخت دست انسان به کار گرفته می‌شوند. بعضی مواقع مصالح ساخته شده از الیاف طبیعی (کنف، الیاف نارگیل، پشم، پنبه و غیره) نیز به همراه خاک، سنگ و یا دیگر مصالح مهندسی به کار گرفته می‌شوند، مخصوصاً در پروژه‌های عمرانی موقت و کوتاه مدت. چنین مصالحی که آن‌ها را می‌توان ژئونچرال نامید، هنگامی که به همراه خاک به کار گرفته می‌شوند به دلیل تجزیه پذیری دارای عمر کوتاهی بوده و بنابراین دارای کاربردهایی به تنوع ژئوسینتتیک‌ها نیستند. گرچه ژئونچرال‌ها تفاوت‌های بارزی با ژئوسینتتیک‌ها به لحاظ مادی و فیزیکی دارند، آن‌ها را می‌توان فراورده‌های مکمل ژئوسینتتیک‌ها دانست و نه جایگزینی برای آن‌ها، زیرا موارد کاربرد آن‌ها در بعضی موارد با یکدیگر مشترک است. در حقیقت ژئونچرال‌ها نیز مصالحی پلیمری هستند چون بخش عمده‌ای از آن‌ها از پلیمرهای طبیعی

---

<sup>1</sup> Geotextile

<sup>2</sup> Geogrid

<sup>3</sup> Geonet

<sup>4</sup> Geomembrane

<sup>5</sup> Geocomposite

همانند لینین<sup>۱</sup> (الیاف چوب) و سلولز تشکیل شده است. اولین تلاش‌ها برای تسلیح خاک‌ها به وسیله مصالحی با جنس متفاوت با خاک پایه و با هدف بهبود کیفیت خاک انجام پذیرفت. این مصالح عبارت بودند از کنده‌های درختان، بوته‌های کوچک و مانند آن‌ها که برای تثبیت مرداب‌ها و خاک‌های باتلاقی به کار می‌رفتند. با گذشت زمان نحوه تثبیت خاک تغییر نموده و با به وجود آمدن روش‌های سیستماتیک الوارهای یک شکل و یک اندازه به هم بسته می‌شدند و با آن بستری یک پارچه به وجود می‌آمد. ایده تسلیح خاک‌های ضعیف تا به امروز ادامه داشته است. اداره راه کارولینای جنوبی در سال ۱۹۲۶ اولین بار از پارچه‌ها (منسوجات) برای تسلیح راه‌ها استفاده نمود، آن‌ها از پارچه‌های پنبه‌ای سنگین استفاده نمودند. چنانکه ابتدا پارچه را بر روی اساس خاکی اولیه قرار می‌داند و سپس بر روی آن قیر داغ ریخته می‌شد و سرانجام روی آن لایه‌ای نازک از ماسه می‌ریختند. محققین این اداره نتایج کارشان را در سال ۱۹۳۵ منتشر نموده و در آن هشت آزمایش محلی مجزا را شرح دادند. نتایج کلی حاکی از آن بود که راه‌ها در وضعیت خوبی هستند و پارچه‌ها باعث کم شدن ترک‌ها و خرابی‌های معمول در راه‌ها شده‌اند. این پروژه به طور یقین پیش درآمد عملکرد مسلح کنندگی-جداکنندگی بود که امروزه با آن آشنا هستیم.

در دهه ۱۹۵۰ انواع مختلفی از منسوجات برای استفاده به عنوان جداکنندگی و یا فیلتر بین خاک‌های درشت دانه و بستر ضعیف به مرحله تولید رسیدند. پارچه‌هایی از نوع بافته شده (که امروزه ژئوتکستایل نامیده می‌شوند) نقش اساسی در پروژه‌های ساحلی به عنوان فیلتر در کشورهای هلند و آمریکا ایفا می‌نمودند. در اوایل دهه ۱۹۶۰ کارخانه تولید منسوجات رون پولان<sup>۲</sup> در فرانسه از ژئوتکستایل‌های بی‌بافت سوزنی استفاده‌هایی کاملاً متفاوت نمود. ژئوتکستایل‌ها برای اولین بار به عنوان سیستم‌های باربر در بسترهای بزرگراه‌ها و راه آهن‌ها مورد توجه قرار گرفتند. حدوداً در ۱۹۶۵ پلی اتیلن کلروسولفوناته (CSPE) به مرحله تولید انبوه رسید. در سال ۱۹۷۰ ژئوتکستایل برای اولین بار در داخل سد خاکی به کار گرفته شد. ژئوتکستایل مورد استفاده از نوع بی‌بافت سوزنی بود که به عنوان فیلتر مصالح زهکش پایین دست سد ولکراس با ارتفاع ۱۷ متر در فرانسه مورد استفاده قرار گرفت. در این دهه ژئوتکستایل‌ها به عنوان مسلح کننده در دیوارها در دیوارهای حایل، شیروانی‌ها و غیره مورد استفاده قرار گرفتند. در همین دوران استانداردسازی ژئوسینتتیک‌ها با تشکیل کمیته مشترک ASTM D-13-18 و تشکیل کارگروه صنعتی ویژه آغاز شد. در ژوئای ۱۹۷۸ اولین

<sup>۱</sup> Lignin

<sup>۲</sup> Rhone-Poulenc

نمونه از ژئوگریدهای تنسار<sup>۱</sup> در آزمایشگاه‌های شرکت انحصاری نتلون<sup>۲</sup> در انگلستان به مرحله تولید رسید. اولین کنفرانس با موضوع ژئوسینتتیک‌ها در سال ۱۹۷۷ در پاریس برگزار شد. ژئوفوم به عنوان یک مصالح خاکریز سبک برای اولین بار در سال ۱۹۷۲ در کشور نروژ به کار گرفته شد. در دهه ۱۹۸۰ استفاده از ژئوسینتتیک‌ها در ساخت سازه‌های نگهدارنده پسماندهای خطرناک زیست محیطی آغاز شد. سیستم‌های محصور کننده خاکی با استفاده از ژئوتکتستایل برای اولین بار در طول دهه ۱۹۸۰ در فرانسه ابداع شده و مورد استفاده قرار گرفتند. نتلون از همین ایده اما در مقیاس بزرگتر استفاده نموده و محصول خود یعنی تشک‌های ژئوسل را در سال ۱۹۸۲ معرفی نمود. اولین استفاده از ژئونت در پروژه‌های زیست محیطی در سال ۱۹۸۴ برای رسوخ یابی یک مخزن نگهدارنده مایعات خطرناک با آستر دو لایه در هوپول<sup>۳</sup> واقع در ویرجینیا به وقوع پیوست.

کرر<sup>۴</sup> و ولش<sup>۵</sup> اولین کتاب با موضوع ژئوسینتتیک‌ها را در ۱۹۸۰ به رشته تحریر در آوردند. ژورنال بین المللی با عنوان ژئوتکتستایل‌ها و ژئوممبرین‌ها در ۱۹۸۴ به چاپ رسید. در دهه ۱۹۹۰ بسیاری از استانداردهای ژئوسینتتیک‌ها در انجمن آزمایش مصالح آمریکا<sup>۶</sup>، سازمان بین المللی استاندارد<sup>۷</sup> واقع در سوئیس، انستیتو استاندارد انگلستان<sup>۸</sup> و اداره استاندارد هند<sup>۹</sup> به چاپ رسیدند. دومین ژورنال بین المللی با عنوان Geosynthetics International در سال ۱۹۹۵ به چاپ رسید.

### ۱-۱- انواع ژئوسینتتیک‌ها

انواع ژئوسینتتیک‌ها عملکردهای مختلفی دارند که برخی از آن‌ها عبارت است از:

- (۱) تسلیح
- (۲) جداکنندگی
- (۳) فیلتراسیون
- (۴) زهکشی
- (۵) آب بندی

<sup>1</sup> Tensar

<sup>2</sup> Netlon

<sup>3</sup> Hopewell

<sup>4</sup> Koerner

<sup>5</sup> Welsh

<sup>6</sup> ASTM

<sup>7</sup> IOS

<sup>8</sup> BSI

<sup>9</sup> BIS

## ۶) حفاظ

### ۱-۱-۲ مزایای استفاده از ژئوسینتتیک‌ها

از مزایای استفاده از ژئوسینتتیک‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱) اشغال فضای کمتر: ژئوسینتتیک‌ها به دلیل ساختار ورقه‌ای، فضای بسیار کمتری را نسبت به لایه‌های خاکی و سنگریزه‌ای در داخل مصالح خاکریز اشغال می‌نماید.
- ۲) کنترل کیفیت مصالح: خاک و سنگدانه‌ها به طور کلی مصالحی ناهمگن هستند به طوری که ویژگی‌های آن‌ها در یک محدوده یا ناحیه به میزان قابل توجهی متغیر است. در مقابل ژئوسینتتیک‌ها نسبتاً همگن هستند زیرا این مصالح در کارخانه تحت شرایط کنترل شده تولید می‌شوند. تغییرات موجود در خواص این مصالح در طی مراحل کنترل کیفیت به حداقل رسانده می‌شوند.
- ۳) کنترل کیفیت مصالح در محل احداث پروژه: برای به حداقل رساندن میزان اتصالات یا درزهای اجرایی یا کارگاهی، ژئوسینتتیک‌ها اغلب در کاخانه به صورت پیش ساخته به شکل ورقه‌های بزرگ تولید می‌شوند. هم درزهای کارخانه‌ای و هم درزهای کارگاهی توسط تکنسین‌های تعلیم دیده مورد آزمایش قرار می‌گیرند. در مقابل خاک و سنگدانه‌ها به صورت محلی اجرا می‌شوند و همواره در معرض تغییرات ناشی از وضعیت جوی، جابجایی و اجرا قرار دارند.
- ۴) صرفه جویی در هزینه: به طور کلی مصالح ژئوسینتتیکی در مقایسه با خاک و مصالح سنگی هزینه خرید، انتقال و نصب کمتری دارند.
- ۵) برتری فنی: ژئوسینتتیک‌ها برای ایفای عملکرد بهینه برای مورد مصرف مشخص طراحی می‌شوند.
- ۶) زمان اجرا: ژئوسینتتیک‌ها را می‌توان با سرعت زیادی اجرا نمود. این ویژگی باعث افزایش انعطاف پذیری در زمان اجرای این مصالح در فصول اجرایی کوتاه و شرایط حاد جوی می‌شود.
- ۷) نحوه اجرا: ژئوسینتتیک‌ها را می‌توان به صورت متوالی اما با حداقل فاصله اجرا نمود. بدین ترتیب اجرای این مصالح به میزان زیادی تسهیل می‌یابد.
- ۸) فراوانی مصالح: وجود مراکز توزیع و فروش متعدد، سهولت ارسال این مصالح و همچنین وجود تولید کننده‌های فراوان که باعث ایجاد قیمت‌های رقابتی شده‌اند، باعث سهولت دسترسی به ژئوسینتتیک‌ها شده است.

۹) حساسیت زیست محیطی: سیستم‌های ژئوسینتتیک باعث کاهش استفاده از منابع طبیعی و آسیب‌های زیست محیطی ناشی از حفاری و حمل و جابجایی مصالح طبیعی می‌شود. می‌توان از جدول زیر برای معرفی انواع پر کاربرد ژئوسینتتیک‌ها و کاربرد هر یک استفاده کرد.

جدول ۱-۱: معرفی برخی از ژئوسینتتیک‌ها و کاربرد آن‌ها

کاربرد	Geotextille	Geomembrane	Geogrid	GCL	Geocell
تسلیح	*		*		*
فیلتراسیون	*				
زهکشی	*				
محافظت	*			*	*
جداسازی	*	*			

یکی از جدیدترین انواع ژئوسینتتیک‌ها، ژئوسل است، که در ادامه به طور مشروح به ویژگی‌های آن پرداخته می‌شود.

## ۱-۲ ساختار کلی ژئوسل

ژئوسل یک سیستم محصور کننده سه بعدی قابل گسترش است. برای ساخت ژئوسل‌ها عموماً نوارهایی به عرض ۵۰ تا ۱۰۰ میلیمتر به یکدیگر متصل می‌گردند و یک شبکه سه بعدی (معمولاً به شکل‌هایی از قبیل شش ضلعی، مستطیلی شکل، شبه دایروی، بیضوی و ...) منعطف تشکیل می‌دهند. هنگامی که در حین اجرا این شبکه گسترش یابد، سلول‌های ژئوسل توسط ماده پر کننده<sup>۱</sup> پر می‌گردد. در اغلب موارد برای پر کردن شبکه از خاک موجود در سایت استفاده می‌شود. عموماً خاک مورد استفاده کوبیده و متراکم می‌گردد تا با ایجاد یک سیستم صلب، عملکرد ژئوسل بهبود یابد. وجه تمایز این سیستم تسلیح با سایر موارد، ایجاد محصور شدگی جانبی (علاوه بر محصور شدگی قائم) ناشی از ساختار سه بعدی است. به همین دلیل، تسلیح با ژئوسل را تسلیح سه بعدی یا شبکه‌ای و تسلیح با مسلح کننده‌های دیگر مثل ژئوگرید و ژئونکستایل را تسلیح دوبعدی (صفحه‌ای) می‌نامند.

<sup>۱</sup> Infill Material

### ۱-۳ جنس ژئوسل

در ابتدا از نوارهای فولادی برای ساخت ژئوسل استفاده می‌شد. هزینه بالا و وزن زیاد نوارهای فولادی موجب گردید که از نوارهای کاغذی برای ساخت شبکه تسلیح استفاده گردد. مقاومت پایین نوارهای کاغذی و پیشرفت تکنولوژی، مواد پلیمری را جایگزین نوارهای فولادی و کاغذی نمود. امروزه بیشتر ژئوسل‌ها از جنس پلی اتیلن با چگالی بالا (HDPE) ساخته می‌شوند. گرچه هنوز هم غالباً ساخت شبکه تسلیح سه بعدی با جوش اولتراسونیک نوارهای ژئوگرید و ژئوتکستایل انجام می‌گیرد. اما به دلیل اقبال بیشتر مهندسين به استفاده بیشتر از این سیستم تسلیح، بعضی از کارخانه‌ها شبکه (منفرد) ژئوسل را به صورت صفحه‌های بزرگ تولید می‌کنند.

### ۱-۴ ماده پر کننده

با توجه به اینکه ویژگی اصلی ژئوسل‌ها، ایجاد محصور شدگی<sup>۱</sup> جانبی برای ماده پر کننده است و از جایی که مقاومت برشی و سختی خاک‌های دانه‌ای تا حد زیادی به فشار همه جانبه وابسته است. در بیشتر موارد از خاک دانه‌ای متراکم شده برای پر کردن سلول‌ها استفاده می‌شود. گرچه در برخی موارد نیز، پیشنهادهایی برای استفاده از بتن سبک نیز ارائه شده است.

### ۱-۵ عملکرد تسلیح سه بعدی

ژئوسل، فشار محصور کننده همه جانبه به وجود می‌آورد. این فشار محصور کننده، مقاومت غیرفعال<sup>۲</sup> خاک پر کننده در سلول‌های مجاور را زیاد می‌کند و اصطکاک بین خاک و دیواره ژئوسل را افزایش می‌دهد. همچنین شبکه سلولی، بار وارده بر هر سلول را بین سلول‌های دیگر تقسیم می‌نماید و بدین ترتیب توزیع بهتری از انواع بارهای وارده به مجموعه مسلح شده به ژئوسل پدید می‌آید. در نتیجه ظرفیت باربری خاک بیشتر می‌گردد.

### ۱-۶ موارد استفاده از ژئوسل

ایده استفاده از ژئوسل، نسبت به سایر ژئوسینتتیک‌ها جدیدتر است و به همین دلیل در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است. اولین بار در دهه ۱۹۷۰، مهندسان ارتش آمریکا، استفاده از تسلیح سه بعدی را پیشنهاد کردند. در ابتدا از ژئوسل برای محافظت از

<sup>1</sup> Confinement

<sup>2</sup> Passive



راه‌ها در حین عبور ماشین آلات سنگین نظامی استفاده شد. ولی سال‌ها گذشت تا از سیستم تسلیح شبکه‌ای در موارد دیگر استفاده گردد. به صورتیکه عملاً از سال ۲۰۰۱ به بعد استفاده از ژئوسل در پروژه‌های ژئوتکنیکی به صورت جدی مد نظر قرار گرفت. در هر حال با توجه به کارایی بالا، به کارگیری تسلیح شبکه‌ای روز به روز رو به گسترش است. امروزه اکثر موارد استفاده از ژئوسل، بهسازی و بهبود ظرفیت باربری پی‌ها، تسلیح دیوارهای حایل، بهبود خواص اساس در راهسازی، تسلیح شیروانی‌ها و حتی نماسازی در جاده‌ها می‌باشد. در مورد اخیر باید گفت که می‌توان با استفاده همزمان از تسلیح سه بعدی و بیولوژیکی، سیستمی مقاوم از نظر باربری و مفید برای محیط زیست در اختیار داشت. در شکل‌های (۱-۱) نمونه‌هایی از به کارگیری تسلیح سه بعدی در موارد مذکور ارائه شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱-۱ الف و ب: استفاده از تسلیح سه بعدی در راهسازی

### ۷-۱ ویژگی‌های خاک مسلح به ژئوسل (با توجه به تئوری غشای الاستیک)

همانطور که پیش‌تر ذکر شد، استفاده از تسلیح شبکه‌ای موجب ایجاد محصور شدگی جانبی علاوه بر محصور شدگی قائم، برای خاک پرکننده می‌شود. این محصور شدگی جانبی در واقع، نتیجه تنش‌های کششی غشایی در دیواره‌های ژئوسل می‌باشد و بر مقاومت و سختی خاک داخل سلول‌ها تأثیر گذار است که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۷-۱-۱ مقاومت برشی

بر اثر تسلیح با ژئوسل، زاویه اصطکاک داخلی خاک داخل سلول‌ها ( $\phi$ )، ثابت می‌ماند ولی نوعی چسبندگی ظاهری القایی ( $C$ )، در آن ایجاد می‌شود. به این معنی که چسبندگی نهایی خاک مطابق رابطه (۷-۱) برابر مجموع چسبندگی واقعی و ظاهری ناشی از استفاده از تسلیح سه بعدی است.

$$C_g = C + C_r \quad (7-1)$$

در این رابطه:

$C_g$ : چسبندگی نهایی خاک مسلح

$C$ : چسبندگی ذاتی خاک

$C_r$ : چسبندگی ظاهری اضافه ناشی از تسلیح خاک

در ابتدا باترست<sup>۱</sup> و کنایت<sup>۲</sup> در سال ۱۹۹۳، مقاومت برشی ناشی از چسبندگی ظاهری را با استفاده از تئوری غشای الاستیک در یک سلول تنهای ژئوسل بررسی کردند. این روش توسط راجاگوپال<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۱۹۹۹ با انجام مطالعاتی تأیید شد. بنابر مطالعات انجام شده با توجه به تئوری غشای الاستیک هنکل<sup>۴</sup> و گیلبرت<sup>۵</sup> در سال ۱۹۵۲، تنش محصور کننده اضافی ناشی از تسلیح با ژئوسل (تئوری غشای الاستیک) برابر است با:

$$\Delta\sigma_3 = \frac{2M \varepsilon_c}{d} \frac{1}{(1 - \varepsilon_a)} \quad (2-1)$$

در رابطه بالا:

$\Delta\sigma_3$ : تنش محصور کننده جانبی ناشی از تسلیح با ژئوسل

$M$ : مدول سکانت ژئوسل در کرنش محوری ۵٪ (کرنش محوری نهایی) که از آزمایش

کشش به دست می‌آید.

$\varepsilon_c$ : کرنش برشی محیطی در لحظه گسیختگی

$\varepsilon_a$ : کرنش برشی محوری در لحظه گسیختگی

$d$ : قطر معادل سلول در لحظه‌ای که کرنش محوری برابر  $\varepsilon_a$  است. به قطر دایره هم

مساحت با سلول ژئوسل اطلاق می‌گردد.

از طرفی رابطه بین کرنش محیطی و محوری در لحظه گسیختگی عبارت است از:

$$\varepsilon_c = \frac{1 - \sqrt{1 - \varepsilon_a}}{1 - \varepsilon_a} \quad (3-1)$$

از جایی که حجم نمونه در تمام طول آزمایش ثابت است:

$$\frac{\pi}{4} d_0^2 L_0 = \frac{\pi}{4} d^2 L \quad (4-1)$$

در رابطه بالا  $d_0$  و  $L_0$  به ترتیب قطر معادل اولیه و طول اولیه نمونه و  $d$  و  $L$  قطر معادل

و طول نمونه در لحظه گسیختگی هستند.

با استفاده از رابطه (۴-۱) می‌توان نوشت:

$$d = \frac{d_0}{\sqrt{\frac{L}{L_0}}} = \frac{d_0}{\sqrt{1 - \varepsilon_a}} \quad (5-1)$$

با ترکیب روابط (۲-۱)، (۳-۱) و (۵-۱) نتیجه می‌شود:

$$\Delta\sigma_3 = \left[ \frac{1 - \sqrt{1 - \varepsilon_a}}{1 - \varepsilon_a} \right] \frac{2M}{d_0} \quad (6-1)$$

<sup>1</sup> Bathurst

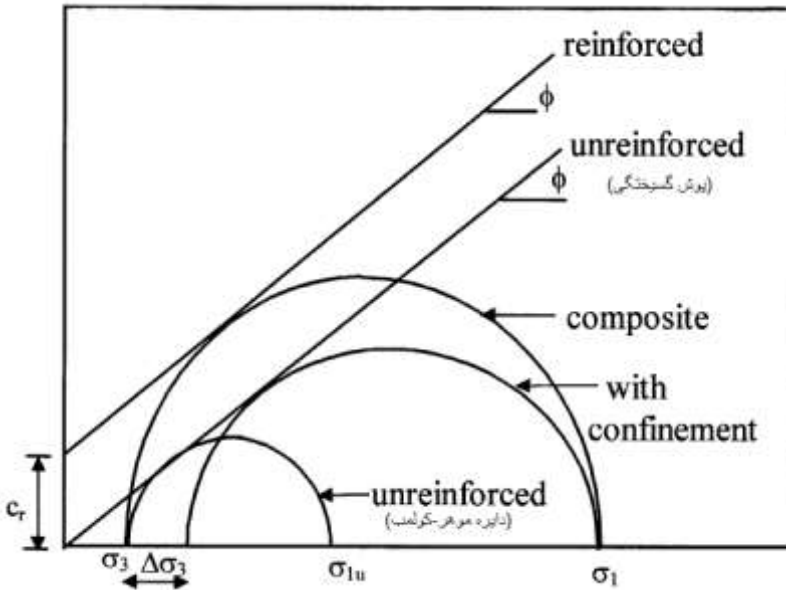
<sup>2</sup> Knight

<sup>3</sup> Rajagopal

<sup>4</sup> Henkel

<sup>5</sup> Gilbert

در شکل (۲-۱)، پوش گسیختگی موهر-کولمب برای خاک مسلح به ژئوسل بررسی می‌گردد:



شکل ۲-۱: مقایسه پوش گسیختگی خاک مسلح به ژئوسل و خاک غیرمسلح

با استفاده از تئوری گسیختگی موهر-کولمب با در نظر گرفتن دایره بزرگ می‌توان نوشت:

$$\sigma_1 = k_p \sigma_3 + 2C_r \sqrt{k_p} \quad (7-1)$$

$\sigma_1$  : تنش اصلی بزرگتر

$\sigma_3$  : تنش اصلی کوچکتر

$k_p$  : ضریب رانش غیرفعال

اگر همین رابطه برای خاک غیرمسلح با در نظر گرفتن اضافه تنش محصور کننده نوشته شود، نتیجه به صورت رابطه (۸-۱) خواهد بود.

$$\sigma_1 = k_p (\sigma_3 + \Delta\sigma_3) \quad (8-1)$$

با ترکیب روابط (۷-۱) و (۸-۱) نتیجه می‌شود:

$$C_r = \frac{\Delta\sigma_3}{2} \sqrt{k_p} \quad (9-1)$$

در نهایت از جاگذاری رابطه (۶-۱) در رابطه (۹-۱) میزان چسبندگی ظاهری به دست می‌آید:

$$C_r = \frac{M}{d_0} \left[ \frac{1 - \sqrt{1 - \varepsilon_a}}{1 - \varepsilon_a} \right] \sqrt{k_p} \quad (10-1)$$

ضمن اینکه طبق تحقیقات راجاگوپال و همکاران در سال ۲۰۰۱، عموماً در حین گسیختگی متوسط کرنش محیطی حدود ۲/۵٪ و کرنش محوری ۲/۸٪ می‌باشد.

### ۱-۷-۲ سختی

به کارگیری تسلیح سه بعدی باعث افزایش سختی و کاهش تغییر شکل خاک نیز می‌گردد. اما تا کنون روابط زیادی برای تعیین میزان دقیق اثر تسلیح بر سختی خاک پرکننده ارائه نشده است. بر اساس نتایج آزمایش‌های سه محوری فشاری روی خاک مسلح به ژئوسل توسط راجاگوپال و همکاران در سال ۲۰۰۱، رابطه تجربی غیرخطی زیر برای تعیین پارامتر  $k$  در مدل هیپربولیک دانکن برای خاک مسلح بر حسب پارامتر  $k$  خاک غیر مسلح و مدول سکانت  $M$  در لحظه گسیختگی (کرنش محوری ۰.۵٪) ارائه شد:

$$k_r = k_e + 200M^{0.16} \quad (11-1)$$

در رابطه (۱۱-۱)، پارامتر  $k$  در مدل هیپربولیک دانکن برای خاک مسلح،  $k_e$  پارامتر مذکور برای خاک غیر مسلح و  $M$  مدول سکانت ژئوسل در کرنش محوری ۰.۵٪ بر حسب  $kN/m$  می‌باشد.

این رابطه از آنالیز نتایج آزمایش‌های سه محوری بر خاک مسلح به تک سلول و سفره سلولی ژئوسل بدست آمده است. ژئوسل‌ها از ژئوگریدها و ژئوتکستایل‌های مختلف با خاک پرکننده نسبتاً متراکم تشکیل شده بودند. ضمناً تسلیح با ژئوسل تغییری در سایر پارامترهای مدل دانکن ایجاد نمی‌کند. به طور مجدد تأکید می‌شود از جایکه رابطه (۱۱-۲) یک رابطه تجربی است، برای استفاده از آن، پارامتر  $M$  الزاماً باید بر حسب  $kN/m$  باشد. ضمناً راجاگوپال و مادهوی<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۷، رابطه (۱۲-۱) را برای تعیین تأثیر تسلیح سه بعدی بر مدول یانگ خاک مسلح ارائه نمودند:

$$E_g = 4(\sigma_3)^{0.7} (k_e + 200M^{0.16}) \quad (12-1)$$

که در این رابطه  $E_g$  مدول یانگ و  $\sigma_3$  تنش محصور کننده می‌باشد.

<sup>1</sup> Madhavi

### ۱-۸ روش‌های مدل‌سازی عددی خاک مسلح به ژئوسل

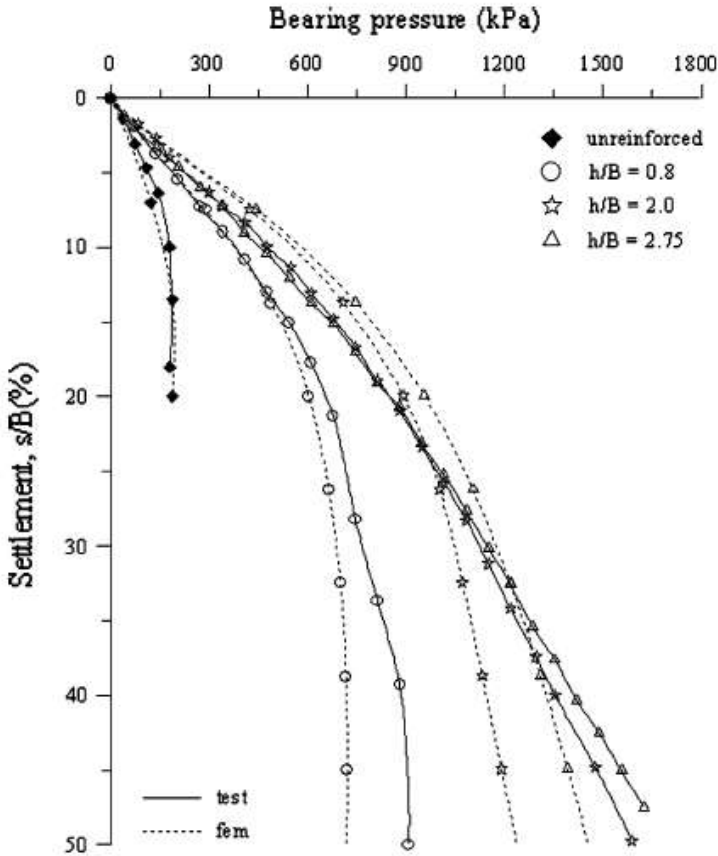
در مدل‌سازی عددی، برای مدل کردن خاک مسلح به ژئوسل، دو راه مستقیم و غیرمستقیم وجود دارد که هر کدام دارای مزایا و معایب خاص خود می‌باشند. در ادامه، هر کدام از این متدها، معرفی و بررسی می‌شوند.

#### ۱-۸-۱ مدل کردن به صورت مجزا (مستقیم)

در این روش، الزاماً نیاز به مدل‌سازی سه بعدی و مجزای خاک و مسلح کننده است تا بتوان اثر محصورشدگی جانبی را مشاهده نمود. دقت نتایج به دست آمده از روش مدل‌سازی مستقیم، بیشتر از روش غیرمستقیم است ولی به دلیل پیچیدگی بالای این متد مدل‌سازی و نیز عدم وجود روابط دقیق برای برخی از المان‌ها (مثل اندرکنش دیواره ژئوسل و خاک)، کاربرد کمتری دارد.

#### ۱-۸-۲ مدل کردن به صورت ماده مرکب (روش غیرمستقیم)

در این روش مدل‌سازی که با اقبال گسترده‌ای از سوی مهندسان رو به رو شده، مجموعه ژئوسل و خاک پرکننده به صورت یک ماده ترکیبی (کامپوزیت) در نظر گرفته می‌شود که چسبندگی و سختی آن به ترتیب از روابط (۱-۱۰) و (۱-۱۱) یا (۱-۱۲) محاسبه می‌گردد. پیچیدگی روش غیرمستقیم کمتر از روش مدل‌سازی مستقیم است، ولی مشکل آن، الزام به استفاده از پارامترهای مدل هیپربولیک دانکن (مطابق روابط ارائه شده در بالا) برای تخمین پارامترهای مدل رفتاری موردنظر می‌باشد. همچنین در صورت استفاده از مدل کامپوزیت، نمی‌توان شکل سلول ژئوسل و تأثیر آن بر عملکرد تسلیح سه بعدی را بررسی نمود. صحت استفاده از مدل مرکب تا کنون چندین بار تحقیق شده است. برای مثال ماده‌وی و همکاران در سال ۲۰۰۸ نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی خاک مسلح به ژئوسل را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرد (مطابق شکل (۱-۳)) و دقت روش مدل‌سازی کامپوزیت را اثبات نمود.

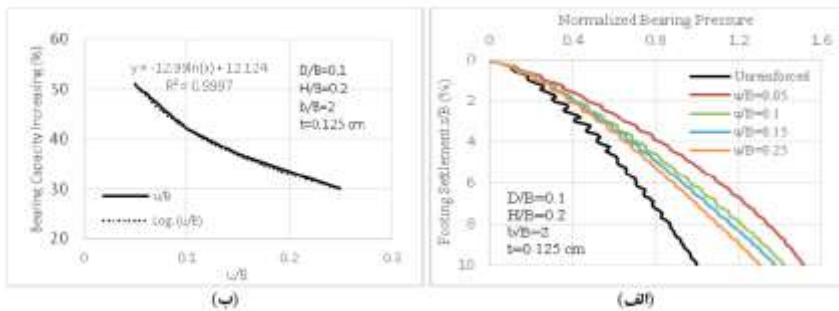


شکل ۱-۳: صحت سنجی استفاده از مدل کامپوزیت جهت مدل سازی خاک مسلح به ژئوسل

### ۱-۹ مروری بر مطالعات پیشین

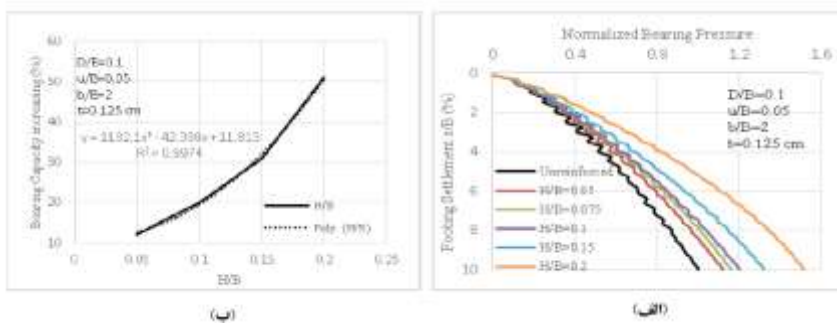
با گسترش استفاده از ژئوسینتتیک‌ها در پروژه‌های مختلف عمرانی، به تدریج تحقیقات مختلفی نیز در زمینه‌های گوناگون استفاده از این دسته از محصولات انجام شده است. البته بیشتر پژوهش‌های انجام شده در محدوده خاک مسلح، مربوط به مسلح کننده‌های دوبعدی مثل ژئوگرید و ژئوتکستایل و همچنین شرایط بارگذاری استاتیک بوده است. با گسترش استفاده از تسلیح سه بعدی در سال‌های اخیر، تحقیقات جدید در مورد خاک‌های مسلح به ژئوسل نیز انجام گردیده است. بسیاری از تحقیقات انجام شده بر خاک مسلح به ژئوسل، در زمینه ظرفیت باربری است. مثلاً غفارپور و شبانی (۱۳۹۳) به بررسی عددی عوامل تأثیرگذار بر ظرفیت باربری خاک‌های دانه‌ای مسلح شده با ژئوسل پرداختند. بدین جهت با استفاده از

نرم‌افزار سه بعدی، یک مدل کامپیوتری ساخته شد و عوامل موثر بر ظرفیت باربری پی نواری واقع بر خاک مسلح به یک لایه تسلیح کننده سه بعدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مربوط به مطالعات در زمینه عمق قرارگیری لایه ژئوسل زیر پی در شکل (۴-۱) آمده است. در شکل زیر  $u$  عمق دفن،  $B$  عرض پی،  $H$  ارتفاع ژئوسل،  $D$  قطر سلول‌های ژئوسل و  $t$  ضخامت ژئوسل می‌باشد.



شکل ۴-۱: نتایج مربوط به عمق قرارگیری لایه ژئوسل (غفاریور و شببانی، ۱۳۹۳)

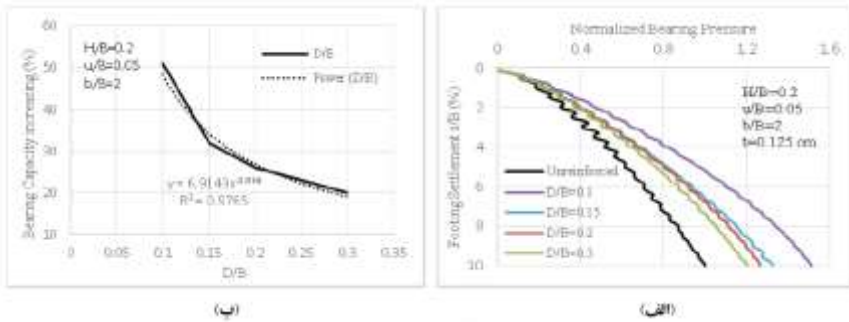
مطابق اشکال بالا، ظرفیت باربری پی نواری واقع بر خاک مسلح به ژئوسل، با افزایش عمق دفن به صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد. نتایج مربوط به ارتفاع لایه ژئوسل در شکل (۵-۱) آمده است.



شکل ۵-۱: نتایج مربوط به ضخامت لایه ژئوسل (غفاریور و شببانی، ۱۳۹۳)

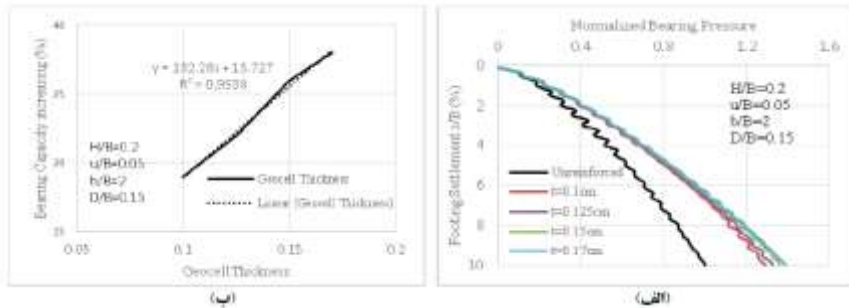
مطابق شکل بالا، با افزایش ضخامت لایه تسلیح سه بعدی، ظرفیت باربری خاک به صورت تابع چند جمله‌ای درجه دو افزایش می‌یابد. نمودارهای مربوط به تأثیر قطر بازشو بر عملکرد مسلح کننده در شکل زیر ارائه شده است.





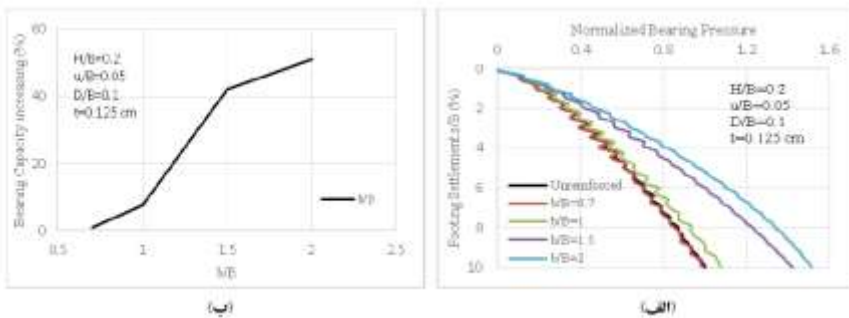
شکل ۱-۶: نتایج مربوط به قطر باز شو لایه ژئوسل (غفارپور و شبیانی، ۱۳۹۳)

مطابق شکل (۱-۶)، ظرفیت باربری پی واقع بر خاک دانه‌ای مسلح به ژئوسل، با افزایش قطر باز شو به صورت تابع نمایی کاهش می‌یابد. برای بررسی تأثیر ضخامت دیواره لایه ژئوسل از نتایج شکل (۱-۷) استفاده شده، مطابق با این شکل، با افزایش ضخامت دیواره، ظرفیت باربری به صورت خطی افزایش می‌یابد.



شکل ۱-۷: نتایج مربوط به ضخامت دیواره لایه ژئوسل (غفارپور و شبیانی، ۱۳۹۳)

در آخر، نتایج مربوط به عرض ناحیه تسلیح سه بعدی نیز در شکل زیر آمده است:



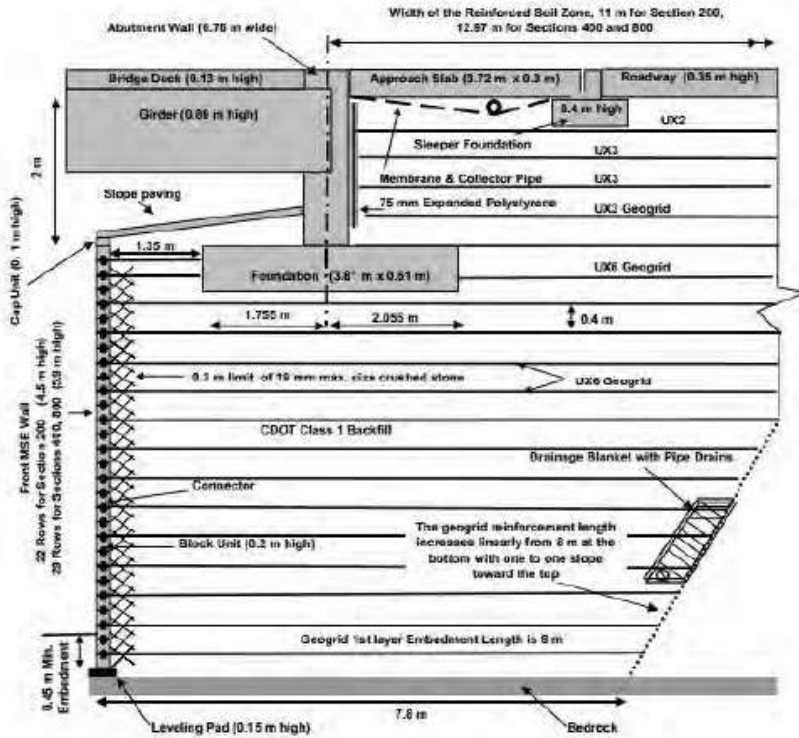
شکل ۱-۸: نتایج مربوط به عرض ناحیه تسلیح (غفارپور و شبیانی، ۱۳۹۳)

مطابق نمودارهای بالا، در عرض‌های تسلیم برابر یا کمتر از عرض پی، تسلیم با ژئوسل تأثیر چندانی بر ظرفیت باربری خاک دانه‌ای ندارد، در حالیکه با افزایش این سطح مسلح شده تا دو برابر عرض پی، مقدار ظرفیت باربری تا ۵۰٪ زیاد می‌شود. عامل سخی و منافی (۱۳۹۲) به بررسی پایداری شیروانی مسلح به ژئوفابریک پرداختند. نتایج نشان می‌دهند با افزایش مسلح کننده‌ها چه در حالت استاتیکی و چه در حالت شبه استاتیکی، ضریب اطمینان پایداری شیروانی افزایش می‌یابد. همچنین نتایج بدست آمده حاکی از افزایش ضریب اطمینان پایداری در اثر افزایش تعداد لایه‌های ژئوفابریک و نیز کاهش فاصله مسلح کننده‌ها از یکدیگر می‌باشد. باید اشاره نمود در برخی موارد پایداری شیروانی حاصل نمی‌گردد اما با این حال افزایش تعداد لایه‌های مسلح کننده، باعث افزایش ضریب اطمینان می‌شود. از سوی دیگر نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که افزایش تعداد لایه‌های ژئوفابریک، باعث می‌شود که طول مسلح کننده‌های لازم جهت تأمین پایداری شیروانی کاهش یابد. در این تحقیق همچنین نقش بستر ضعیف و قوی در پایداری شیروانی مسلح مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که هم در حالت استاتیکی و هم در تحلیل شبه دینامیکی، لایه بندی فونداسیون زمانی که لایه قوی در بالای لایه ضعیف قرار دارد، منجر به ضرایب اطمینان بالاتری نسبت به حالت لایه ضعیف مستقر بر بالای لایه قوی می‌گردد. ضمناً در تعداد لایه‌های کم ژئوفابریک، طول لازم مسلح کننده برای پایداری شیروانی به خصوص در حالتی که لایه ضعیف فونداسیون در بالای لایه قوی فونداسیون قرار گیرد، در حالت‌های استاتیکی و ضرایب متفاوت شبه استاتیکی تقریباً با یکدیگر یکسان است و در تعداد لایه‌های بالاتر، طول لازم در حالت شبه استاتیکی نسبت به حالت استاتیکی افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌گردد که با افزایش ضریب شبه استاتیکی زلزله میزان طول لازم نیز افزایش پیدا می‌کند.

عنایتی و قضاوی (۱۳۹۳) به بررسی رفتار لرزه‌ای کوله‌های مسلح به ژئوسل پرداختند. در این پژوهش تأثیر زاویه اصطکاک خاک مسلح بر کوله خاک مسلح با ژئوسل همراه با عرشه با استفاده از نرم افزار تفاضل محدود فلک<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار گرفته است. کوله مورد بررسی مربوط به پروژه فاندرا/میداو است که در سال ۱۹۹۹ در شهر دنور ایالت کلرادو آمریکا ابزارگذاری و مورد بهره برداری قرار گرفته است. تصویر مقطع کوله در شکل زیر آمده است:

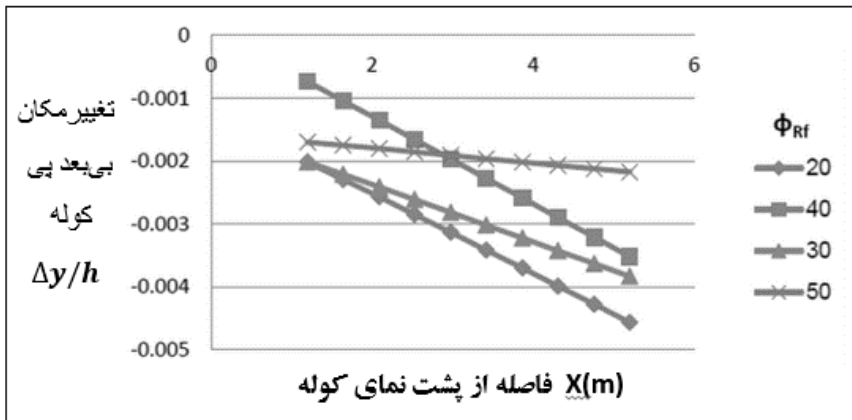
---

<sup>۱</sup> FLAC



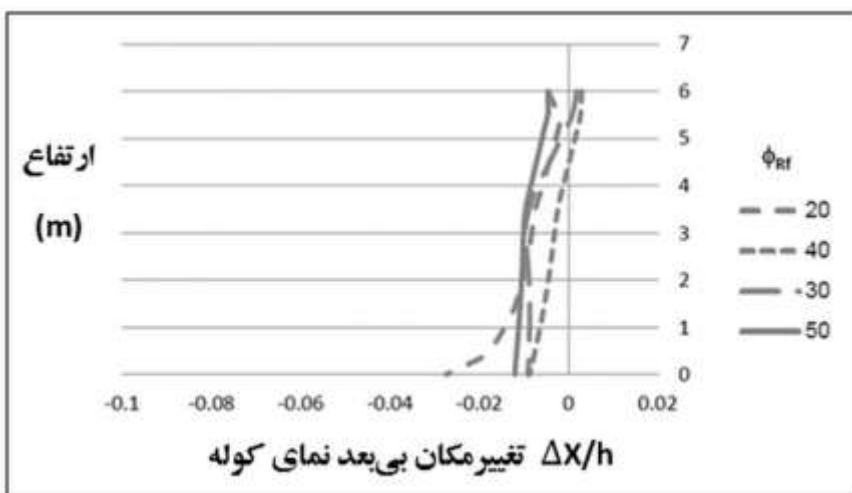
شکل ۱-۹: مقطع کوله مسلح، پروژه فاندرا (عنایتی و قضاوی ۱۳۹۳)

مطابق نتایج به دست آمده از این پژوهش، تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک مسلح بر حداکثر نیروی مسلح کننده‌ها در دو جهت مخالف است. با افزایش این زاویه، اصطکاک مسلح کننده با خاک افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه نیروی بیشتری به مسلح کننده اعمال می‌شود. در جهت عکس با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک مسلح، مقاومت خاک افزایش پیدا کرده و نیروی مسلح کننده‌ها کاهش می‌یابد. همچنین در تنش‌های قائم پایین‌تر که در سطوح بالای مدل وجود دارد تنش محصور کننده کم می‌باشد و ژئوسل راحت‌تر می‌تواند در اثر اصطکاک، نیرو جذب کند و باعث تغییر مکان جانبی شود، این فرآیند خود را بیشتر نشان می‌دهد. برای در نظر گرفتن اصطکاک بین ژئوسل و خاک این مقدار را در جهت اطمینان برابر با  $\frac{3}{4}$  زاویه اصطکاک داخلی خاک مسلح در نظر گرفته شده است. شکل ۱-۱۰ تغییرات تغییر مکان پی دیوار کوله را نشان می‌دهد.



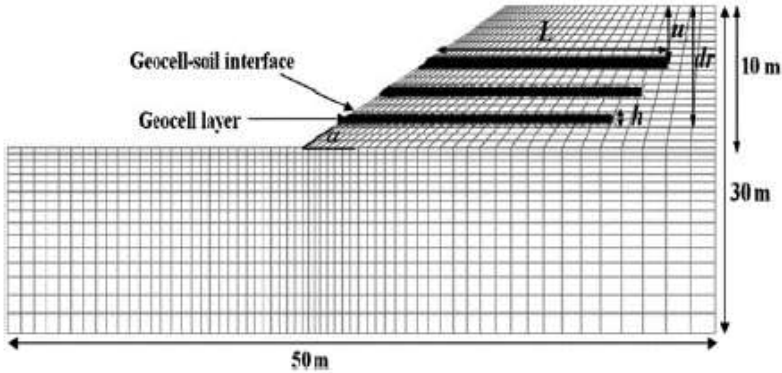
شکل ۱۰-۱: تغییرات تغییرمکان پی دیوار کوله به نسبت فاصله از دیوار (عنایتی و قضاوی، ۱۳۹۳)

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش زاویه اصطکاک خاک مسلح تغییرمکان قائم پی کوله در حال کاهش می‌باشد، ولی از مقداری به بعد به علت افزایش نیرو در ژئوسل مخصوصاً در نزدیکی نمای کوله تغییرمکان جانبی نمای کوله نیز همانطور که در شکل (۱۰-۱) مشخص است افزایش می‌یابد. در نتیجه‌ی این اتفاق زیر پی کوله که به نما نزدیکتر است، تغییرمکان بیشتر داده و خاکش میل به جلو آمدن دارد که این باعث می‌شود که حتی در زاویه اصطکاک‌های بالاتر، دوران پی به صورت پادساعتگرد در بیاید (علامت منفی در نمودارها نشانگر جهت روبه پایین یا روبه بیرون بودن جابه‌جایی‌ها است).



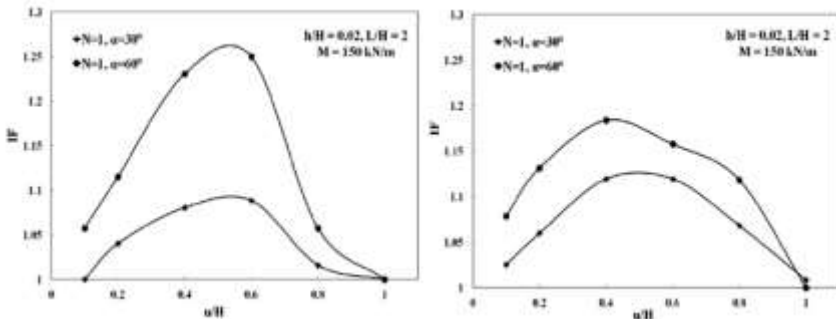
شکل ۱۱-۱: جابه‌جایی دیوار در ارتفاع (عنایتی و قضاوی، ۱۳۹۳)

در تحقیق دیگری مهدی پور و همکاران (۲۰۱۳) مطالعاتی در زمینه شیروانی مسلح به ژئوسل تحت رفتار استاتیکی داشتند. در این تحقیق با استفاده از نرم افزار دو بعدی فلک یک شیروانی مسلح به ژئوسل با شیب ۴۵ درجه، طول ۷ متر از لبه شیب، ارتفاع ۴ متر و با مدل رفتاری موهر-کولمب شبیه سازی شده است. مدل کامپیوتری ساخته شده در شکل (۱۲-۱) ارائه گردیده:



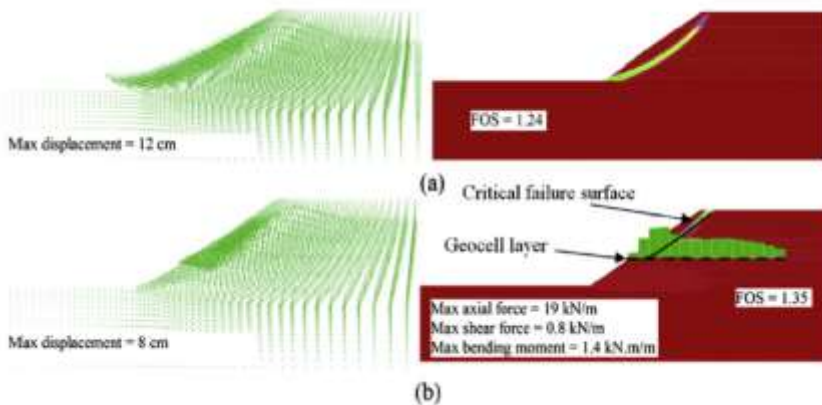
شکل ۱-۱۲: مدل پژوهش مهدی پور و همکاران (۲۰۱۳)

در این تحقیق، مدول یانگ و چسبندگی خاک مسلح با ژئوسل با استفاده از روش کامپوزیت (مرکب) محاسبه شده است. برای بررسی تأثیر لایه ژئوسل از ضریب بهبود (IF) استفاده شده که به صورت نسبت ضریب اطمینان پایداری شیروانی در حالت های مسلح و غیرمسلح بیان می شود. نتایج مربوط به عمق قرار گیری لایه ژئوسل برای شیروانی های ماسه ای و رسی در شکل ۱-۱۳ آمده است.



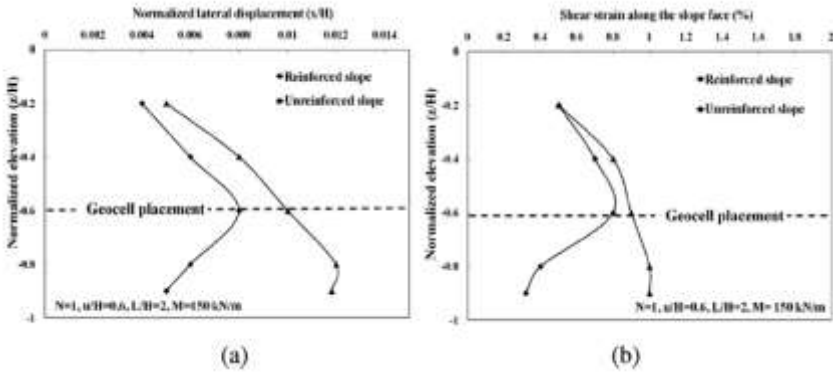
شکل ۱-۱۳: ضریب بهبود عملکرد برای خاک های ماسه ای و رسی در پژوهش مهدی پور و همکاران (۲۰۱۳)

مطابق نمودارهای بالا، تا عمق مشخصی، با افزایش فاصله لایه مسلح کننده، ضریب بهبود عملکرد افزایش می‌یابد. دلیل این امر در درجه اول آن است که لایه اولیه ژئوسل، تنش‌های قائم را به صورت یکنواخت‌تر توزیع می‌کند. ضمناً مقاومت خمشی لایه تسلیح و نیز توانایی لایه مسلح کننده در تحمل تنش‌های کششی از دلایل افزایش پایداری شیروانی مسلح است، اما با افزایش عمق جاگذاری لایه مسلح کننده، ضریب اطمینان پایداری شیروانی مسلح و در نتیجه ضریب بهبود عملکرد کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش فاصله لایه اول از سطح شیروانی، توزیع یکنواخت نیرو با کیفیت قبل (فاصله کمتر لایه اول ژئوسل) صورت نمی‌گیرد. به نظر می‌رسد در هر دو نوع خاک ماسه‌ای و رسی، نسبت ۰/۴ ارتفاع شیروانی، بهترین مکان برای جاگذاری لایه اول ژئوسل می‌باشد. سطوح گسیختگی و بردارهای تغییر مکان مربوط به شیروانی‌های ماسه‌ای و رسی مسلح در شکل ۱-۱۴ آمده است.



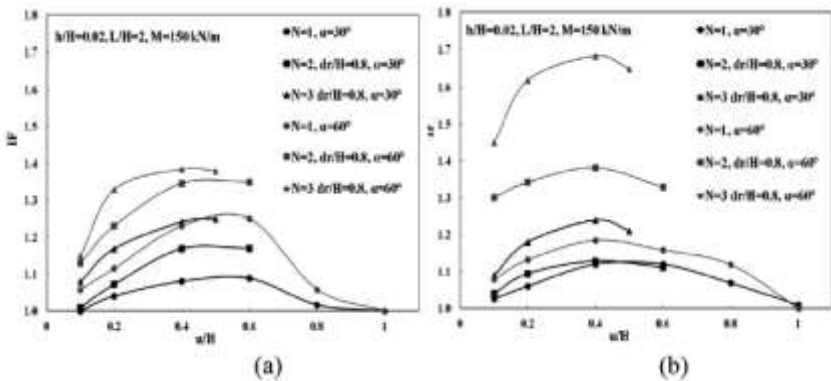
شکل ۱-۱۴: سطوح گسیختگی و بردارهای تغییر مکان برای خاک‌های دانه‌ای و رسی در تحقیق مهدی پور و همکاران (۲۰۱۳)

مطابق نمودارهای بالا، لایه تسلیح سه بعدی همانند یک دال عمیق عمل کرده و می‌تواند سطح شکست را کنترل کند. بدین صورت، گسیختگی فقط در ناحیه بالا به وجود می‌آید. علاوه بر آن کشش ایجاد شده در لایه ژئوسل باعث افزایش مقاومت برشی تماسی می‌گردد. بدین ترتیب ضریب اطمینان و تغییر شکل جانبی شیروانی بهبود می‌یابد. نمودارهای مربوط به تغییرات تغییر مکان جانبی شیروانی ماسه‌ای و نیز کرنش برشی در نمای آن در شکل زیر آمده است:



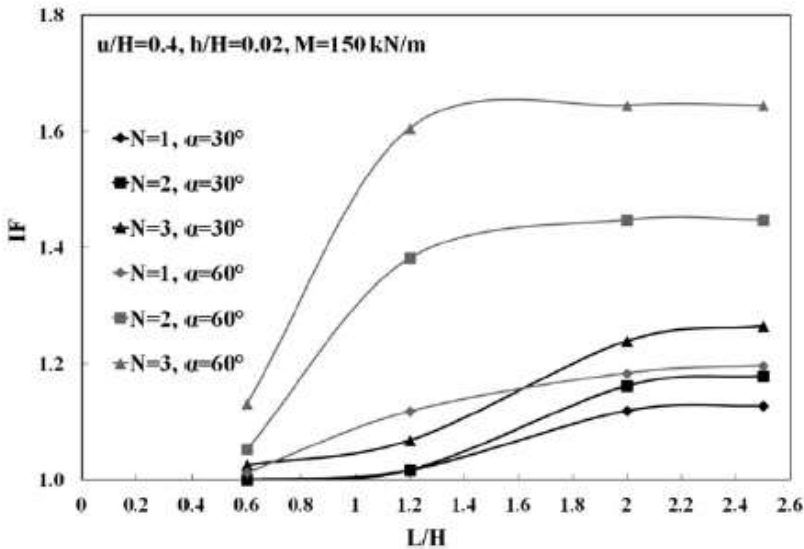
شکل ۱-۱۵: تغییر مکان جانبی شیروانی ماسه‌ای و نیز کرنش برشی در نمای آن در تحقیق مهدی پور و همکاران (۲۰۱۳)

مطابق اشکال بالا ناحیه‌ای که در آن حداکثر تغییر مکان جانبی اتفاق می‌افتد، در شیروانی‌های مسلح و غیرمسلح متفاوت است. در شیروانی‌های غیرمسلح این حداکثر تغییر مکان جانبی عموماً در ارتفاع ۰/۸ ارتفاع شیروانی از بالا روی می‌دهد. اما در شیروانی‌های مسلح بسته به عمق قرارگیری لایه ژئوسل متفاوت است. در واقع در اینگونه از شیروانی‌ها، تغییر مکان از تاج شیروانی زیاد شده و در عمق لایه مسلح کننده به حداکثر می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد. دلیل آن هم این است که در پایین لایه تسلیح سه بعدی، مقاومت در برابر حرکت جانبی خاک افزایش می‌یابد و در نتیجه تغییر مکان جانبی شیروانی کم می‌گردد. تأثیر تعداد لایه مسلح کننده در پایداری شیروانی در اشکال ۱-۱۶ ارائه شده است.



شکل ۱-۱۶: تأثیر تعداد لایه مسلح کننده در پایداری شیروانی (a) برای خاک ماسه‌ای و (b) برای خاک رسی در پژوهش مهدی پور و همکاران (۲۰۱۳)

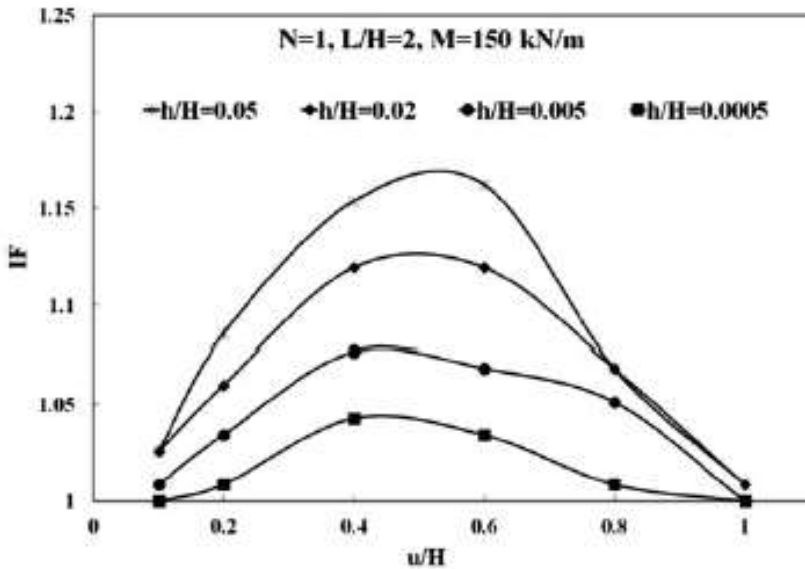
مطابق اشکال بالا و مطابق انتظار، با افزایش تعداد لایه تسلیح، ضریب بهبود عملکرد افزایش می‌یابد. دلیل این مسئله این است که سطح تماس بیشتری بین خاک و ژئوسل به وجود می‌آید. در نتیجه مقاومت برشی بیشتری در مقابل سطح گسیختگی بسیج می‌شود و لایه مسلح کننده مانع از تغییر مکان جانبی می‌گردد. ضمناً مطابق اشکال مذکور، تعداد لایه مسلح کننده در هر مورد متفاوت است و بستگی به عمق قرار گیری لایه اول دارد. در واقع لایه اول صفحات گسیختگی محتمل را کنترل می‌کند و بارها را یکنواخت تر توزیع می‌نماید. بدین صورت با توزیع بار توسط لایه اول، بار به صورت یکنواخت اما تا اعماق بیشتر توزیع می‌شود. سپس نوبت لایه‌های زیرین است که وظیفه آن‌ها، کاهش تغییر مکان جانبی است. نتایج مربوط به تأثیر طول لایه مسلح کننده در شکل زیر آمده است.



شکل ۱-۱۷: تأثیر طول لایه مسلح کننده برای خاک رسی در پژوهش مهدی پور و همکاران (۲۰۱۳)

مطابق نمودار بالا، طبق انتظار با افزایش طول لایه مسلح کننده و به دنبال آن افزایش سطح تماس، ضریب بهبود عملکرد افزایش می‌یابد، گرچه از طول حدود ۱/۲ ارتفاع شبروانی به بعد، شیب افزایشی کم است. نمودارهای مربوط به ضخامت لایه مسلح کننده در شکل زیر نشان داده شده است.

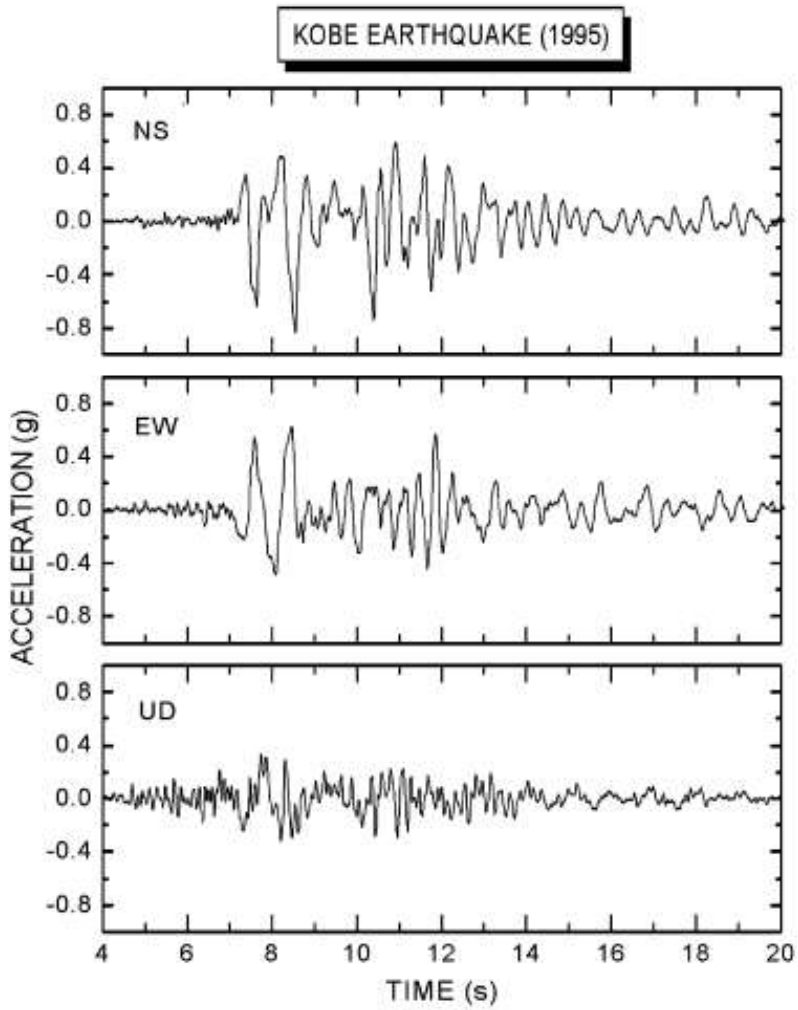




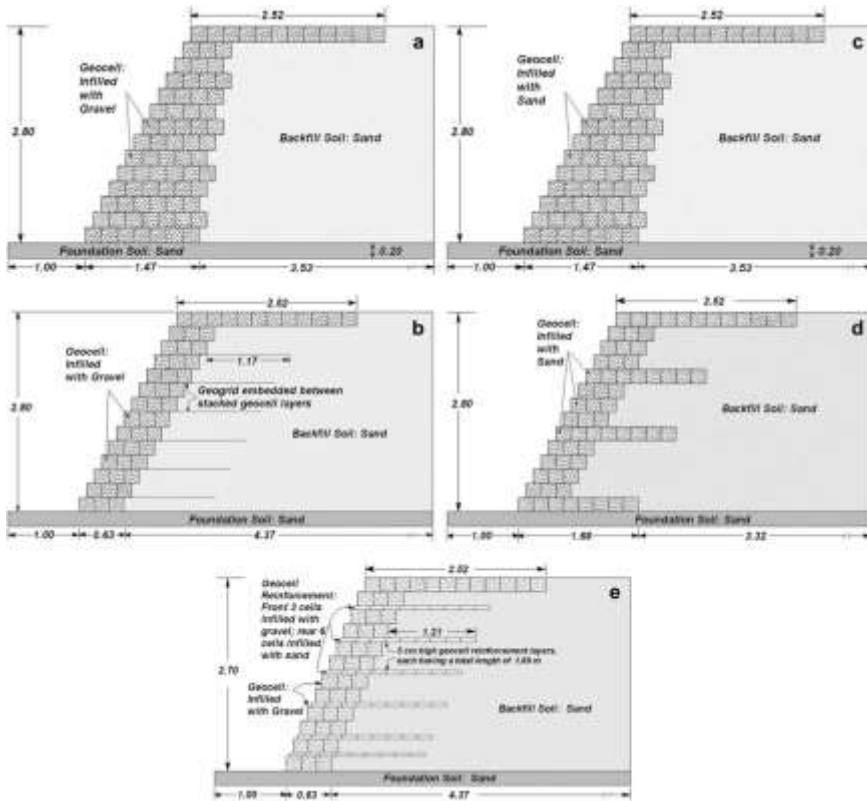
شکل ۱۸-۱: تأثیر ضخامت لایه مسلح کننده برای خاک ماسه‌ای در پژوهش مهدی پور و همکاران (۲۰۱۳)

مطابق شکل مذکور، با افزایش ضخامت (ارتفاع) لایه مسلح کننده، ضریب اطمینان و در نتیجه ضریب بهبود عملکرد ابتدا افزایش می‌یابد، زیرا سطح تماس و اصطکاک خاک و ژئوسل بیشتر می‌شود. اما در ارتفاع‌های کم بیشتر به دلیل تداخل عملکرد لایه‌های ژئوسل و توزیع بد تنش وارده، ضریب بهبود عملکرد کم می‌گردد. لَشچینسکی<sup>۱</sup> و همکاران در سال (۲۰۰۹) با استفاده از آزمایش میز ویبره به مدل‌سازی فیزیکی شیروانی‌های مسلح به ژئوسل پرداختند. آزمایش‌ها در کشور ژاپن انجام شد. باکس (جعبه) آزمایش به ابعاد ۶ متر طول، ۲ متر عرض و ۳ متر ارتفاع بود. برای کاهش بازخورد و برگشت امواج به داخل توده خاک در کف و صفحات کناری، مابین خاک و جداره باکس صفحات پلی استایرن به ضخامت ۵ میلی‌متر استفاده شده بود تا انرژی را جذب کند. ضمن اینکه برای کاهش اصطکاک بین خاک و صفحات مذکور، از صفحات گریسکاری شده استفاده شده بود. برای انجام آزمایش، تاریخچه زمانی زلزله کوبه ژاپن که در شکل زیر ارائه شده است، به شیروانی مسلح شده اعمال شد. راستای شتاب مذکور در دو جهت شمال-جنوب و بالا-پایین بوده است. نمای کلی آزمایش‌های انجام شده در شکل زیر ارائه گردیده است.

<sup>1</sup> Leshchinski



شکل ۱-۱۹: تاریخچه زمانی زلزله کوبه جهت آزمایش لشچینسکی و همکاران در سال (۲۰۰۹)



شکل ۱-۲۰: شمای کلی پنج آزمایش لشیچینسکی و همکاران در سال (۲۰۰۹)

مطابق شکل بالا، شیروانی‌ها جز در مورد آزمایش شماره ۵، دارای ۲/۸ متر ارتفاع بودند، که روی فونداسیون به ضخامت ۰/۲ متر قرار داشتند. در تست شماره ۵، ارتفاع شیروانی ۲/۷ متر بود و از ژئوسل به ضخامت ۰/۰۵ متر استفاده شده بود. در تمام موارد شیب شیروانی تقریباً ۶۴ درجه بوده است. ضمناً در تمامی موارد لایه بالایی ژئوسل ۲/۵۲ متر طول داشت که از لایه‌های زیرین بلندتر بوده است. همانطور که در شکل (۱-۲۰) ملاحظه می‌شود، تست‌های اول و سوم کاملاً شبیه هم بوده‌اند و اختلاف آن‌ها در ماده پرکننده ژئوسل‌ها است. بدین ترتیب که در تست اول، ژئوسل از شن متراکم پر شده اما در تست سوم از ماسه ریز پر گردیده است. بدین صورت این دو آزمایش را می‌توان نمونه‌ای از دیوارهای وزنی قلمداد کرد. در تست دوم، ژئوسل با شن پر شده و در آن از تقویت مضاعف ژئوگرید نیز بهره گرفته شده، طول لایه‌های ژئوگرید ۱/۸ متر و فاصله آن‌ها از هم ۰/۴ متر بوده است. در آزمایش چهارم، ژئوسل از ماسه‌ای شبیه ماسه شیروانی پر شده است. در تمامی موارد، خاک شیروانی، ماسه

ریز یکنواخت با زاویه اصطکاک ۳۰ درجه بوده است. تست پنجم به عنوان یک تست اقتصادی مطرح بوده و حجم تسلیح آن نصف آزمایش چهارم بوده است. در این تست نیز ژئوسل نما از شن متراکم پر شده ولی ژئوسل‌های دیگر که تا درون شیروانی امتداد داشته‌اند، با ماسه‌ای همانند ماسه موجود در شیروانی پر شده‌اند. در جدول زیر، شتاب‌های وارد شده در هر تست آمده است.

جدول ۱-۲: حداکثر شتاب‌های وارد شده در هر آزمایش لشیچینسکی و همکاران در سال (۲۰۰۹)

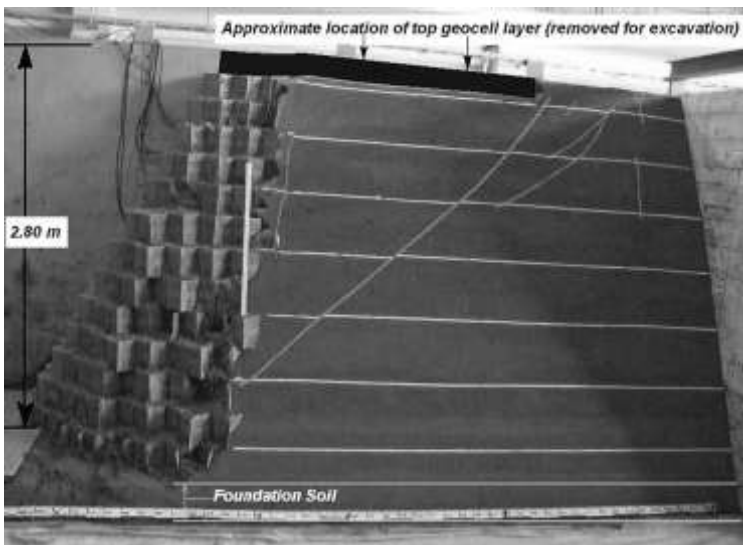
Recorded PGA in field (Fig. 1)	Test	Applied peak acceleration at base of shake table					
		Horizontal PGA at each loading stage (g)			Vertical PGA at each loading stage (g)		
		1	2	3	1	2	3
Horizontal: 0.59g, vertical: 0.34g	1	0.46	0.92	N/A	0.21	0.42	N/A
	2	0.46	0.94	1.21	0.20	0.39	0.47
	3	0.48	0.94	N/A	0.20	0.39	N/A
	4	0.47	0.95	1.22	0.20	0.37	0.48
	5	0.41	0.87	1.21	0.18	0.34	0.50

مطابق جدول بالا، در آزمایش‌های ۱ و ۳، شتاب مورد نظر در دو مرحله و با وقفه یک ساعته به شیروانی وارد شده است. در حالیکه در آزمایش‌های ۲، ۴ و ۵، شتاب مذکور در سه مرحله به شیروانی وارد شده است. پس از انجام لرزه، مقادیر حداکثر تغییر مکان دائمی نما و نیز حداکثر نشست تاج شیروانی، در هر مورد قرائت شده که نتایج آن در جدول ۱-۳ ارائه شده است.

جدول ۱-۳: حداکثر تغییر مکان دائمی نما و نیز حداکثر نشست تاج شیروانی لشیچینسکی و همکاران در سال (۲۰۰۹)

Test	Maximum permanent displacement of face (mm)	Maximum settlement of crest (mm)
1	31	27
3	47	40
2	95	115
4	150	150
5	95	85

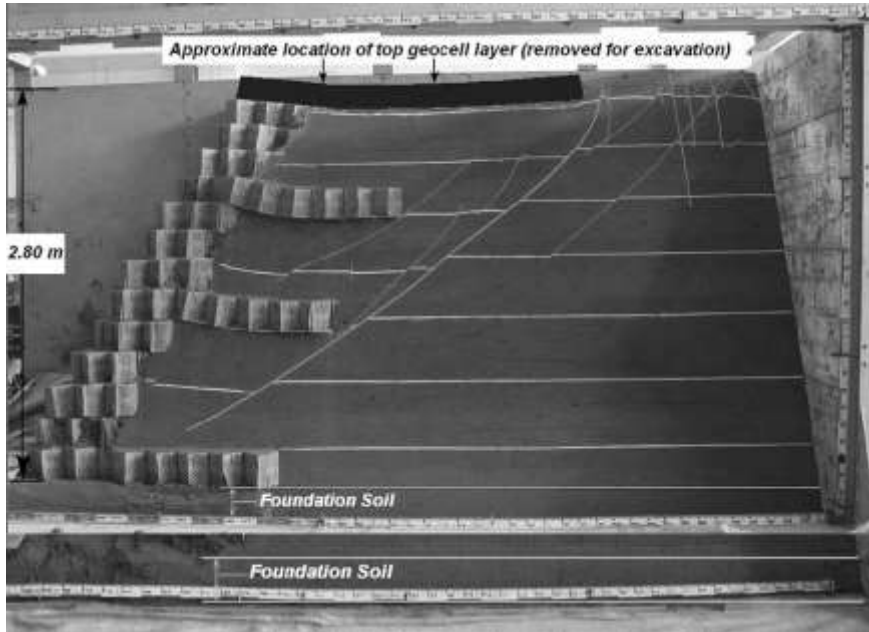
مطابق جدول بالا، برای مقایسه تست‌های اول و سوم در می‌یابیم که در آزمایش اول، حداکثر تغییرمکان دائم نما و نیز حداکثر تغییرمکان تاج سد به ترتیب ۳۱ و ۲۷ میلیمتر بوده است در حالیکه همین ابعاد برای تست سوم به ترتیب ۴۷ و ۴۰ میلیمتر قرائت گردیده. در واقع استفاده از شن به عنوان خاک پرکننده به جای ماسه، باعث شده تسلیح بسیار قدرتمندتری انجام شود. می‌توان نتیجه گرفت که هر چه خاک داخل ژئوسل درشت‌تر باشد، تسلیح سه بعدی در مقابل بارهای لرزه‌ای بهتر عمل می‌کند. علاوه بر آن، در آزمایش اول که ژئوسل با شن پر شده بود، هیچ سطح گسیختگی خاصی پدید نیامد و فقط تعدادی ترک به وجود آمد که در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۱-۲۱: سطوح گسیختگی به وجود آمده در آزمایش سوم لشچینسکی و همکاران در سال (۲۰۰۹)

با بررسی آزمایش‌های ۲، ۴ و ۵ به نتایج جالبی دست می‌یابیم، در تست دوم، حداکثر تغییر مکان نما و نیز حداکثر تغییرمکان جانبی شیب، به ترتیب ۹۵ و ۱۱۵ میلیمتر است، در صورتی که همین ابعاد برای تست چهارم، ۱۵۰ و ۱۵۰ میلیمتر است. به علاوه در آزمایش دوم هیچ سطح گسیختگی واضحی دیده نمی‌شود و فقط ناپیوستگی‌های جزئی و ریز نزدیک به خاک سطح و پشت لایه ژئوسل مشاهده می‌گردد. اما در آزمایش چهارم (مطابق شکل ۱-۲۲)، سطوح گسیختگی واضح مشاهده شده، این سطوح گسیختگی از زیر لایه ژئوسل شروع

به گسترش می‌کند. البته در همین حالت نیز گوه گسیختگی ایجاد نشده و فقط برخی تغییرمکان‌های بزرگ، آن هم در بیشترین شتاب وارده به وجود آمده است.



شکل ۱-۲۲: سطوح گسیختگی به وجود آمده در آزمایش چهارم لشیچینسکی و همکاران در سال (۲۰۰۹)

با مقایسه آزمایش‌های دوم و چهارم مشخص است که اولاً، به کارگیری تسلیح سه بعدی، در پایداری لرزه‌ای شیروانی‌ها موثر است به طوری که فقط در شتاب بالا می‌توان تقریباً سطوح گسیختگی را مشاهده کرد. در همین حال هم گوه گسیختگی به طور کامل تشکیل نمی‌شود و دوران رخ نمی‌دهد و فقط تغییرمکان‌های نسبتاً بزرگ پدید می‌آید، اما در صورتیکه ژئوسل با خاک دانه‌ای تر پر شود و ضمناً تسلیح مضاعف دو بعدی نیز انجام گردد. گسیختگی تقریباً به طور کامل قابل کنترل است. در تست پنجم (مطابق شکل ۱-۲۳) دو سری سطح گسیختگی دیده می‌شود. در ابتدا و در عمق کم، یک سطح تشکیل شده و سپس در عمق بیشتر سطح گسیختگی دوم پدید می‌آید. سطح گسیختگی اول از چهار لایه ژئوسل به ضخامت ۰/۰۵ متر گذشته است. یعنی این ضخامت کم بوده و لایه ژئوسل به قدر کافی تغییر شکل داده و خم شده تا سطح گسیختگی به وجود بیاید. این مسئله بدین معنی است که

علاوه بر آنکه حجم تسلیح در پایدارسازی شیروانی موثر است، نحوه توزیع آن هم می‌بایست بررسی گردد.



شکل ۱-۲۳: سطوح گسیختگی به وجود آمده در آزمایش پنجم لشچینسکی و همکاران در سال (۲۰۰۹)





## فصل دوم: مواد و روش‌ها

### ۲-۱ کلیات

برای انجام مطالعات پارامتریک، نیاز به ساخت مدل نرم‌افزاری با دقت مناسب است. به همین دلیل، در این فصل ابتدا یکی از آزمایش‌های موجود در ادبیات فنی انتخاب می‌شود، سپس با استفاده از نرم‌افزار پلکسیس دو بعدی، آزمایش مذکور شبیه‌سازی شده و نتایج مدل نرم‌افزاری با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. در صورتیکه اختلاف نتایج حاصل از دو روش مذکور در حد قابل قبول بود، یعنی دقت مدل نرم‌افزاری ساخته شده مناسب است و می‌توان مطالعات پارامتریک را با استفاده از آن انجام داد. در این صورت نتایج مطالعات پارامتریک معتبر می‌باشد.

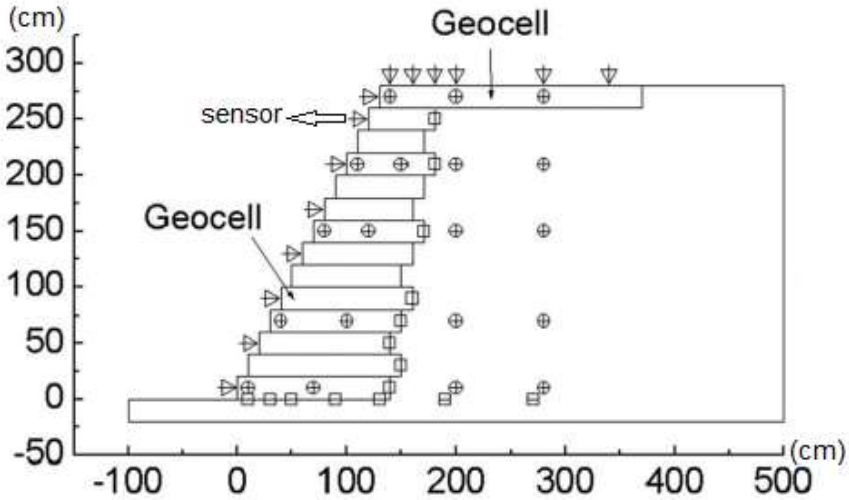
### ۲-۲ مدل آزمایشگاهی

برای انجام صحت‌سنجی مدل نرم‌افزاری، از آزمایش میز ویبره لینگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۹) استفاده شده است. مدل‌سازی با استفاده از میز ویبره به ابعاد ۶ متر طول و ۴ متر عرض و در باکس (جعبه) به ابعاد ۴ متر طول، ۲ متر عرض و ۲/۸ متر ارتفاع (۰/۲ متر فونداسیون) انجام شده است. یک سطح از دیواره باکس از مواد شفاف ساخته شده تا روند انجام آزمایش بر شیروانی مذکور قابل رویت باشد. داخل سطوح جعبه هم از ورق‌های جاذب انرژی پلی استایرن با ضخامت ۵۰ میلی‌متر استفاده شده تا انرژی موج خروجی جذب شود و به داخل شیروانی برنگردد. برای انجام آزمایش، بخشی از شتابنگاشت زلزله کوبه ژاپن در راستاهای شمال-جنوب و بالا-پایین به نمونه آزمایشگاهی وارد شده است.

---

<sup>۱</sup> Ling

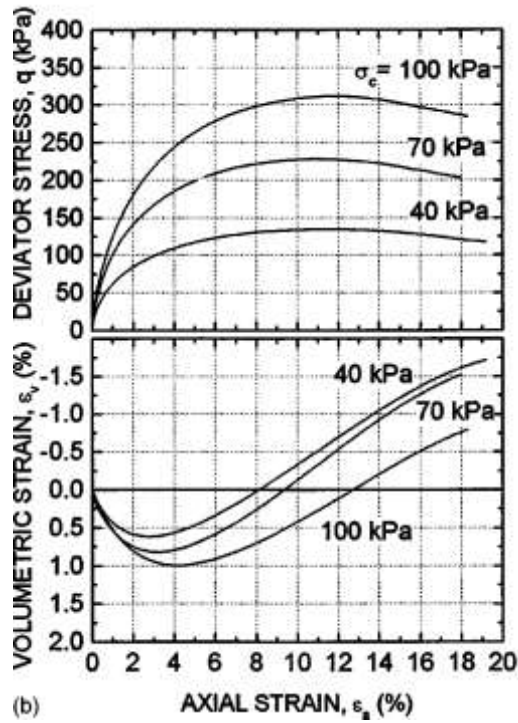
نمای کلی آزمایش انجام شده مطابق شکل زیر است:



شکل ۲-۱: نمای کلی آزمایش لینگ و همکاران (۲۰۰۹)

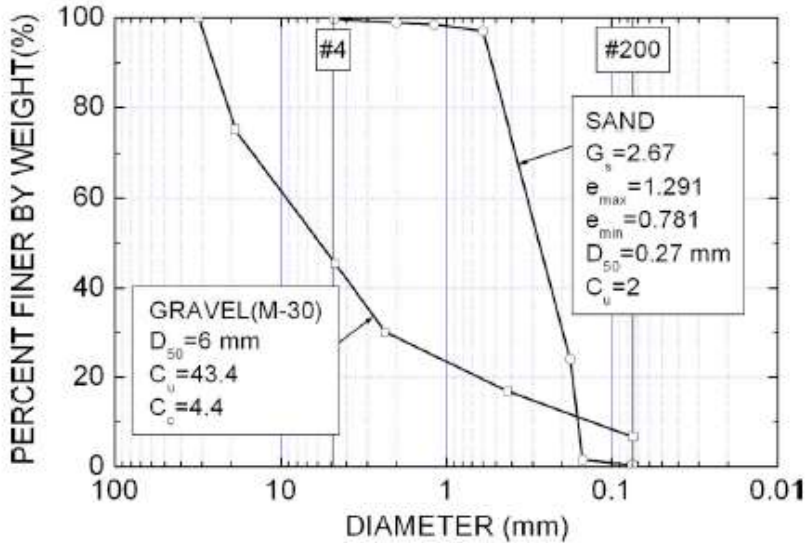
برای آزمایش‌های میز لرزه، لینگ و همکاران (۲۰۰۹) از یک خاک ماسه‌ای یکنواخت برای ساخت شیروانی استفاده کردند. شکل (۲-۲) نتایج آزمایش سه محوری را بر روی این نوع خاک نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که بر اساس نتایج این آزمایش می‌توان پارامترهای مدل هذلولی و مدل خاک سخت شونده<sup>۱</sup> (جهت نرم‌افزار) را محاسبه کرد که بعداً به آن اشاره خواهد شد.

<sup>۱</sup> Hardening Soil



شکل ۲-۲: نتایج آزمایش سه محوری خاک ماسه‌ای لینگ و همکاران (۲۰۰۹)

همچنین برای پر کردن داخل سلول‌های ژئوسل از یک نوع شن استاندارد با نام M-35 (قطر بزرگترین سنگ‌دانه‌ها برابر ۳۵ میلیمتر) استفاده گردید. نمودار دانه‌بندی مصالح مذکور در شکل زیر ارائه شده است.



شکل ۲-۳: نتایج آزمایش دانه‌بندی خاک‌های ماسه‌ای و شنی لینگ و همکاران (۲۰۰۹)

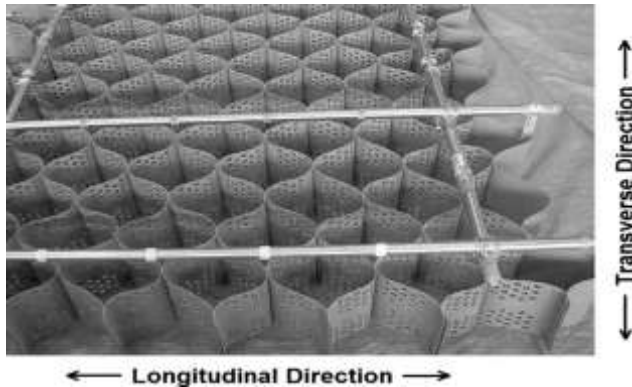
سایر مشخصات خاک‌های مورد استفاده در جدول زیر آمده است:

جدول ۲-۱: مشخصات خاک‌های مورد استفاده

توضیحات	خاک مسلح به ژئوسل	شن	خاک ماسه‌ای	پارامتر
چسبندگی	-	0.1	0.1	$C$ (KN/m <sup>2</sup> )
زاویه اصطکاک داخلی	52	52	38	$\phi$
ضریب پواسون	0.2	0.2	0.2	$\nu$
وزن مخصوص خشک	20	20	15.6	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )
وزن مخصوص اشباع	21	21	17	$\gamma_{sat}$ (KN/m <sup>3</sup> )

ژئوسل مورد استفاده در آزمایش از صفحات پلی اتیلن پر مقاومت (HDPE) با ضخامت ۱/۲ میلیمتر و ارتفاع و قطر سلول برابر ۲۰ سانتیمتر ساخته شده است. ژئوسل دارای مقاومت متوسط ۵۰ kN/m بوده که معادل مقاومت ۱۰ کیلونیوتن به ازای هر سلول است. با استفاده از این مقدار به عنوان پارامتر مدول  $M$  می‌توان از مدل کامپوزیت برای مدل‌سازی خاک

مسلح به ژئوسل استفاده کرد. در شکل (۲-۴) زیر تصویری از لایه‌های ژئوسل نشان داده شده است.



شکل ۲-۴: نمونه ژئوسل‌های مورد استفاده در آزمایش لینگ و همکاران (۲۰۰۹)

### ۲-۳ مدل نرم‌افزاری

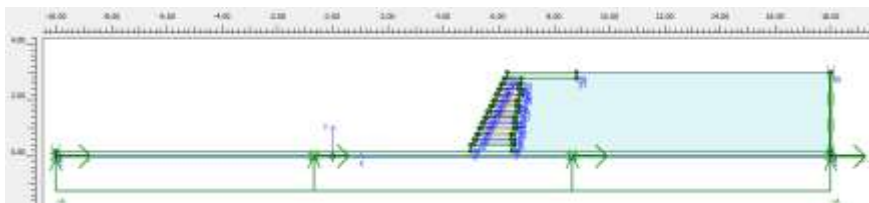
همانطور که پیشتر ذکر شد، برای انجام مدل‌سازی نرم‌افزاری از برنامه پلکسیس دو بعدی استفاده شده است. پلکسیس نرم‌افزاری المان محدود و پیشرفته برای تحلیل تغییرشکل‌ها و پایداری می‌باشد و در پروژه‌های مهندسی ژئوتکنیک کاربرد دارد. اولین نسخه این نرم‌افزار به منظور آنالیز سدهای خاکی احداث شده روی خاک‌های نرم در قسمت‌های کم ارتفاع و پست کشور هلند و به سفارش مدیریت منابع آب آن کشور در دانشگاه صنعتی دلفت<sup>۱</sup> در سال ۱۹۸۷ تهیه و سپس در سال ۱۹۹۳ قابلیت‌های آن گسترش داده شده که توسط موسسه Center for Civil Engineering Research and Codes مورد تأیید و پشتیبانی قرار گرفته است. از قابلیت‌های دیگر نرم‌افزار می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- (۱) نرم‌افزار اجزای محدود برای تحلیل دوبعدی تغییرشکل و پایداری در مهندسی ژئوتکنیک
- (۲) تهیه مدل‌های ترکیبی پیشرفته شبیه‌سازی غیرخطی، وابسته به زمان و رفتار ناهمسانگرد خاک و سنگ
- (۳) استفاده از روش‌های ویژه برای حل مسائل هیدرواستاتیک و غیره هیدرواستاتیک فشار منفذی در خاک
- (۴) مدل‌سازی سازه و اندرکنش بین خاک و سازه
- (۵) دارای محیط گرافیکی بسیار قدرتمند

<sup>۱</sup> Delft

- (۶) مش بندی خودکار به صورت دوبعدی
- (۷) ایجاد خودکار سه‌بعدی مدل
- (۸) دارای المان‌های دوبعدی ۶ گرهی و ۱۵ گرهی
- (۹) دارای المان‌های ویژه ورق، مفصل و فنرهای دورانی
- (۱۰) دارای المان‌های تماسی
- (۱۱) دارای انواع روش‌های بارگذاری متمرکز و گسترده
- (۱۲) امکان مدل کردن شرایط مرزی پیچیده
- (۱۳) امکان استفاده از انواع مسلح کننده‌های خاک
- (۱۴) در نظر گرفتن انواع مدل‌های رفتاری خاک
- (۱۵) امکان در نظر گرفتن سطح آب زیرزمینی
- (۱۶) دارای گزینه‌های تحلیلی پیشرفته

در شکل (۲-۵) تصویر مدل ساخته شده توسط نرم‌افزار نشان داده شده است. برای افزایش دقت تحلیل، از المان‌های ۱۵ گرهی استفاده شده و مطابق آنالیزهای حساسیت، شبکه مش بندی نیز به صورت ریز<sup>۱</sup> انجام شده است. برای ایجاد فاصله مناسب بین مرزها تا مدل اصلی نیز طبق آنالیزهای حساسیت صورت گرفته، طول کلی مدل ۵ برابر ارتفاع دیوار لحاظ شده است. همچنین مدل بر روی لایه‌ای الاستیک معرف صفحه فلزی بستر همچون روند آزمایش قرار گرفته است.



شکل ۲-۵: مدل دیوار مسلح به ژئوسل در نرم‌افزار پلکسیس

برای ساخت مدل نرم‌افزاری، موارد زیر در نظر گرفته شده است:

<sup>۱</sup> fine

## ۲-۳-۱ مدل رفتاری خاک

به طور ساده مدل رفتاری خاک یک رابطه ریاضی برای توصیف رفتار تنش-کرنش خاک برای المان کوچکی از آن است. مدل‌ها با توجه به نوع مصالح و نوع بارگذاری متفاوت هستند. برای بررسی رفتار مصالح تحت بارگذاری دینامیکی باید از مدل‌های تابع زمان استفاده شود. رفتار مصالح در مدل‌ها می‌تواند به صورت الاستیک خطی یا غیرخطی و الاستوپلاستیک توصیف شود. اختلاف اساسی بین مدل‌های الاستیک و پلاستیک، در رفتار آن‌ها در جریان بارگذاری و باربرداری است. در بیشتر موارد خاک به صورت یک مصالح الاستوپلاستیک رفتار می‌کند. به عبارت دیگر تغییرشکل‌های خاک اساساً غیر الاستیک بوده و با برداشتن بار، مسیر باربرداری متفاوت خواهد بود. بایستی توجه داشت اگرچه یک مدل الاستیک ممکن است رفتار خاک را تحت شرایط بارگذاری کلی تبیین کند، با این حال باید برای روند بارگذاری و باربرداری، یک معیار بار خاص اعمال شود. این روابط یا معیار بار به عنوان تئوری تغییرشکل پلاستیسیته معروف هستند که غالباً به شکل رابطه تنش-کرنش در مدل‌های با مدول متغییر به کارگرفته می‌شوند. سه فرض اساسی در استفاده از این مدل‌ها شامل موارد زیر است:

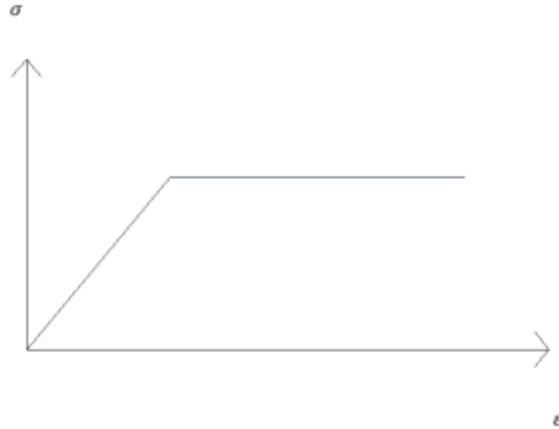
۱) وجود یک سطح جاری شدن اولیه

۲) قانون جریان پلاستیک

۳) قانون سخت‌شدگی

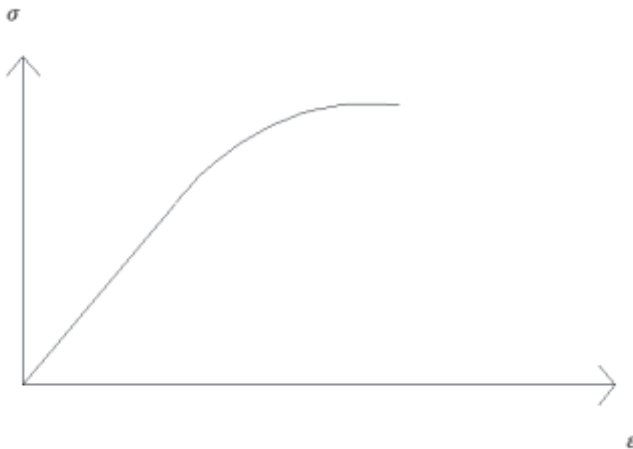
در نهایت بایستی توجه داشت که در حال حاضر یک مدل کامل و منحصر به فرد که بتواند تمامی مسائل ژئوتکنیکی را در برگیرد وجود ندارد. مدل باید تا حد امکان ساده بوده و با معادلات ریاضی معمول قابل فرموله شدن باشد و در عین حال پارامترهای آن را بتوان با آزمایش‌های متداول خاک بدست آورد و تعداد پارامترهای آن در حد مقبول و کم باشد. در این کتاب برای مدل کردن شيروانی از مدل خاک سخت شونده استفاده می‌شود که قابلیت مدل کردن هر دو نوع سخت‌شوندگی برشی در آزمایش سه محوری و سخت‌شوندگی فشاری در آزمایش تحکیم را دارد و اثرات مربوط به اتساع خاک را نیز در نظر می‌گیرد که در ادامه به توضیح آن می‌پردازیم. در مدل خاک سخت شونده برخلاف مدل رفتاری پلاستیک کامل که در آن سطح تسلیم در فضای تنش‌ها ثابت است، سطح تسلیم می‌تواند به علت کرنش‌های پلاستیک، بزرگتر شود. در این مدل بین رفتار سخت‌شوندگی خاک تحت برش و یا تحت فشار همه جانبه یا بارگذاری تحکیمی تفاوت وجود دارد. سخت‌شوندگی برشی برای مدل کردن کرنش‌های برگشت‌ناپذیر در اثر بارگذاری تفاضلی اولیه است و سخت‌شوندگی فشاری برای مدل کردن کرنش‌های پلاستیک و برگشت‌ناپذیر در اثر بارگذاری فشاری اولیه در

بارگذاری ایزوتروپیک و ادئومتریک است. خاک‌های با ماهیت دانه‌ای رفتاری شبیه به مدل موهر-کولمب دارند (مطابق شکل ۲-۶).



شکل ۲-۶: مدل رفتاری الاستوپلاستیک کامل موهر-کولمب

مدل موهر-کولمب ساده، یک مدل الاستوپلاستیک خطی است. در واقعیت استفاده از مدل الاستیک یا برشی ثابت با توجه به رفتار غیرخطی خاک درست به نظر نمی‌رسد و به این دلیل در مدل‌سازی خاک بایستی به رفتار غیرخطی توجه شود. در کل می‌توان با دقت قابل قبولی از مدل هذلولی یا هیپربولیک دانکن استفاده کرد. تمام پارامترهای این مدل با انجام آزمایش سه محوری به سادگی قابل دسترسی است (مطابق شکل ۲-۷).



شکل ۲-۷: مدل رفتاری غیر خطی دانکن



در نرم‌افزار مورد استفاده، یک مورد به نام مدل سخت شونده تعریف شده که می‌تواند به طور کامل جایگزین این مدل هذلولی گردد، زیرا اولاً از تئوری پلاستیسیته استفاده شده است، دوماً اثرات تغییر حجم خاک در اثر اتساع در آن لحاظ شده است و سوماً یک کلاهدک تسلیم برای مدل معرفی شده است، که با رسیدن وضعیت تنش‌ها بر روی سطح کلاهدک، وضعیت از شرایط الاستیک به پلاستیک تغییر خواهد کرد.

### ۲-۳-۲ میرایی خاک

یکی از پارامترهای مهم خاک در رفتار دینامیکی، میرایی خاک است. مدل میرایی در نظر گرفته شده برای خاک در نرم‌افزار از نوع میرایی رایلی است، که در ادامه به توضیح آن پرداخته می‌شود. در پلکسیس بیان شده است که در مسائل دینامیکی با منشأ تک بار دینامیکی مثل کوبیدن شمع یا پی ماشین آلات لرزه‌ای و کوبیدنی، به دلیل تقارن مسئله و وجود میرایی هندسی یا شعاعی، نیازی به میرایی رایلی نیست، اما برای مسائل کرنش صفحه‌ای مثل مسائل اعمال زلزله باید از این نوع میرایی استفاده نمود. از آنجا که میرایی خاک اغلب در حدود ۵٪ می‌باشد، همین مقدار به عنوان میرایی رایلی انتخاب شده است.

### ۲-۳-۳ مدل کردن خاک مسلح به ژئوسل

همانطور که در فصل اول ذکر شد، از جایبکه در این تحقیق، صورت مسئله به صورت دوبعدی است، برای مدل‌سازی خاک مسلح به ژئوسل از روش مدل مرکب (کامپوزیت) استفاده می‌شود، که روابط آن در فصول پیشین ارائه گردیده است. همچنین در نرم‌افزار برای مدل رفتاری شیروانی، از مدل رفتاری خاک سخت شونده استفاده می‌شود که طبق توضیحاتی که قبلاً ذکر شد، می‌تواند به طور کامل جایگزین مدل هذلولی گردد.

### ۲-۳-۴ مصالح مورد استفاده در آزمایش

همانطور که ذکر شد، مدل رفتاری مورد استفاده، مدل خاک سخت شونده در نرم‌افزار است. ورودی‌های مدل مذکور  $E_{50}$  (مدول الاستیسیته سکانتی مرتبط به ۵۰٪ مقاومت نهایی خاک در آزمایش سه محوری) با استفاده از نتایج آزمایش سه محوری بدست می‌آید. نتایج آزمایش سه محوری برای خاک ماسه‌ای موجود بود، اما برای شن در دسترس نبود، بنابراین برای خاک شنی، از روابط موجود زیر استفاده می‌کنیم.

برای پارامتر  $k$ ، کرامر<sup>۱</sup> (1996) فرمول زیر را پیشنهاد کرد:

$$K = 300 + 900 \varphi_{rel} \quad (1-2)$$

<sup>1</sup> Kramer

که در این رابطه پارامتر  $\varphi_{rel}$  که عددی در محدوده صفر تا یک است، مطابق فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$\varphi_{rel} = \frac{(\varphi - 25^\circ)}{45^\circ - 25^\circ} \quad (2-2)$$

در این رابطه  $\varphi$  زاویه اصطکاک خاک است.

با جایگذاری مدول یانگ بدست آمده از رابطه ۱-۱۲ در رابطه ۲-۳، می‌توان  $E_{oed}$  لایه مرکب (خاک-ژئوسل) را محاسبه کرد و بدین طریق  $E_{50}$  که مساوی  $E_{oed}$  می‌باشد ( $E_{oed} = E_{50}$ )، بدست می‌آید. بدین ترتیب پارامترهای مدل رفتاری خاک سخت شونده بدست می‌آید.

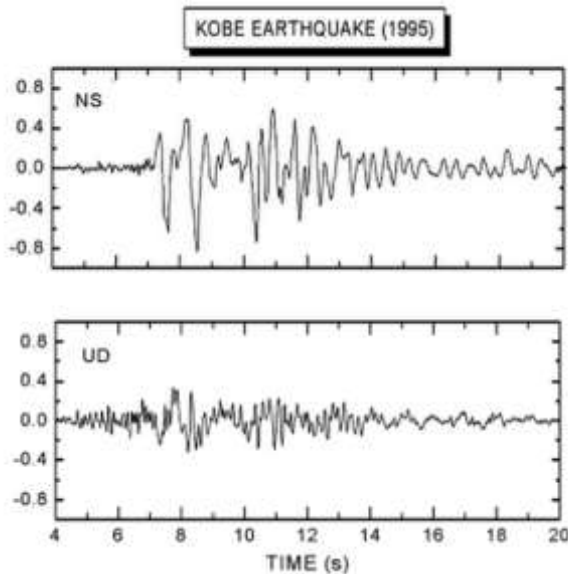
$$E_{oed} = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3-2)$$

که در آن  $E$  مدول یانگ و  $\nu$  ضریب پواسون می‌باشد.

برای بررسی اندرکنش خاک با ژئوسل در آزمایش لینگ و همکاران (۲۰۰۹) از یک دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس استفاده شده است، تا رفتار اینترفیس میان خاک و ژئوسل تحت تنش نرمال ثابت مورد بررسی قرار گیرد. آزمایش‌ها به صورت ترکیب ژئوسل با شن در سربار ۵۰ کیلو پاسکال، ژئوسل با ماسه با سربارهای ۲۰ و ۵۰ کیلو پاسکال و ترکیب ژئوگرید با شن و ماسه صورت گرفته است که با توجه به زاویه اصطکاک اندرکنشی بدست آمده پارامتر نسبت مقاومت اینترفیس در نرم‌افزار پلکسیس برای اندرکنش ژئوسل و ماسه و نیز برای اندرکنش ژئوسل و شن برابر ۰/۹ در نظر گرفته شده است.

### ۳-۲-۵ شتاب ورودی

در این مدل، از بخشی از شتاب نگاشت زلزله کوبه برای مدل‌سازی استفاده شده که در شکل زیر آمده است:



شکل ۲-۸: شتاب نگاشت زلزله کوبه مورد استفاده در تحلیل، مولفه افقی شتاب (شکل بالا) و مولفه قائم شتاب (شکل پایین)

برای اعمال زلزله در مدل، مولفه افقی زلزله به تاریخچه تغییرمکان افقی تبدیل شده و سپس به عنوان تغییرمکان پیش فرض تعریف شده به کف مدل اعمال شد. این روشی است که در راهنمای برنامه پلکسیس جهت اعمال شتاب‌نگاشت‌ها به مدل تعریف شده است. با این حال امکان اعمال مولفه قائم زلزله به این صورت در برنامه وجود ندارد، چرا که امکان اعمال دو تغییر مکان پیش‌فرضی به صورت همزمان در برنامه وجود ندارد. برای اعمال مولفه قائم زلزله از راهکار دیگری استفاده گردید، به این صورت که ابتدا تاریخچه شتاب به تاریخچه سرعت تبدیل شده و سپس با استفاده از رابطه زیر به تاریخچه تنش تبدیل می‌شود. سپس با استفاده از قابلیت تعریف تنش پیش‌فرض در نرم‌افزار، به کف مدل اعمال می‌گردد. کلیه تبدیل شتاب‌نگاشت‌ها به سرعت یا تغییرمکان با استفاده از نرم‌افزار رایج سائسموسیگنال<sup>۱</sup> انجام گرفته است. روابط ۲-۴ و ۲-۵ در برخی دیگر از نرم‌افزارهای مدل‌سازی عددی نظیر فلک به عنوان راهکار وارد کردن شتاب‌نگاشت به مدل معرفی شده است.

$$\sigma_n = 2 (\rho V_p) v_n \quad (۲-۴)$$

<sup>۱</sup> SeismoSignal

$$\sigma_s = 2 (\rho V_s) v_s \quad (۵-۲)$$

در این رابطه  $\sigma_n$  تنش نرمال،  $\sigma_s$  تنش برشی،  $\rho$  وزن مخصوص،  $V_p$  متوسط سرعت موج فشاری در محیط،  $V_s$  متوسط سرعت موج برشی در محیط و  $V_n$  و  $V_s$  تاریخچه مولفه‌های قائم و افقی سرعت زلزله هستند. سرعت موج تراکمی یا فشاری در خاک یک بعدی محصور شده تابع سختی  $E_{oed}$  و جرم  $\rho$  مطابق روابط زیر است:

$$V_p = \sqrt{\frac{E_{oed}}{\rho}} \quad E_{oed} = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \rho = \frac{\gamma}{g} \quad (۶-۲)$$

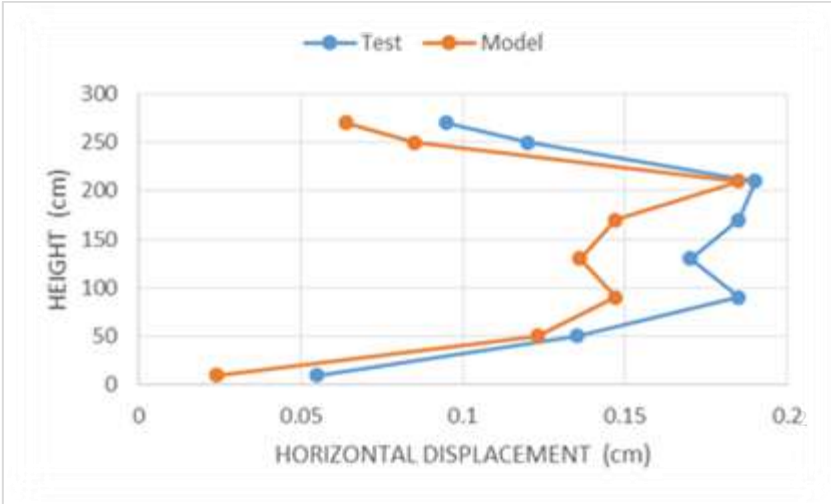
که در آن  $E$  مدول یانگ،  $\nu$  ضریب پواسون و  $\gamma$  واحد وزن کل است. مشابه روابط بالا برای سرعت برشی نیز داریم:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (۷-۲)$$

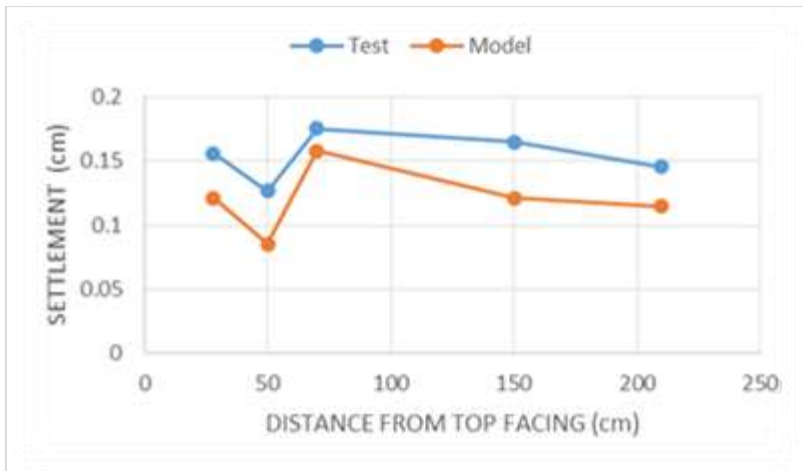
## ۲-۴ مقایسه نتایج

نتایج نهایی مدل و مقایسه با مقادیر حاصل از آزمایش در شکل‌های (۳-۹) تا (۳-۱۲) به ترتیب برای تغییرمکان افقی نما در پایان تحلیل، نشست بالای دیوار در پایان تحلیل، فشار جانبی خاک دیوار در پشت ژئوسل و شتاب افقی ایجاد شده در قسمت نما و در ارتفاع دیوار نشان داده شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که پاسخ دیوار در مدل‌سازی تا حدود بسیار زیادی مشابه نتایج بدست آمده از آزمایش است. البته دیده می‌شود که نتایج حاصل از مدل‌سازی در بیشتر موارد به مقدار اندکی کمتر از نتایج حاصل از آزمایش است. وجود اختلاف در برخی نتایج با توجه به فرضیات بسیار در روند تحلیل و استفاده از بعضی روابط تجربی و آزمایشگاهی در ادبیات فنی برای تخمین مشخصات مصالح به خصوص ترکیب خاک-ژئوسل، همان‌گونه که پیش از این مورد اشاره قرار گرفت، توجیه پذیر است. با وجود این اختلافات، مشاهده می‌شود که روند کلی تغییرات نمودارهای حاصل از مدل‌سازی و آزمایش مشابه یکدیگر هستند که موجب خواهد شد تا مدل‌سازی عددی و فرضیات انجام شده با دقت قابل قبولی معرف شرایط واقعی و رفتار دینامیکی ترکیب کامپوزیت خاک-ژئوسل باشد. در نتیجه این فرضیات عیناً در بخش‌های بعدی جهت انجام مطالعات پارامتریک رفتار دینامیکی شیروانی‌های مسلح با ژئوسل مورد استفاده قرار خواهند گرفت. پیش از این

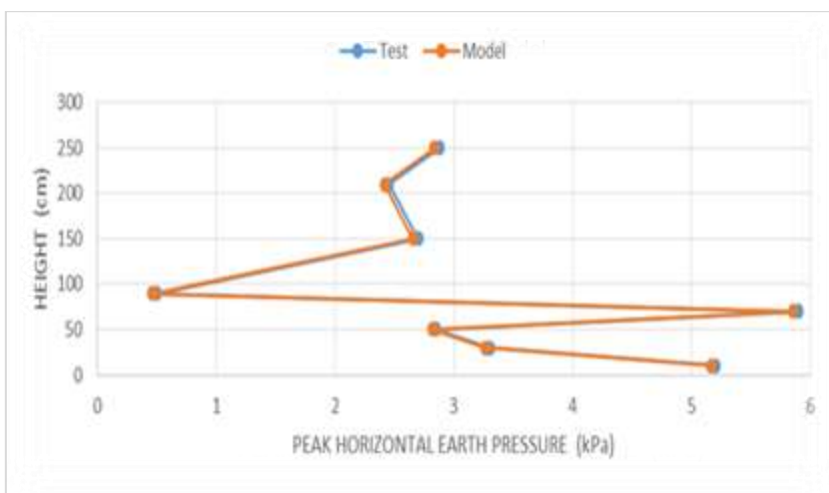
در ادبیات فنی، صحت‌سنجی‌های مشابهی با استفاده از این روابط برای ترکیب خاک-ژئوسل در شرایط بارهای استاتیکی انجام گرفته بود.



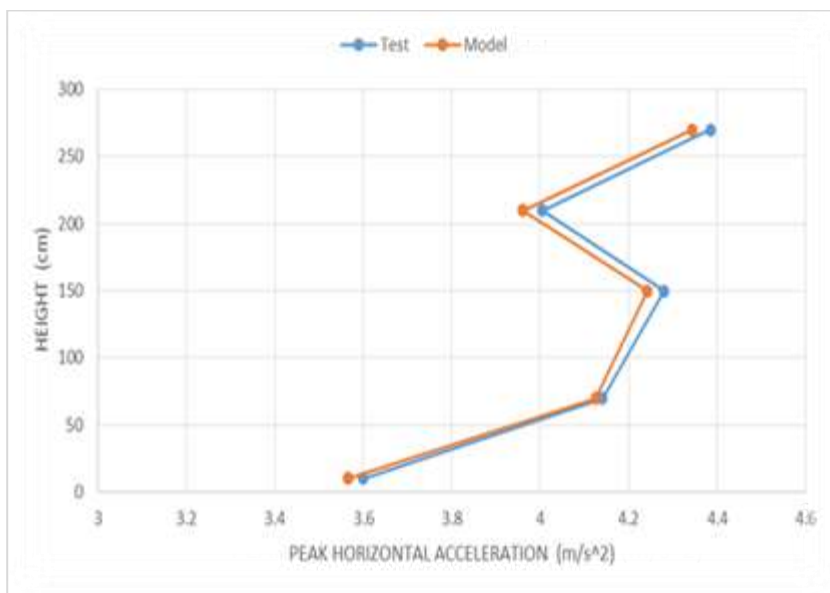
شکل ۲-۹: مقایسه تغییر مکان افقی در آزمایش و مدل‌سازی



شکل ۲-۱۰: مقایسه نشست بالای دیوار در آزمایش و مدل‌سازی



شکل ۲-۱۱: مقایسه فشار جانبی خاک پشت ژئوسل در آزمایش و مدل‌سازی



شکل ۲-۱۲: مقایسه شتاب افقی نما در آزمایش و مدل‌سازی

## فصل سوم: پایدارسازی شیروانی‌ها با ژئوسل

### ۱-۳ کلیات

پس از اطمینان از دقت مدل ساخته شده در فصل پیش، در این فصل تحلیل عددی و مطالعات پارامتریک ارائه می‌شود. بدین منظور ابتدا یک مدل نرم‌افزاری ساخته شده و سپس تأثیر پارامترهای مختلف مورد نظر در آن بررسی می‌گردد.

### ۲-۳ معرفی مدل ساخته شده

مدل مورد بررسی یک شیروانی طویل با ارتفاع ۵ متر و زاویه شیب حدوداً ۶۴ درجه نسبت به افق است. جنس خاک اصلی بدنه شیروانی، ماسه رس دار است. برای قسمت پی نیز از یک پی سنگی استفاده شد تا تأثیر رفتار پی و تغییر شکل آن بر شیروانی کاهش یافته و صرفاً رفتار لرزه‌ای شیروانی مدنظر قرار گیرد. ضمناً فرض عدم وجود آب زیرزمینی در تحلیل‌ها مدنظر قرار گرفته است. برای عدم تأثیر مرزها در پاسخ لرزه‌ای مدل، مرزهای جاذب انرژی با فاصله‌ای تا میزان ۵ برابر ارتفاع شیب در هر دو طرف مدل اصلی قرار گرفتند. المان‌های مدل‌سازی از نوع ۱۵ گرهی بوده و مطابق آنالیزهای حساسیت، از مش‌بندی‌های ریز برای افزایش دقت پاسخ مدل‌ها استفاده شد. برای خاک درون ژئوسل مدل‌های مسلح نیز دو نوع خاک ماسه رس دار و شن مدنظر قرار گرفت. برای نزدیکی بیشتر به شرایط حقیقی، مدل نرم‌افزاری ابتدا به صورت مرحله به مرحله (لایه‌لایه) ساخته شده، بعد از هر مرحله ساخت که ارتفاع شیب ۱ متر افزایش پیدا می‌کند (در کل ۵ مرحله ساخت شیب)، یک تحلیل استاتیکی انجام شده، تغییر مکان‌ها صفر شده و سپس ساخت و تحلیل انجام می‌گرفت تا در نهایت با تکمیل ساخت شیب، شتاب زلزله اعمال و تحلیل‌های دینامیکی انجام شود. در جدول ۱-۳ به صورت کلی مشخصات خاک ماسه رس دار بدنه شیروانی، پی سنگ، ترکیب ماسه-ژئوسل و شن-ژئوسل نشان داده شده است.

جدول ۳-۱: مشخصات مصالح خاکی در مدل‌سازی

پارامتر	خاک ماسه‌ای رس دار	خاک شن	ترکیب ماسه و ژئوسل	ترکیب شن و ژئوسل	پی سنگی
$c$ ( $kN/m^2$ )	10	0	-	-	-
$\varphi$	30	52	30	52	-
$\nu$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
$\gamma_d$ ( $kN/m^3$ )	20	20	20	20	23
$k$	500	1200	-	-	-
$E_{50}$ ( $kN/m^2$ )	33653.85	-	0.5	0.5	-
$E_{oed}$ ( $kN/m^2$ )	33653.85	-	-	-	-
$E_{ur}$ ( $kN/m^2$ )	100961.55	-	992	695	-
$C_{geocell}$ ( $kN/m^2$ )	-	-	35.12	42.13	-
$E_{elastic}$ ( $kN/m^2$ )	-	-	-	-	100000

مطابق فصل پیش، در مدل نرم‌افزاری، برای خاک شیروانی و ترکیب خاک مسلح (ماسه-ژئوسل و شن-ژئوسل) از مدل رفتاری خاک سخت شونده در نرم‌افزار استفاده شد که توضیحات و روابط آن در فصل پیش ارائه شده است. برای پی سنگی نیز از مدل الاستیک ساده استفاده شد. لازم به ذکر است که مشخصات ترکیب شن و ماسه با ژئوسل در این جدول، بر مبنای استفاده از ژئوسل با مدول سکانت ۲۰۰ کیلو نیوتن بر متر است و با تغییر مدول خاک، مقادیر پارامترهای ترکیب نیز تغییر خواهد کرد که در بخش تأثیر سختی ژئوسل به آن‌ها اشاره خواهد شد. برای سطوح تماس میان خاک و لایه‌های خاک مسلح به ژئوسل، از اندرکنش (اینترفیس) در نرم‌افزار استفاده شد. مشخصات این لایه مرزی (*interface*) بر اساس چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک است که هر دو پارامتر به صورت نسبتی از پارامترهای مقاومتی خاک اصلی (بین عدد صفر، معرف عدم وجود اینترفیس، تا عدد یک، معرف اینترفیس کاملاً صلب مشابه خاک) به برنامه معرفی می‌شود. این نسبت برای این تحلیل در حدود ۰/۹ در نظر گرفته شد، که با توجه به قفل و بست دانه‌های خاک در دیواره ژئوسل ساخته شده از ژئوگرید مناسب به نظر می‌رسد. به طور خلاصه، می‌توان گفت در ساخت مدل، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

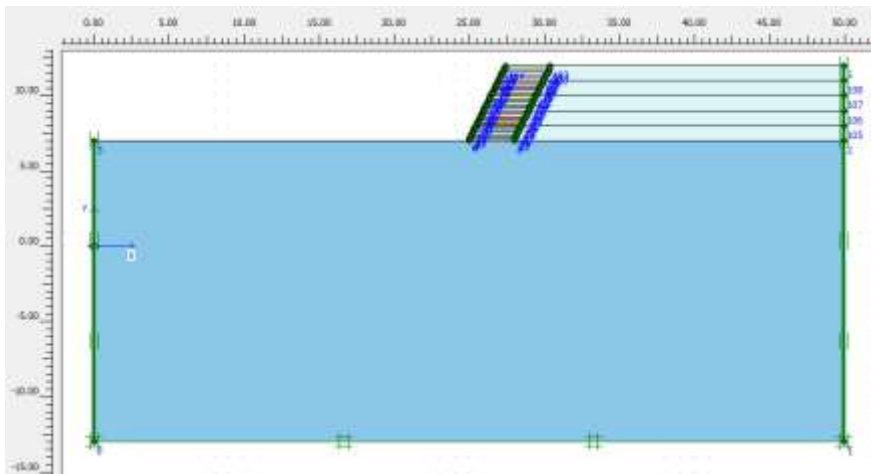
- (۱) با توجه به هندسه مسئله، شرایط کرنش مسطح برقرار است.
- (۲) خاک محیط همگن و همسانگرد است. بدین مفهوم که مشخصات آن (از قبیل زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و ...) در نقاط مختلف و در راستاهای مختلف یکسان است.
- (۳) سطح آب زیرزمینی در عمق بسیار زیاد می‌باشد به صورتیکه می‌توان خاک را کاملاً خشک در نظر گرفت.



برای اعمال زلزله، از بخشی از شتاب نگاشت زلزله کوبه برای مدل‌سازی استفاده شده است. برای اعمال زلزله در مدل، مولفه افقی شمال-جنوب زلزله به تاریخچه تغییرمکان افقی تبدیل شده و سپس به عنوان تغییرمکان پیش فرض تعریف شده به کف مدل اعمال شد. این روشی است که در راهنمای برنامه پلکسیس جهت اعمال شتاب‌نگاشت‌ها به مدل تعریف شده است. (با توجه به اینکه در حضور سنگ بستر، مولفه قائم زلزله، بی تأثیر می‌شود، این مولفه به مدل اعمال نشد.) تبدیل شتاب‌نگاشت‌ها به تغییرمکان با استفاده از نرم‌افزار رایج سائسموسیگنال انجام گرفته است.

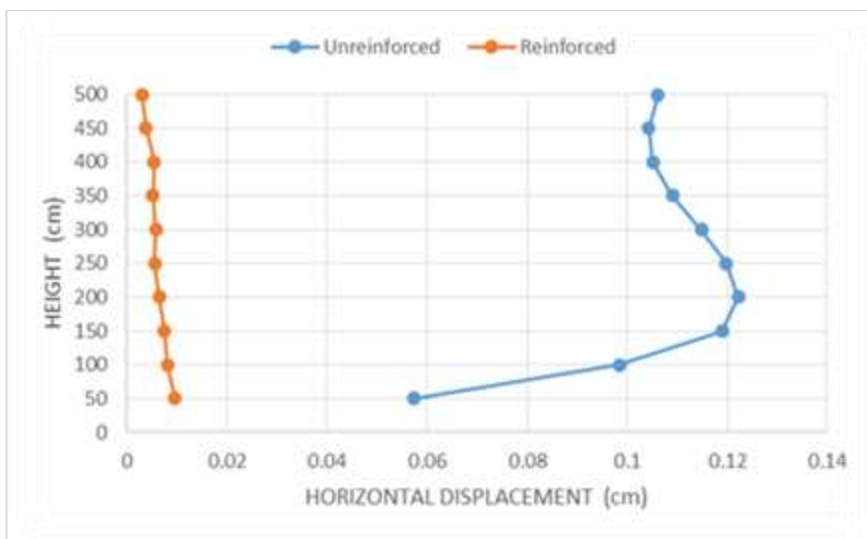
### ۳-۳ مقایسه مدل‌های غیرمسلح و مسلح

در ابتدای این فصل، جهت بررسی اثر تسلیح، به مقایسه دو مدل غیرمسلح و مسلح با ژئوسل پرداخته شده است. در ابتدا برای مدل غیرمسلح یک آنالیز استاتیکی انجام شد و مشاهده شد که شیب در حالت استاتیکی پایدار بوده و ضریب اطمینان شیب برابر با  $1/25$  می‌باشد. برای مقایسه اثر تسلیح، دو مدل غیرمسلح و مسلح مورد بررسی قرار گرفته است. جهت تسلیح، لایه‌های ژئوسل با ارتفاع ۲۰ سانتیمتر، طول ۳ متر، مدول سکانت ۲۰۰ کیلونیوتن بر متر و پر شده با خاک خود شیروانی (ماسه رس دار) در قسمت نمای شیب به صورت افقی قرار گرفته‌اند. (مطابق شکل (۳-۱)).

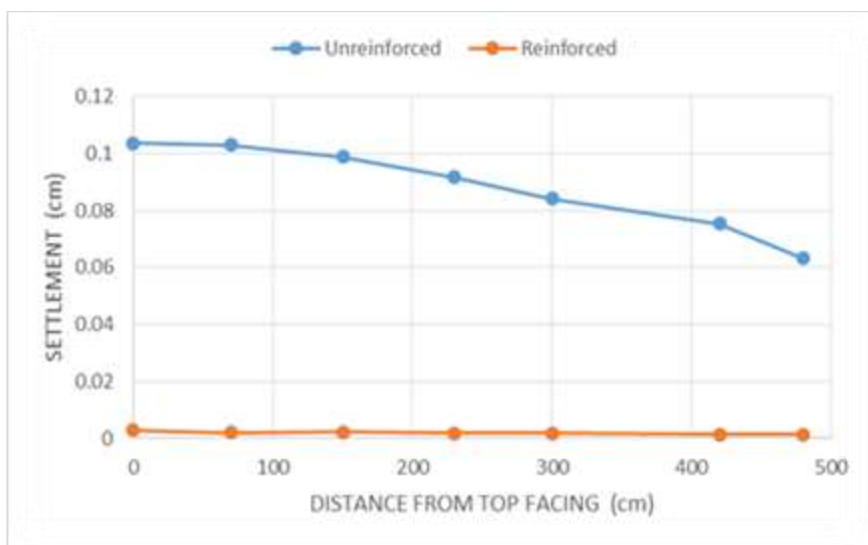


شکل ۳-۱: نمای کلی از مدل شیروانی و پی آن در نرم افزار به همراه لایه‌های افقی ژئوسل در قسمت نما

با توجه به مطالب فوق، نمودارهای مقایسه‌ای جابه‌جایی افقی نما و نشست شیب‌ها بین شیروانی‌های غیرمسلح و مسلح در شکل‌های (۲-۳) و (۳-۳) ارائه شده است. در شکل‌های (۳-۳)، (۴-۳) و (۶-۳) نیز به ترتیب کانتور تغییر مکان کلی، افقی و قائم مدل‌های غیرمسلح و مسلح نشان داده شده است.

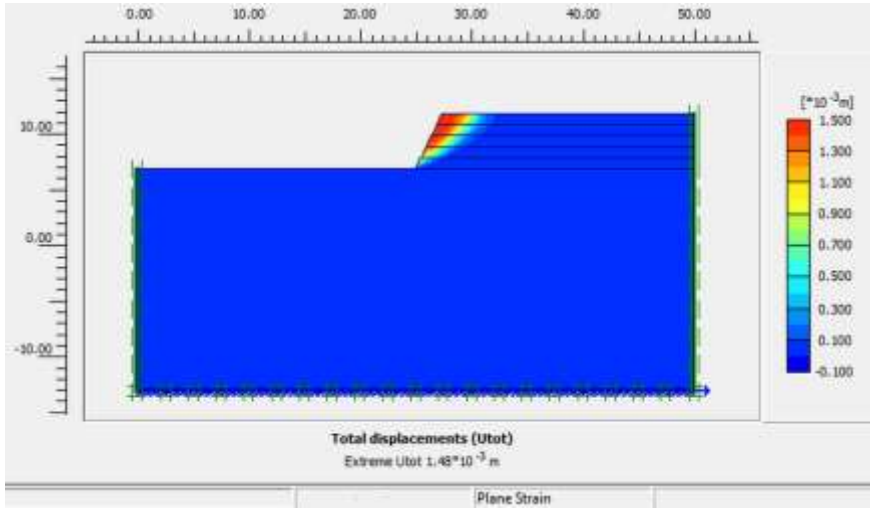


شکل ۲-۳: مقایسه حداکثر جابه‌جایی افقی نما برای دو مدل غیرمسلح و مسلح

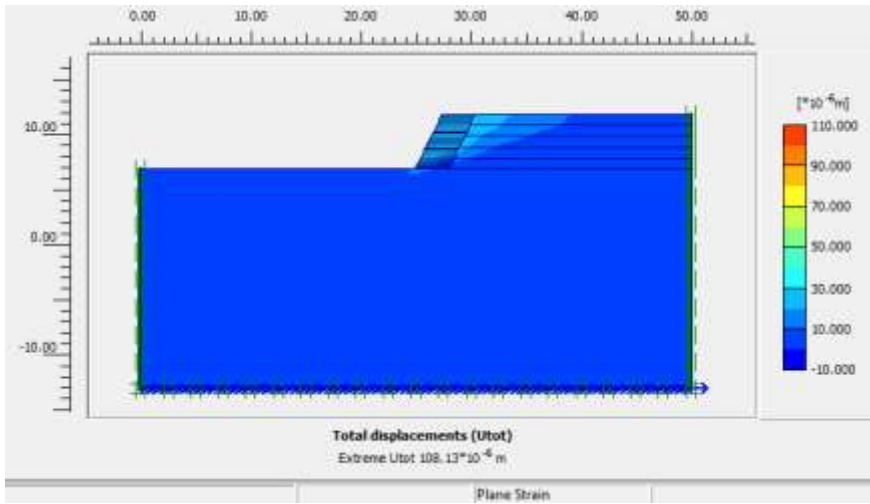


شکل ۳-۳: مقایسه نشست شیب‌ها برای دو مدل غیرمسلح و مسلح

مطابق شکل ۳-۲ مشخص است که به کارگیری ژئوسل به شدت باعث کاهش تغییرشکل افقی نما می‌شود. مخصوصاً اینکه مقدار حداکثر تغییرمکان جانبی را به شدت کنترل می‌کند و از ۰/۱۲۲۲ سانتی متر به ۰/۰۶۵۳۳ سانتی متر می‌رساند که این یعنی ۰/۱۱۵۶۶۷ سانتی متر کاهش که مناسب است. البته این مقدار کاهش جابه‌جایی (بهبود شرایط) در همه جای شیروانی یکسان نیست. در پاشنه شیروانی که کمترین نمود مزیت تسلیح کننده سه بعدی را داراست، جابه‌جایی افقی ۰/۰۴۷۷۰۱ سانتی متر کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۳-۳ نیز می‌توان از مزایای مدل مسلح نسبت به مدل غیرمسلح آگاه شد. در حالت غیرمسلح، نشست در لبه نما مقدار حداکثر را داراست و با دور شدن از نما، کاهش می‌یابد. اما در نمودار مسلح، نشست در لبه نما که منطقه بحرانی است، به دلیل حضور ژئوسل به خوبی کنترل می‌شود. در این شکل نیز مزیت استفاده از تسلیح سه بعدی کاملاً مشخص است. نشست مدل مسلح در همه نقاط کمتر از مدل غیرمسلح می‌باشد. مثلاً در لبه نما، نشست از ۰/۱۰۳۶ سانتی متر به ۰/۰۲۷۱۸ سانتی متر کاهش یافته و این یعنی ۰/۱۰۸۸۲ سانتی متر کاهش در نشست. در نقاط دیگر و در کمترین حالت نیز شاهد حداقل ۰/۰۶۱۷۶۵ سانتی متر کاهش نشست مشاهده می‌گردد. مشاهده می‌شود که در شیروانی مسلح، بیشترین مقدار تغییرشکل افقی دیواره شیب، در نیمه پایینی به وقوع می‌پیوندد و نشست در لبه شیب زیاد بوده و در نقطه اتمام لایه ژئوسل ناگهان افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد.

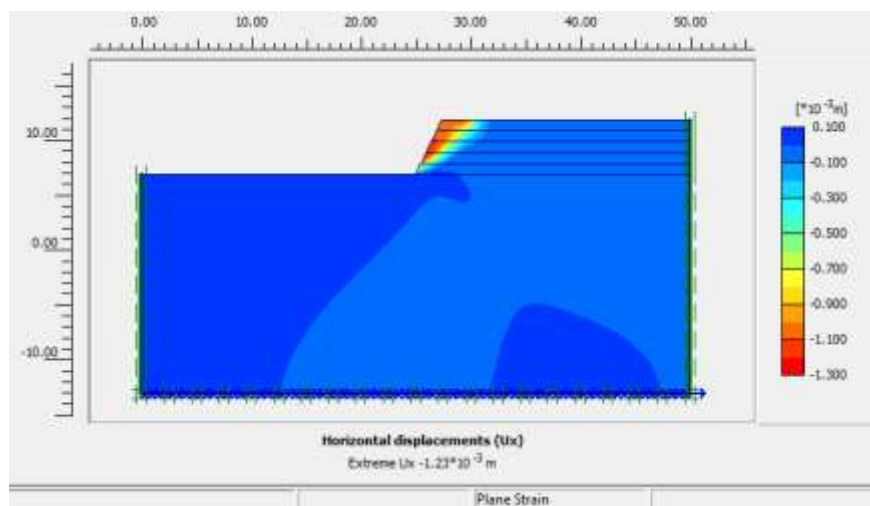


(الف)

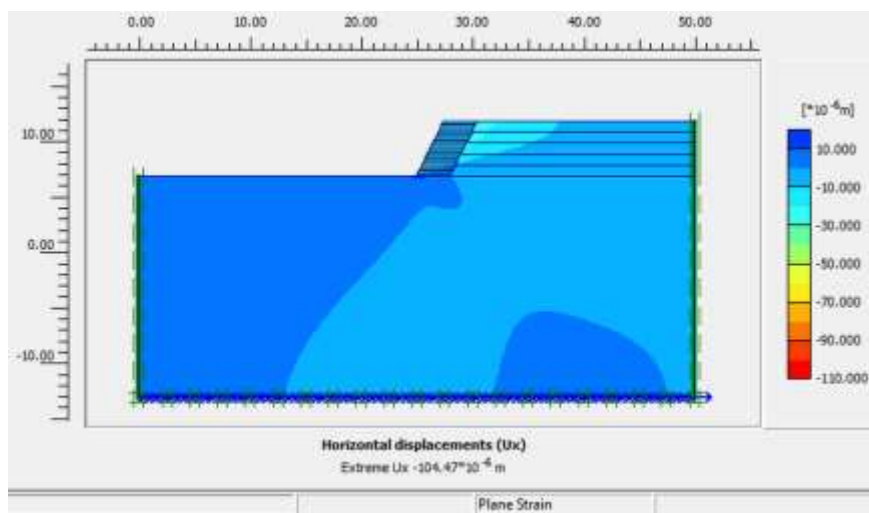


(ب)

شکل ۳-۴ الف و ب: کانتور تغییر مکان کلی در پایان زلزله (الف: غیر مسلح ب: مسلح)

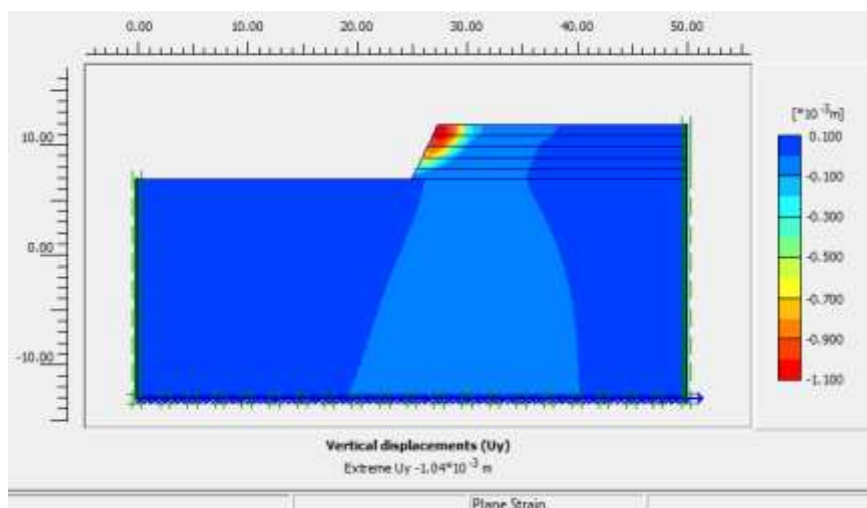


(الف)

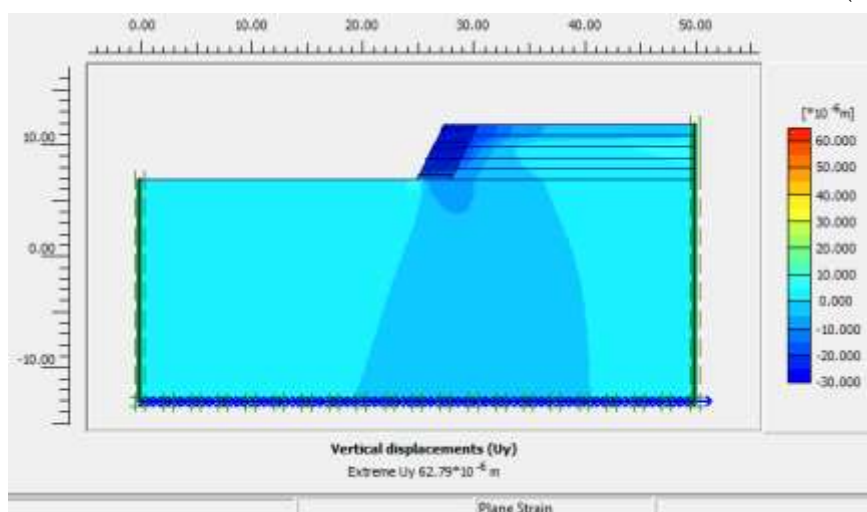


(ب)

شکل ۳-۵ الف و ب: کانتور تغییر مکان افقی در پایان زلزله (الف: غیر مسلح ب: مسلح)



(الف)



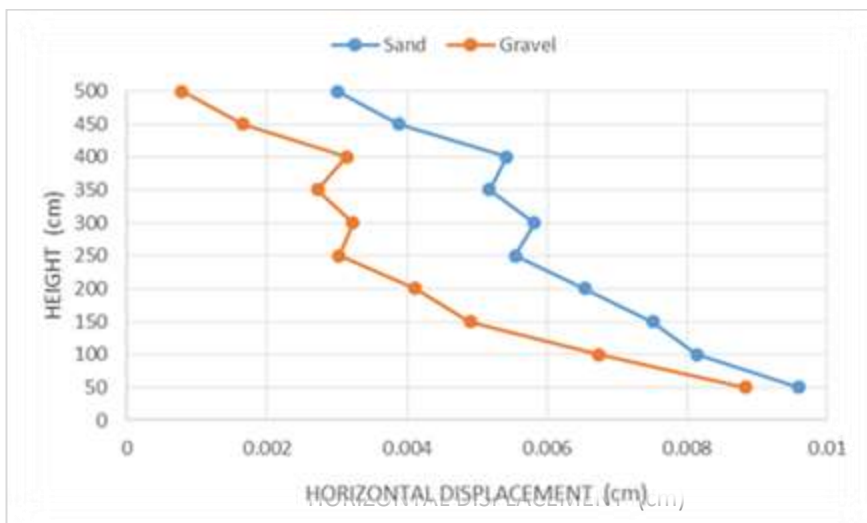
(ب)

شکل ۳-۶ الف و ب: کانتور تغییر مکان قائم در پایان زلزله (الف: غیر مسلح ب: مسلح)

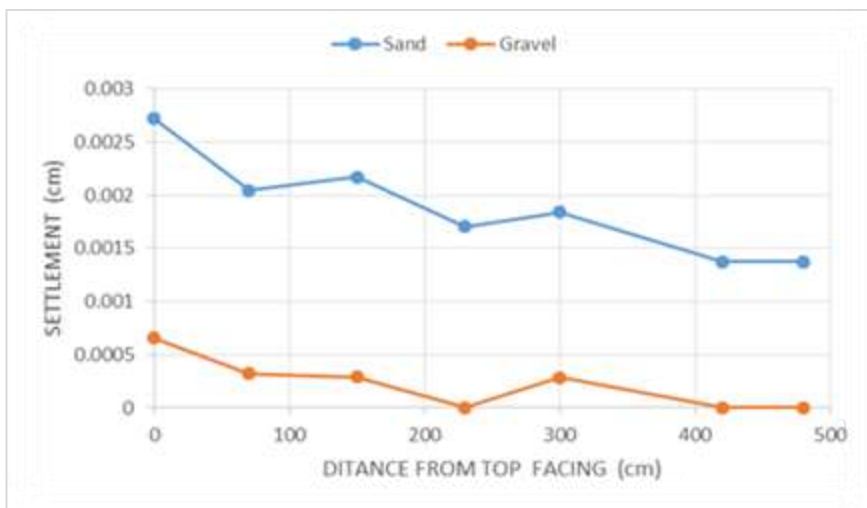
### ۳-۴ تأثیر نوع خاک پرکننده سلول‌های ژئوسل

در این قسمت به بررسی تأثیر نوع خاک داخل ژئوسل پرداخته می‌شود. جهت این موضوع دو نوع خاک ماسه‌ای و شنی به عنوان خاک پرکننده داخل سلول‌های ژئوسل در نظر گرفته می‌شود. مشخصات این دو نوع خاک مطابق جدول ۳-۱ است. در شکل (۳-۷) تغییر مکان

افقی نما در نقاط مختلف شیب برای دو نوع خاک پرکننده ژئوسل نشان داده شده است و شکل (۳-۸)، تغییرات نشست سطح شیروانی، نسبت به فاصله از نمای شیب را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۷: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای دو مدل مسلح (پر شده با ماسه و شن)



شکل ۳-۸: مقایسه نشست شیروانی برای دو مدل مسلح (پر شده با ماسه و شن)

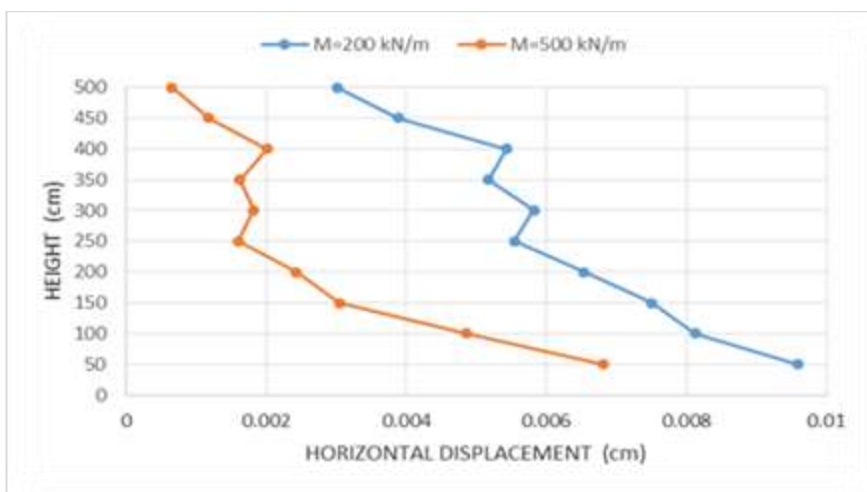
با نگاهی به نتایج کاملاً مشخص است که استفاده از خاک شن به عنوان خاک پرکننده ژئوسل‌ها، عملکرد کلی شیروانی را نسبت به خاک ماسه‌ای بهبود می‌بخشد، چراکه سبب

کاهش تغییرمکان افقی در مجاورت نما و نشست سطح شیروانی خواهد شد. مطابق روابط تجربی چسبندگی ظاهری ترکیب خاک-ژئوسل ( $C_r$ ) در فصل دوم، مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار زاویه اصطکاک داخلی خاک پرکننده به ازای یک نوع ژئوسل، مقدار این چسبندگی ظاهری نیز افزایش خواهد یافت. در جدول ۳-۱ مشخص است که با استفاده از خاک ماسه‌ای در داخل ژئوسل، مقدار چسبندگی ترکیب ۳۵/۱۲ کیلو پاسکال بدست می‌آید، در حالی که با استفاده از شن، مقدار چسبندگی ترکیب ۴۲/۱۳ کیلو پاسکال خواهد بود. همچنین مطابق روابط تجربی برای پارامتر  $k$  مطابق جدول ۴-۱ نیز مقدار این پارامتر برای شن بیشتر از ماسه می‌باشد. این افزایش  $k$  به تبع مقدار پارامتر  $k_r$  معادل در ترکیب خاک خاک-ژئوسل را نیز افزایش خواهد داد و افزایش پارامتر  $k_r$  منجر به افزایش سختی ترکیب خواهد شد. چنانچه این موضوع با مقایسه مقادیر سختی ترکیب شن و ژئوسل با ماسه و ژئوسل در جدول ۳-۱ نیز مشخص است؛ بنابراین زاویه اصطکاک بالای خاک شن موجب افزایش بیشتر چسبندگی و نیز سختی ترکیب خاک-ژئوسل خواهد شد.

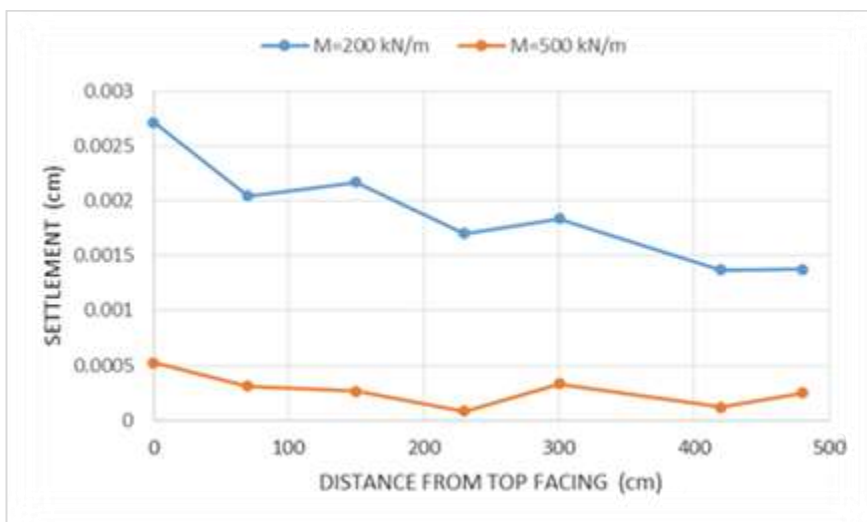
### ۳-۵ تأثیر سختی محوری ژئوسل

برای بررسی تأثیر سختی محوری ژئوسل، از دو نوع ژئوسل با سختی محوری ۲۰۰ و ۵۰۰ کیلونیوتن بر متر در مطالعات پارامتریک استفاده شده است. مطابق روابط اشاره شده در فصل دوم، پارامترهای چسبندگی و سختی ترکیب خاک و ژئوسل، به صورت مستقیم وابسته به این مقدار خواهد بود و با افزایش مدول سکانت، چسبندگی و سختی ترکیب خاک و ژئوسل نیز افزایش خواهد یافت و این موجب می‌شود که جابجایی و نشست در شیروانی کاهش یابد.

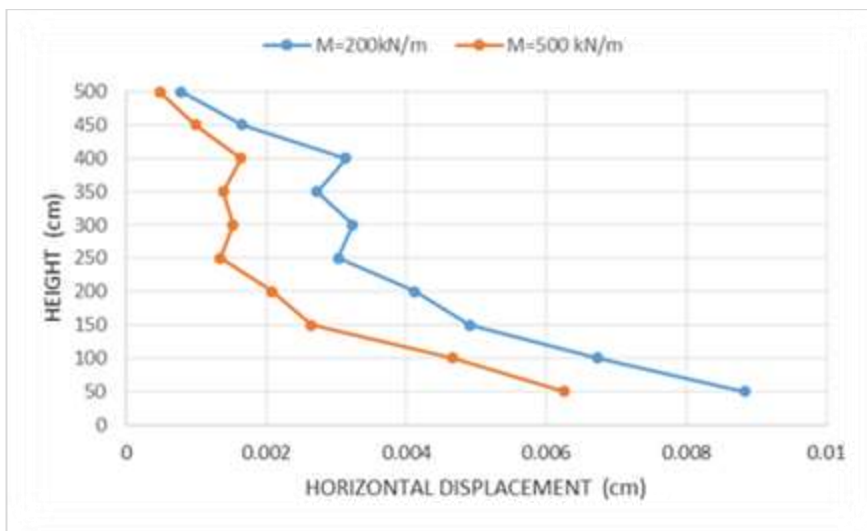




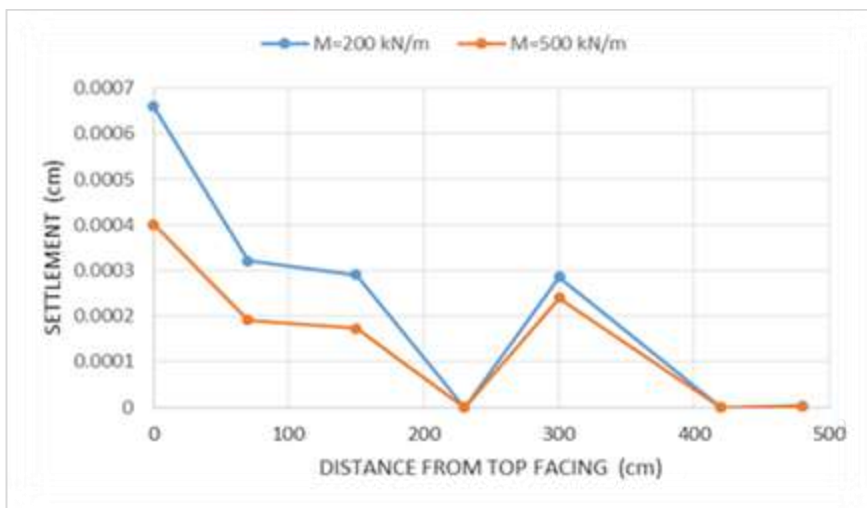
۳-۹. مقایسه تغییر مکان افقی نما برای دو مدل مسلح شده با ژئوسل با سختی محوری ۲۰۰ و ۵۰۰ کیلونیوتن بر متر (پر شده با ماسه)



۳-۱۰. مقایسه نشست شبروانی برای دو مدل مسلح شده با ژئوسل با سختی محوری ۲۰۰ و ۵۰۰ کیلونیوتن بر متر (پر شده با ماسه)



۳-۱۱: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای دو مدل مسلح شده با ژئوسل با سختی محوری ۲۰۰ و ۵۰۰ کیلونیوتن برمتر (پر شده با شن)

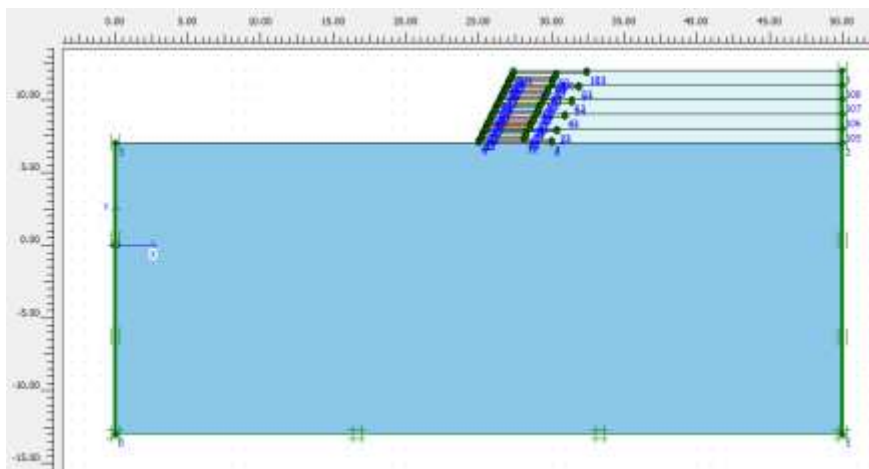


۳-۱۲: مقایسه نشست شبروانی برای دو مدل مسلح شده با ژئوسل با سختی محوری ۲۰۰ و ۵۰۰ کیلونیوتن برمتر (پر شده با شن)

با توجه به نمودارهای این بند، مشخص می شود که هر چه جنس ژئوسل قوی تر باشد (مدول سکانت بالاتر)، تسلیح سه بعدی بهتر عمل می کند، گرچه استفاده از ژئوسل قوی تر، از منظر مالی نیز مهم است و در توجیه اقتصادی پروژه باید در نظر گرفته شود.

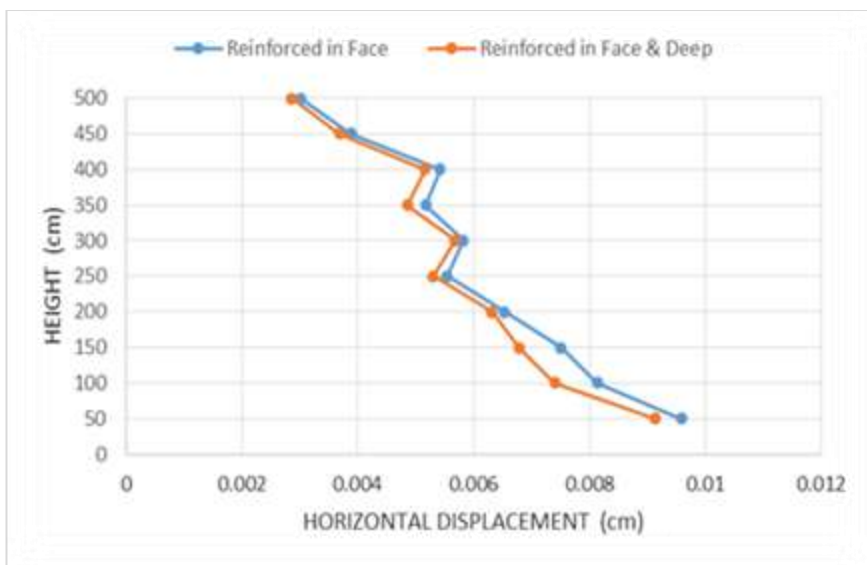
### ۳-۶ تأثیر نحوه آرایش لایه‌های مسلح کننده (تسلیح شیروانی در عمق علاوه بر نما)

در این قسمت به بررسی تأثیر نحوه آرایش لایه‌های مسلح کننده پرداخته می‌شود. جهت بررسی این موضوع، همانطور که در شکل (۳-۱۳) دیده می‌شود، اولین لایه ژئوسل واقع در سطح شیروانی، لایه ششم ژئوسل از سطح شیب در ارتفاع ۳/۹ متری، لایه یازدهم ژئوسل از سطح شیب در ارتفاع ۲/۹ متری، لایه شانزدهم ژئوسل از سطح شیب در ارتفاع ۱/۹ متری، لایه بیست و یکم از سطح شیب در ارتفاع ۰/۹۰ متری و آخرین لایه یعنی لایه بیست و پنجم از بالای شیب در زیر شیروانی تا عمق ۵ متری قرار داده شدند و سایر لایه‌ها با طول ۳ متر در نمای شیب باقی ماندند.

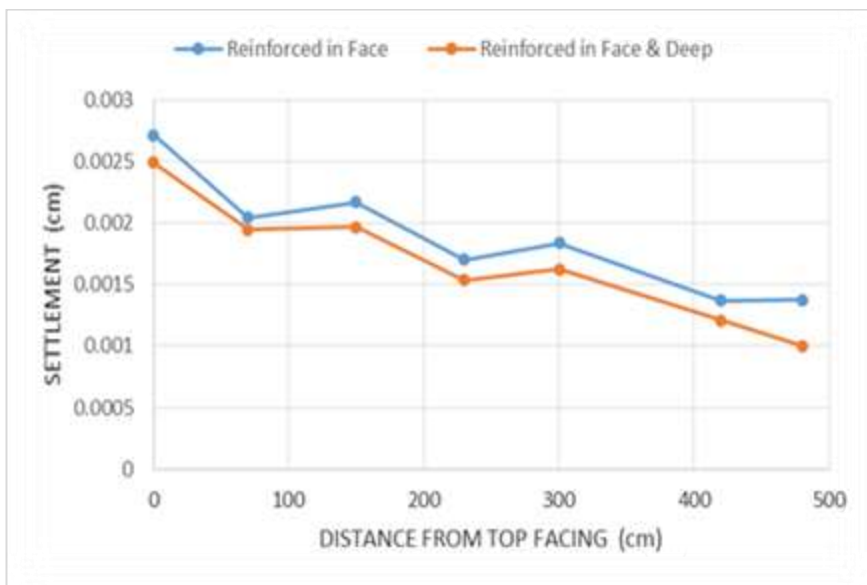


۳-۱۳: نمای کلی از مدل شیروانی و پی آن به همراه لایه‌های افقی ژئوسل در نما و عمق شیروانی

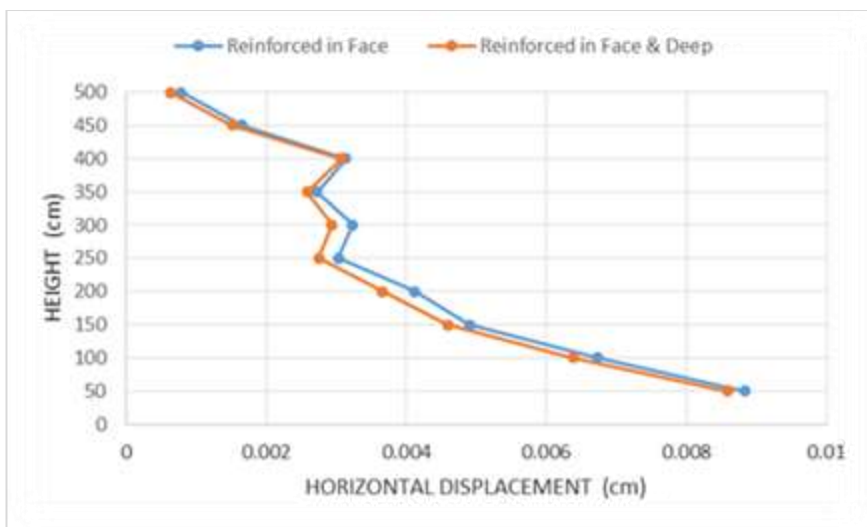
در شکل‌های (۳-۱۴) تا (۳-۲۱) تغییر مکان افقی نمای شیروانی نسبت به ارتفاع شیب و نشست سطح شیب نسبت به فاصله از لبه شیب را نشان می‌دهد. آنچه که از این شکل‌ها بدست می‌آید، اثر مثبت تسلیح در عمق علاوه بر تسلیح در نما است. البته با توجه به نمودارهای مربوط به تأثیر نوع خاک پرکننده سلول‌های ژئوسل و نیز نمودارهای مربوط به تأثیر سختی محوری ژئوسل، مشهود است که در این مدل‌ها، اثر مثبت تسلیح در عمق علاوه بر تسلیح در نما، کمتر از تأثیر نوع خاک پرکننده سلول‌های ژئوسل و سختی محوری ژئوسل است.



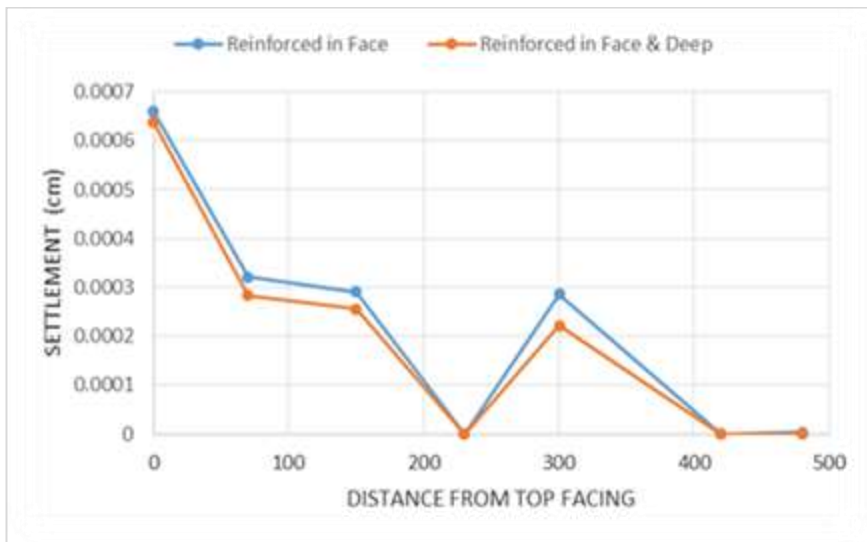
۳-۱۴: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای دو مدل مسلح شده در نما و مسلح شده در عمق و نما (سلول‌های ژئوسل پر شده با خاک ماسه‌ای و ژئوسل با  $M=200 \text{ kN/m}$ )



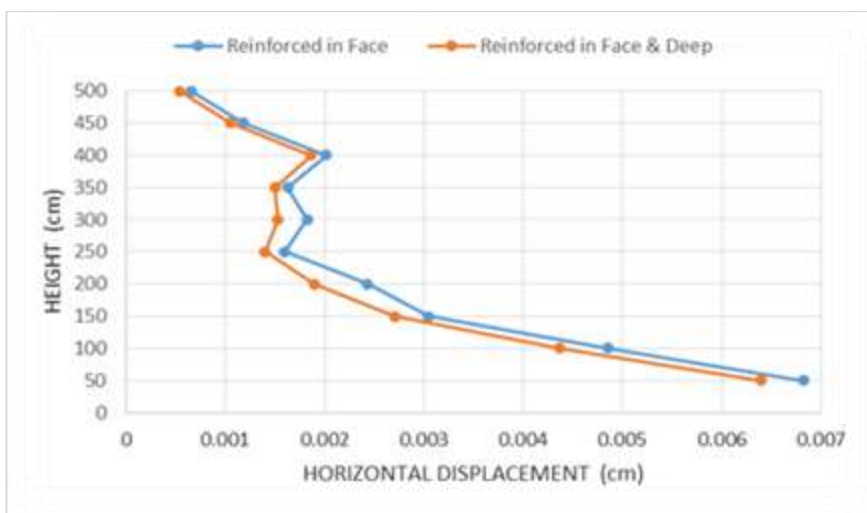
۳-۱۵: مقایسه نشست شیروانی برای دو مدل مسلح شده در نما و مسلح شده در عمق و نما (سلول‌های ژئوسل پر شده با خاک ماسه‌ای و ژئوسل با  $M=200 \text{ kN/m}$ )



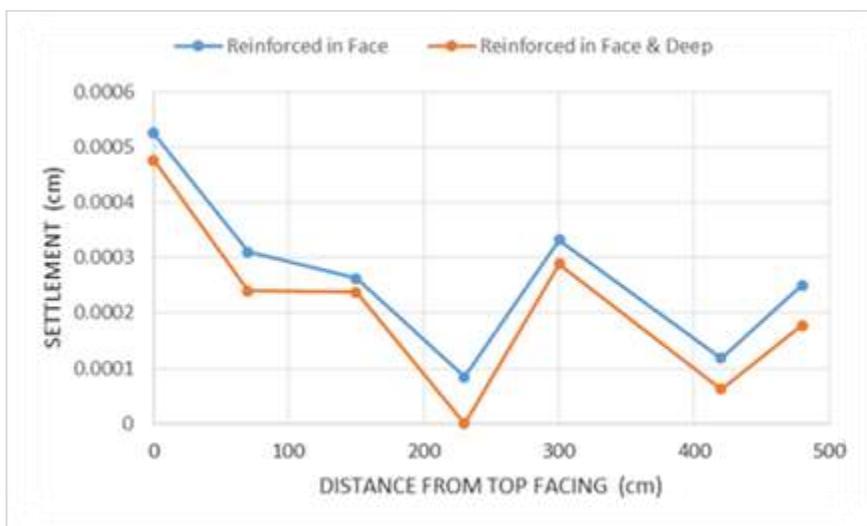
۳-۱۶: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای دو مدل مسلح شده در نما و مسلح شده در عمق و نما (سلول‌های ژئوسل پر شده با خاک شن و ژئوسل با  $M=200 \text{ kN/m}$ )



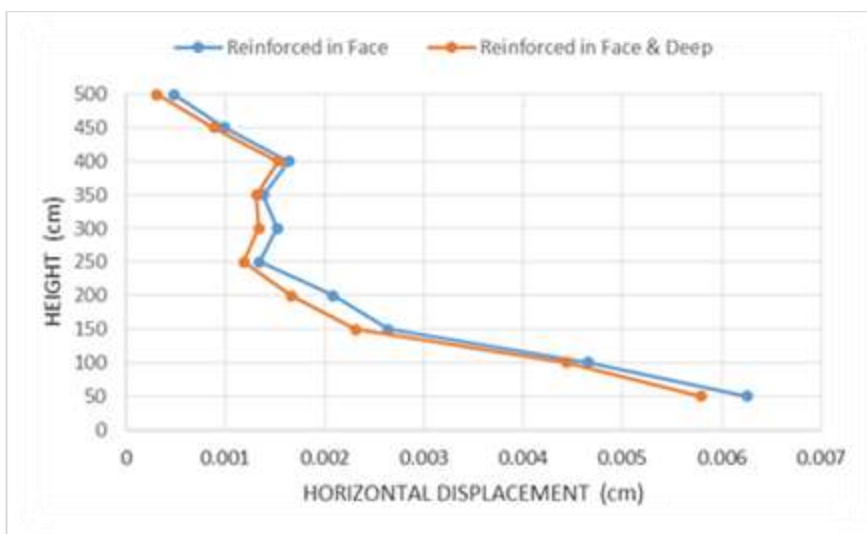
۳-۱۷: مقایسه نشست شیروانی برای دو مدل مسلح شده در نما و مسلح شده در عمق و نما (سلول‌های ژئوسل پر شده با خاک شن و ژئوسل با  $M=200 \text{ kN/m}$ )



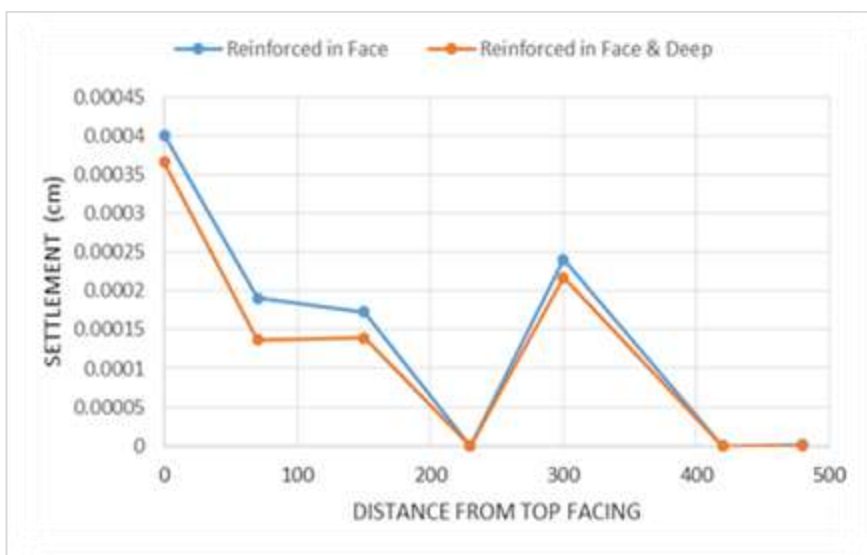
۱۸-۳: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای دو مدل مسلح شده در نما و مسلح شده در عمق و نما (سلول‌های ژئوسل پر شده با خاک ماسه و ژئوسل با  $M=500 \text{ kN/m}$ )



۱۹-۳: مقایسه نشست شیروانی برای دو مدل مسلح شده در نما و مسلح شده در عمق و نما (سلول‌های ژئوسل پر شده با خاک ماسه و ژئوسل با  $M=500 \text{ kN/m}$ )



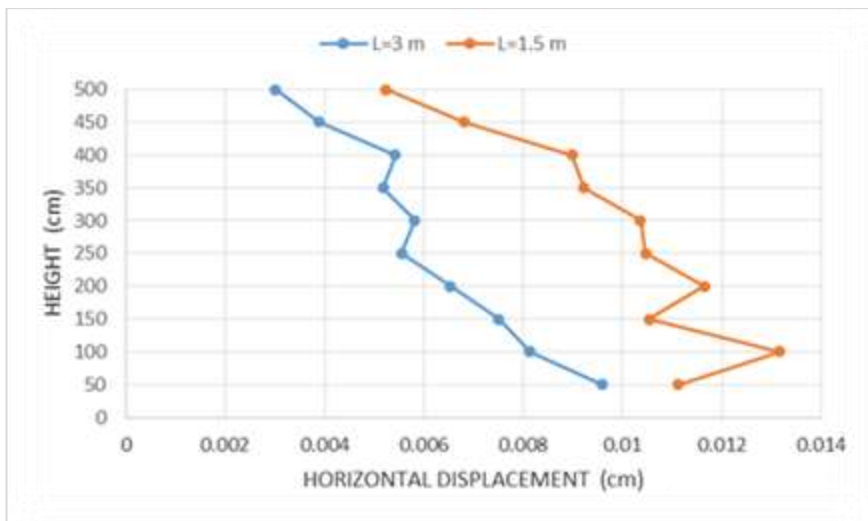
۳-۲: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای دو مدل مسلح شده در نما و مسلح شده در عمق و نما (سلول‌های ژئوسل پر شده با خاک شن و ژئوسل با  $M=500 \text{ kN/m}$ )



۳-۲: مقایسه نشست شیروانی برای دو مدل مسلح شده در نما و مسلح شده در عمق و نما (سلول‌های ژئوسل پر شده با خاک شن و ژئوسل با  $M=500 \text{ kN/m}$ )

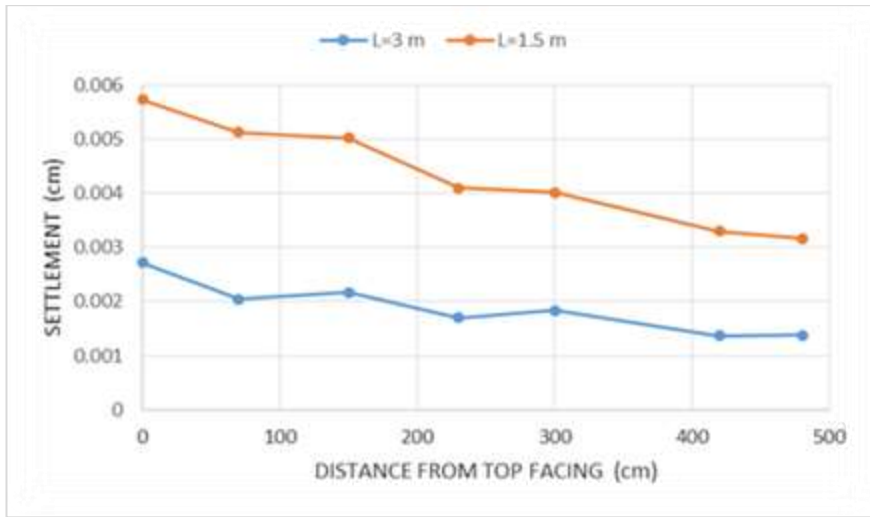
### ۳-۷ تأثیر طول لایه‌های مسلح کننده

برای پایداری سیستم شیب با دیوار خاک مسلح لازم است تا مسلح کننده‌ها سطح گسیختگی را قطع کنند. همواره یک طول بحرانی برای مسلح کننده‌ها قابل تعریف است. چنانچه این حداقل طول ضروری وجود نداشته باشد، امکان ناپایداری خارجی سیستم از جمله گسیختگی عمیق یا جدا شدگی ناحیه مسلح شده از سایر اجزای مدل وجود خواهد داشت. جهت بررسی تأثیر طول لایه‌های ژئوسل، دو طول مختلف لایه‌ها،  $L$  برابر  $1/5$  و  $3$  متر برای نما و دو طول مختلف لایه‌ها،  $L$  برابر  $4$  و  $5$  متر برای عمق استفاده شد.

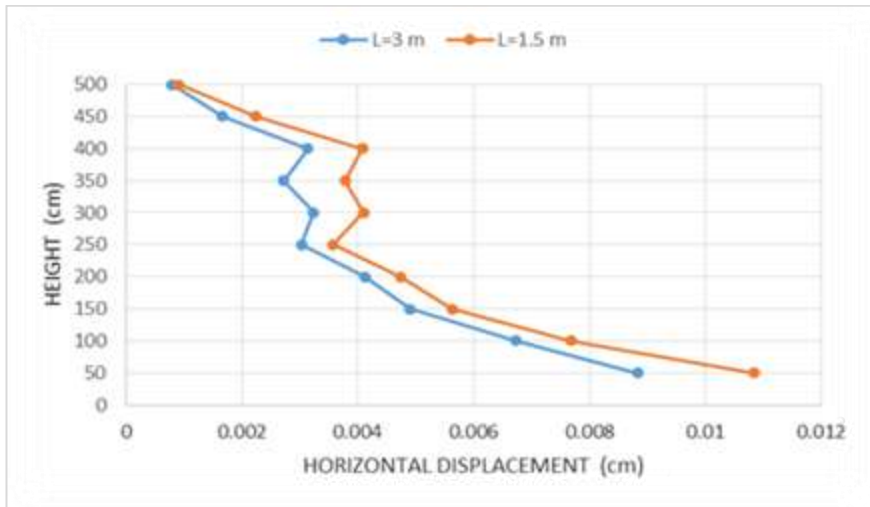


۳-۲۲: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای دو مدل مسلح شده در نما با لایه‌های مسلح کننده به طول  $3$  و  $1/5$  متر (سلول‌های ژئوسل پر شده با خاک ماسه و ژئوسل با  $M=200 \text{ kN/m}$ )

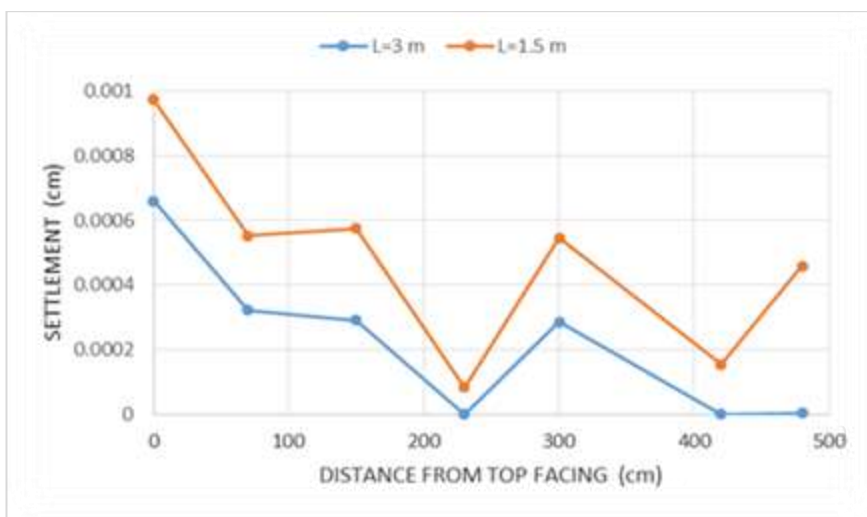




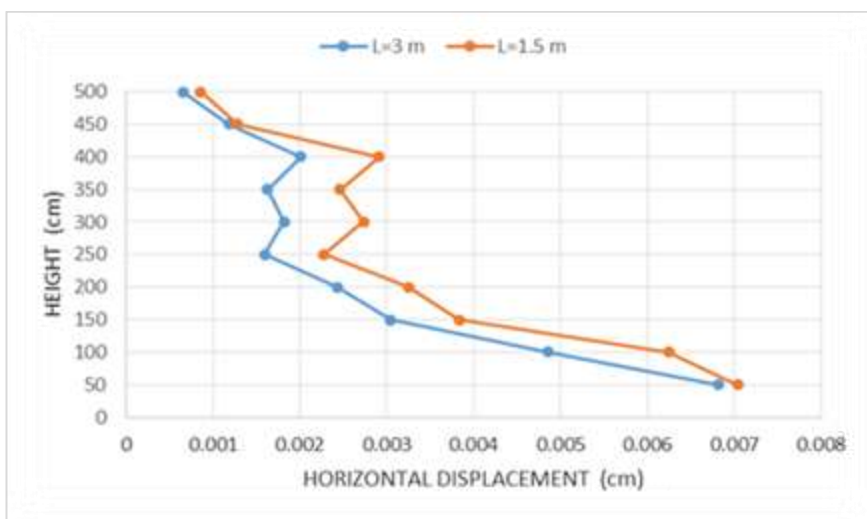
۳-۲۳: مقایسه نشست شیروانی برای دو مدل مسلح شده در نما با لایه‌های مسلح کننده به طول ۳ و ۱/۵ متر (سلول‌های ژئوسل پر شده با خاک ماسه و ژئوسل با  $M=200 \text{ kN/m}$ )



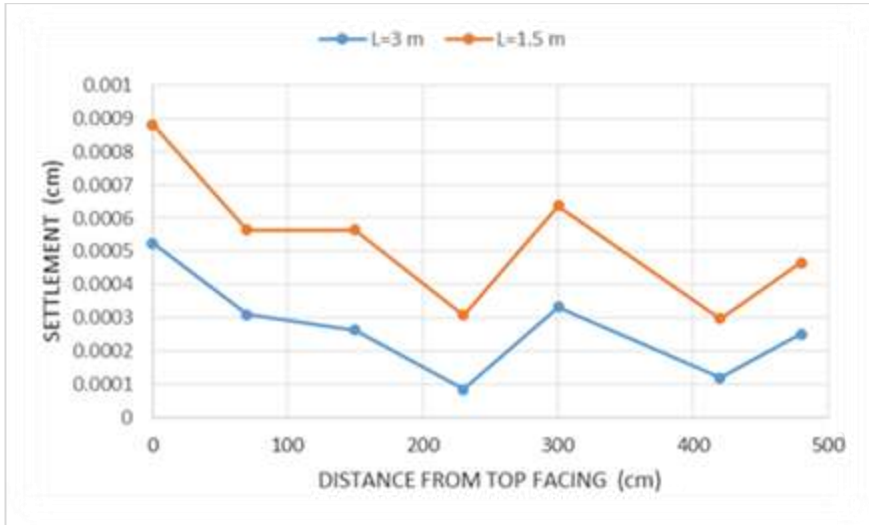
۳-۲۴: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای دو مدل مسلح شده در نما با لایه‌های مسلح کننده به طول ۳ و ۱/۵ متر (سلول‌های ژئوسل پر شده با خاک شن و ژئوسل با  $M=200 \text{ kN/m}$ )



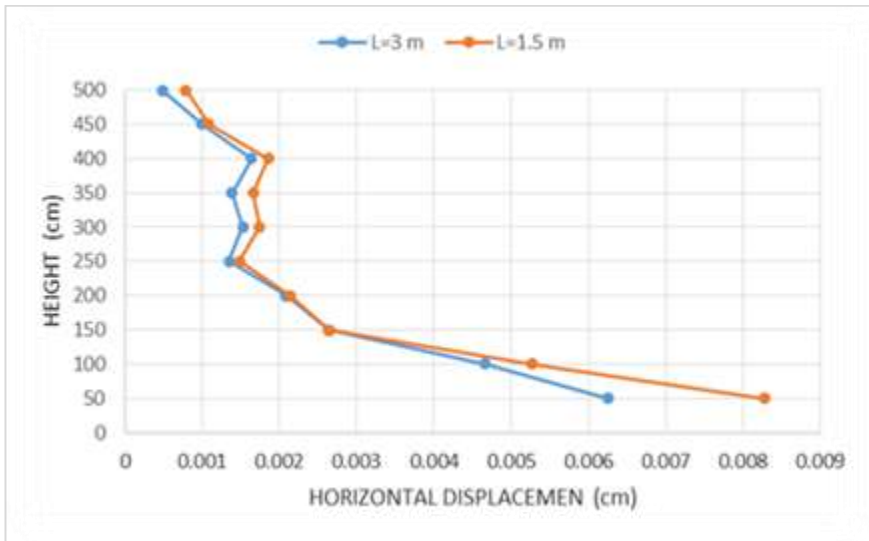
۲۵-۳: مقایسه نشست شیروانی برای دو مدل مسلح شده در نما با لایه‌های مسلح کننده به طول ۳ و ۱/۵ متر (سلول‌های ژئوسل پر شده با خاک شن و ژئوسل با  $M=200 \text{ kN/m}$ )



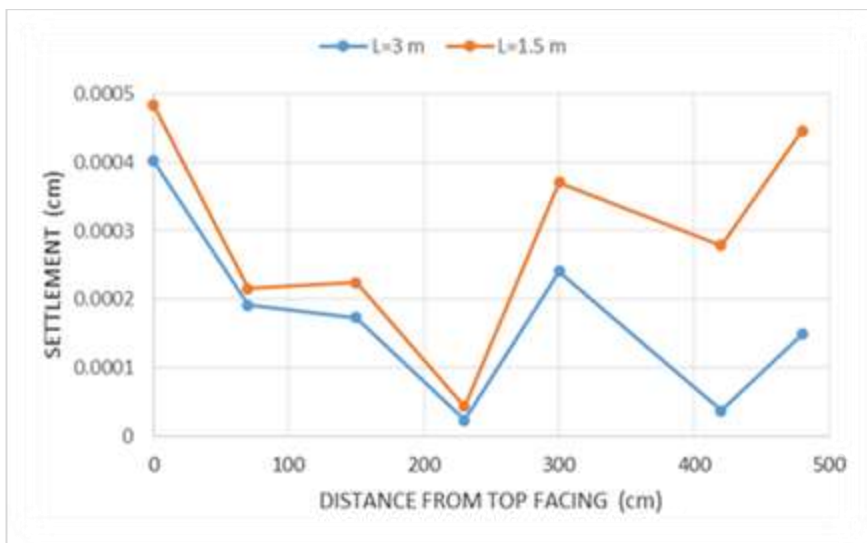
۲۶-۳: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای دو مدل مسلح شده در نما با لایه‌های مسلح کننده به طول ۳ و ۱/۵ متر (سلول‌های ژئوسل پر شده با خاک ماسه و ژئوسل با  $M=500 \text{ kN/m}$ )



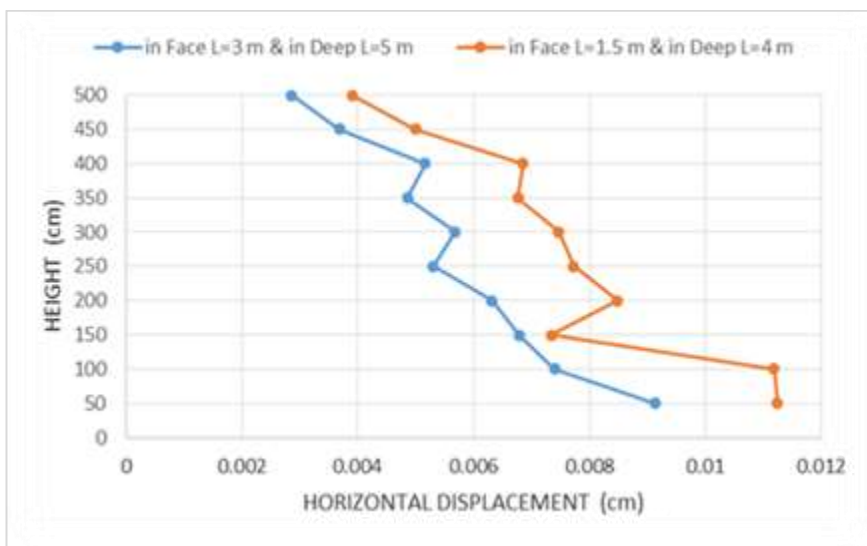
۲۷-۲: مقایسه نشست شیروانی برای دو مدل مسلح شده در نما با لایه‌های مسلح کننده به طول ۳ و ۱/۵ متر (سلول‌های ژئوسل پر شده با خاک ماسه و ژئوسل با  $M=500 \text{ kN/m}$ )



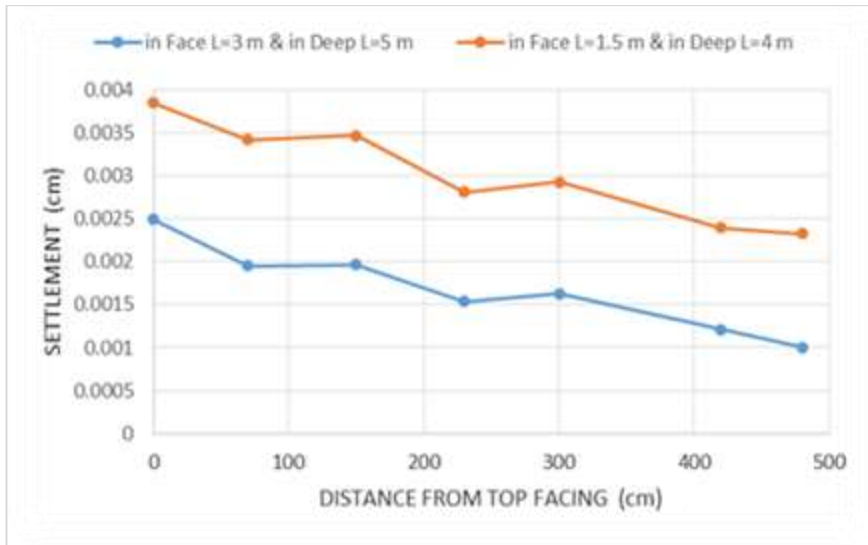
۲۸-۳: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای دو مدل مسلح شده در نما با لایه‌های مسلح کننده به طول ۳ و ۱/۵ متر (سلول‌های ژئوسل پر شده با خاک شن و ژئوسل با  $M=500 \text{ kN/m}$ )



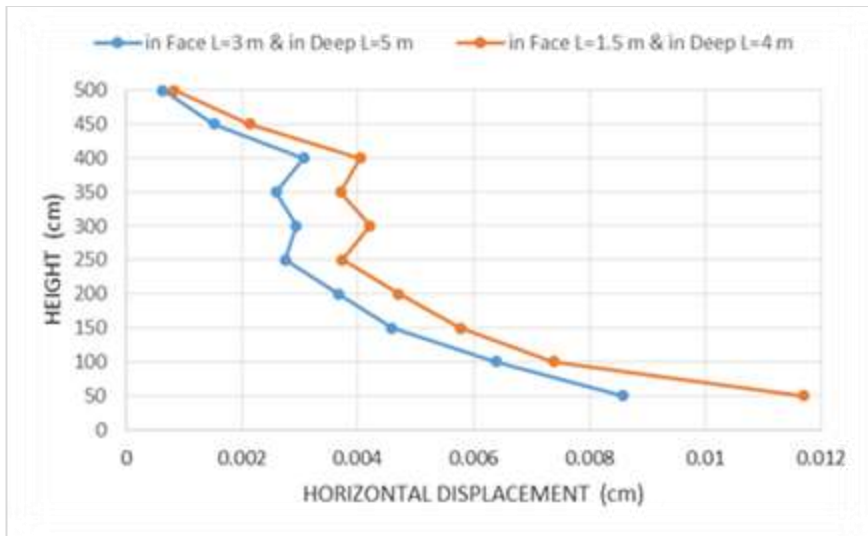
۲۹-۳: مقایسه نشست شیروانی برای دو مدل مسلح شده در نما با لایه‌های مسلح کننده به طول ۳ و ۱/۵ متر (سلول‌های ژئوسل پر شده با خاک شن و ژئوسل با  $M=500 \text{ kN/m}$ )



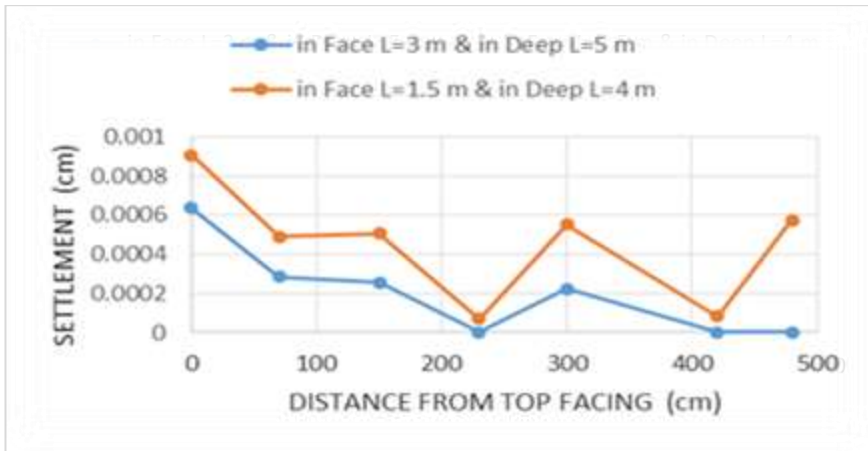
۳۰-۳: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای دو مدل مسلح شده در نما و عمق، یکی با لایه‌های مسلح کننده در نما به طول ۳ و در عمق به طول ۵ متر و دیگری با لایه‌های مسلح کننده در نما به طول ۱/۵ و در عمق به طول ۴ متر (سلول‌های ژئوسل پر شده با خاک ماسه و ژئوسل با  $M=200 \text{ kN/m}$ )



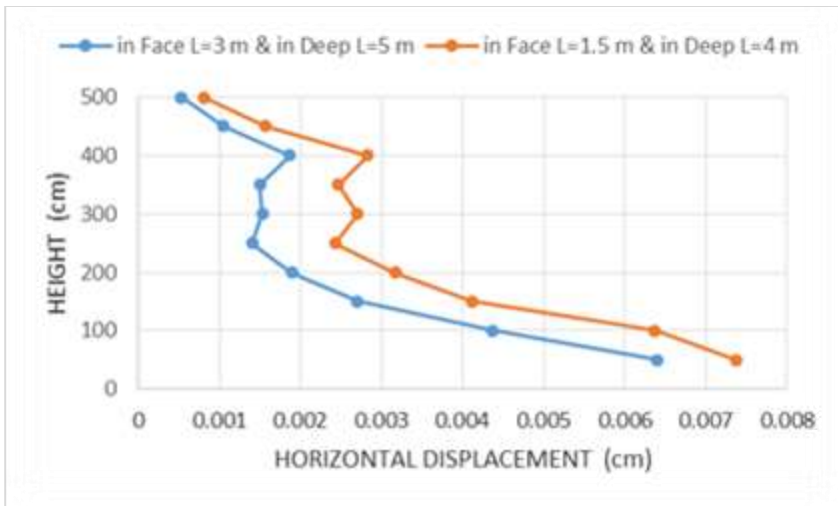
۳-۳۱: مقایسه نشست شیروانی برای دو مدل مسلح شده در نما و عمق، یکی با لایه‌های مسلح کننده در نما به طول ۳ و در عمق به طول ۵ متر و دیگری با لایه‌های مسلح کننده در نما به طول ۱/۵ و در عمق به طول ۴ متر (سلول‌های ژئوسل پر شده با خاک ماسه و ژئوسل با  $M=200 \text{ kN/m}$ )



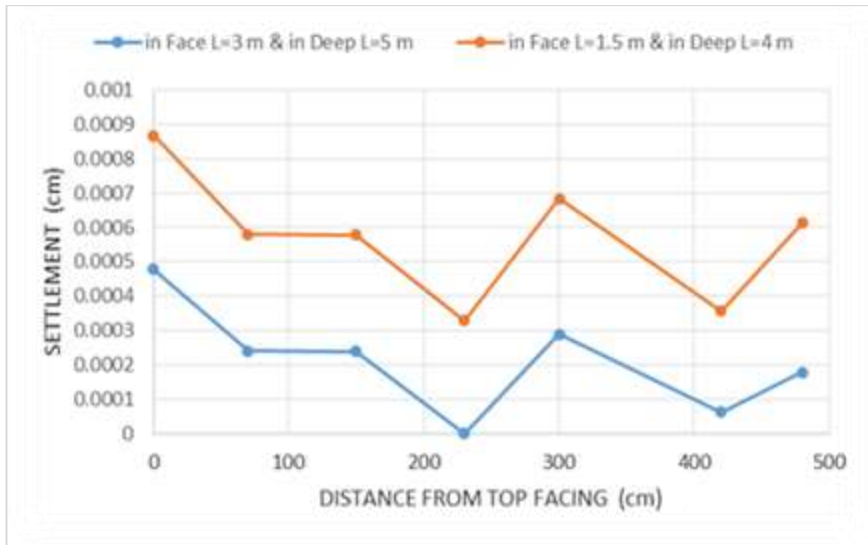
۳-۳۲: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای دو مدل مسلح شده در نما و عمق، یکی با لایه‌های مسلح کننده در نما به طول ۳ و در عمق به طول ۵ متر و دیگری با لایه‌های مسلح کننده در نما به طول ۱/۵ و در عمق به طول ۴ متر (سلول‌های ژئوسل پر شده با خاک شن و ژئوسل با  $M=200 \text{ kN/m}$ )



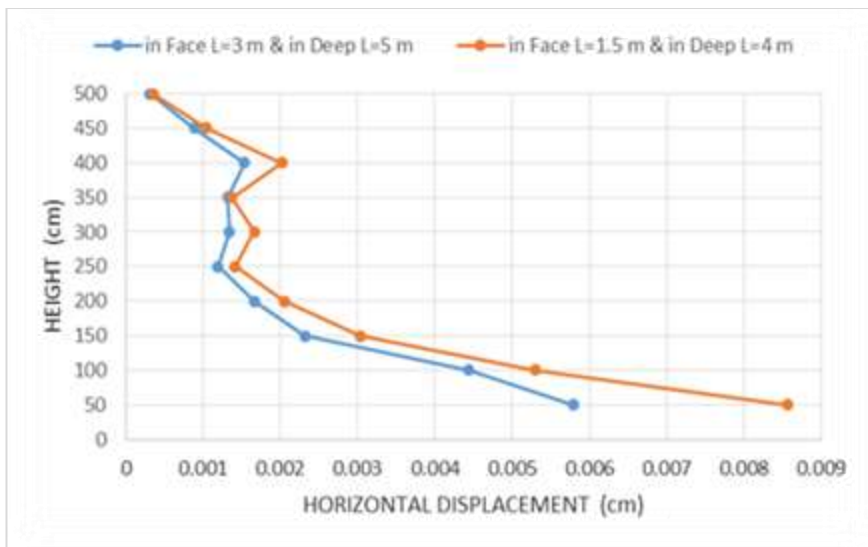
۳-۳۳: مقایسه نشست شیروانی برای دو مدل مسلح شده در نما و عمق، یکی با لایه‌های مسلح کننده در نما به طول ۳ و در عمق به طول ۵ متر و دیگری با لایه‌های مسلح کننده در نما به طول ۱/۵ و در عمق به طول ۴ متر (سلول‌های ژئوسل پر شده با خاک شن و ژئوسل با  $M=200 \text{ kN/m}$ )



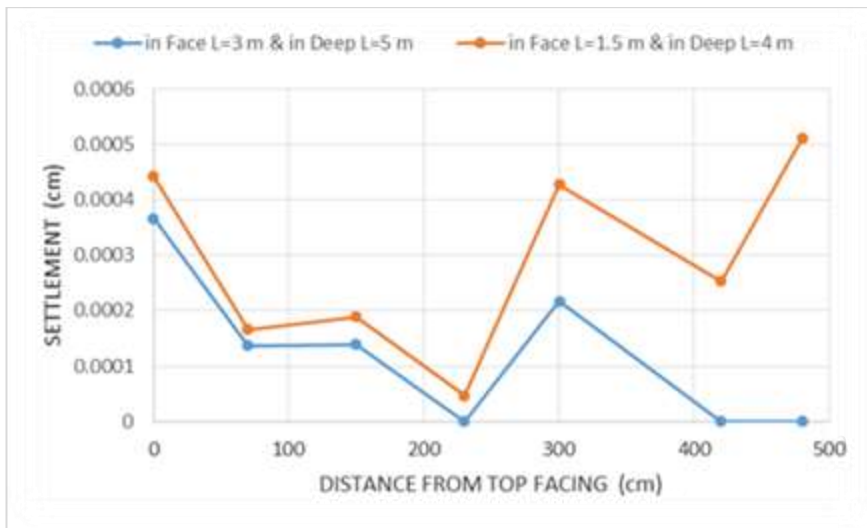
۳-۳۴: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای دو مدل مسلح شده در نما و عمق، یکی با لایه‌های مسلح کننده در نما به طول ۳ و در عمق به طول ۵ متر و دیگری با لایه‌های مسلح کننده در نما به طول ۱/۵ و در عمق به طول ۴ متر (سلول‌های ژئوسل پر شده با خاک ماسه و ژئوسل با  $M=500 \text{ kN/m}$ )



۳-۴۵: مقایسه نشست شیروانی برای دو مدل مسلح شده در نما و عمق، یکی با لایه‌های مسلح کننده در نما به طول ۳ و در عمق به طول ۵ متر و دیگری با لایه‌های مسلح کننده در نما به طول ۱/۵ و در عمق به طول ۴ متر (سلول‌های ژئوسل پر شده با خاک ماسه و ژئوسل با  $M=500 \text{ kN/m}$ )



۳-۴۶: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای دو مدل مسلح شده در نما و عمق، یکی با لایه‌های مسلح کننده در نما به طول ۳ و در عمق به طول ۵ متر و دیگری با لایه‌های مسلح کننده در نما به طول ۱/۵ و در عمق به طول ۴ متر (سلول‌های ژئوسل پر شده با خاک شن و ژئوسل با  $M=500 \text{ kN/m}$ )



۳-۳۷: مقایسه نشست شیروانی برای دو مدل مسلح شده در نما و عمق، یکی با لایه‌های مسلح کننده در نما به طول ۳ و در عمق به طول ۵ متر و دیگری با لایه‌های مسلح کننده در نما به طول ۱/۵ و در عمق به طول ۴ متر (سلول‌های ژئوسل پر شده با خاک شن و ژئوسل با  $M=500 \text{ kN/m}$ )

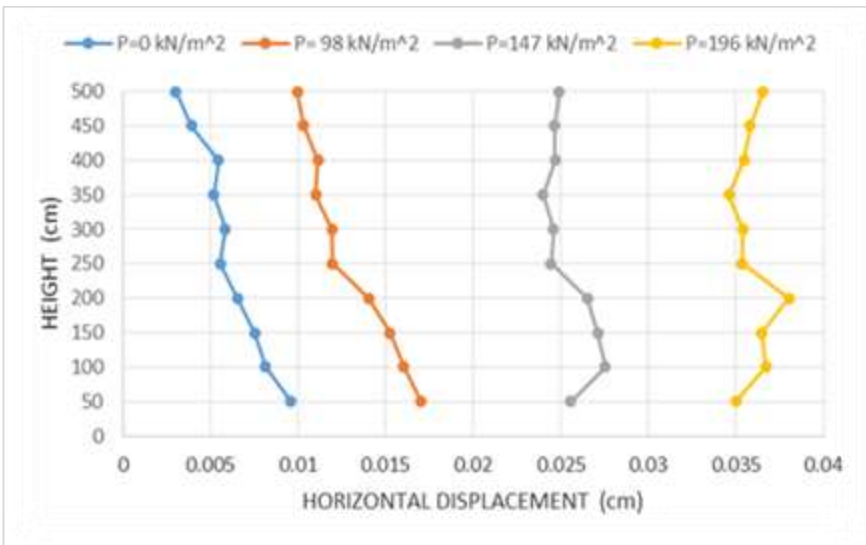
مشاهده می‌شود که با افزایش طول لایه تسلیح سه بعدی، جابجایی افقی و نشست کاهش می‌یابد. البته این تأثیر مثبت، باید در مقایسه با مازاد هزینه استفاده از لایه‌های مسلح کننده طولی‌تر قرار گیرد و دارای توجیه اقتصادی باشد.

### ۳-۸ تأثیر سربار

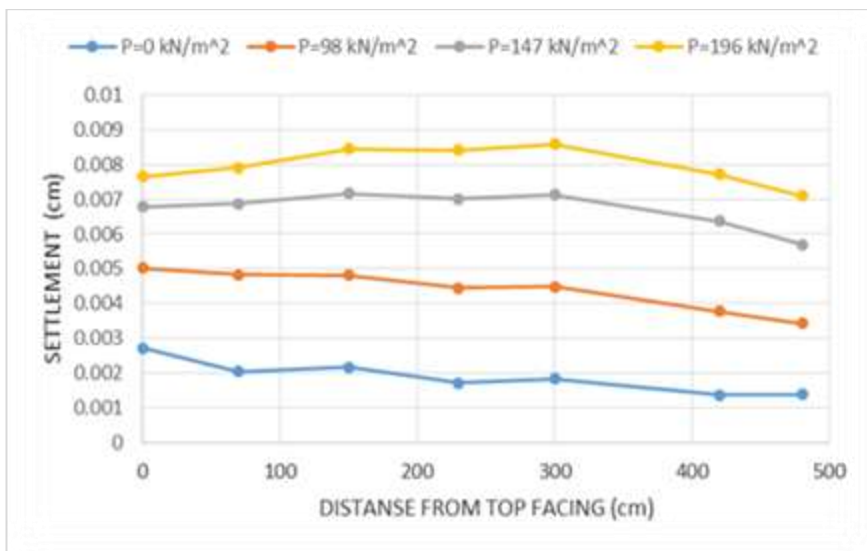
اعمال سربار به سطح شیروانی‌ها می‌تواند رفتار لرزه‌ای آن‌ها را تحت تأثیر زیادی قرار دهد. در این قسمت به بررسی تأثیر مقدار سربار اعمال شده به سطح شیروانی پرداخته می‌شود. برای این منظور در سه حالت مجزا، بار گسترده ۹۸، ۱۴۷ و ۱۹۶ کیلو نیوتن بر متر مربع (با فرض سربار ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمربع معادل مجموع بار مرده و زنده)، که معادل بار ساختمان‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه می‌باشد به فاصله ۶ متر از لبه و به طول ۱۰ متر بر روی شیروانی بارگذاری شد. در شکل‌های (۳-۳۸) تا (۳-۶۹) تغییر مکان افقی نما نسبت به ارتفاع شیب و نشست سطح شیب نسبت به فاصله از لبه شیب برای بارگذاری‌های متفاوت نشان داده شده است. آنچه از این نمودارها مشهود است، افزایش مقدار تغییر شکل افقی و نشست با بارگذاری و اثر منفی آن است. همچنین شکل مود تغییر شکل شیروانی نیز با اعمال بار، تا حدودی دچار تغییر شده است. قابل توجه است که در بعضی از مدل‌ها، با وجود اثر منفی



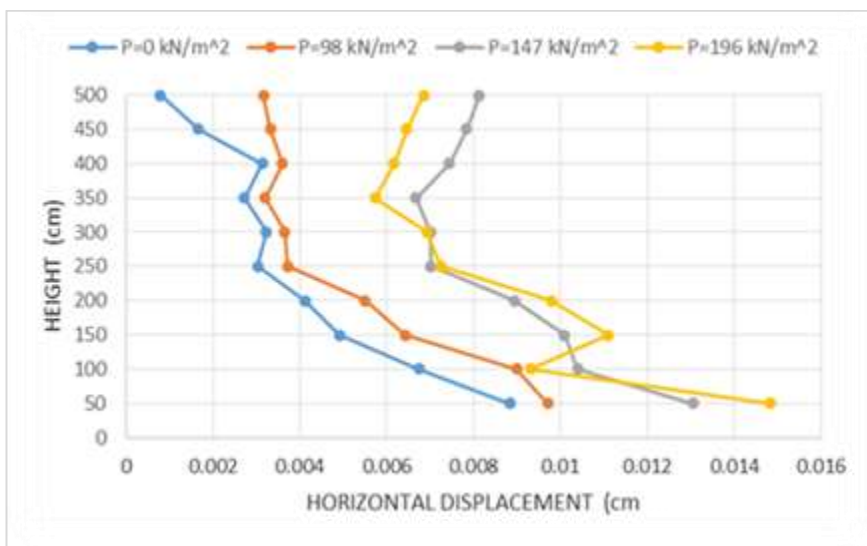
بارگذاری و افزایش تغییرشکل افقی و نشست با بارگذاری، زمانی که سربار وارده خیلی بیشتر می‌شود، تغییرشکل افقی و نشست تا حدودی کمتر از حالتی است که سربار کمتر به مدل اعمال می‌شود، دلیل بروز چنین نتایجی این است که وقتی سربار وارده از یک حدی بیشتر می‌شود، نیروی محوری ایجاد شده در ژئوسل افزایش پیدا کرده و کارایی ژئوسل بیشتر می‌شود. شایان ذکر است که در حالت بارگذاری در تعدادی از مدل‌ها (شکل‌های (۳-۶۹)، (۳-۶۱) و (۳-۴۵)) علاوه بر نشست در برخی از نقاط سطح شیب، برخی از نقاط نیز دچار بلند شدگی می‌شوند که به همین علت در این سه شکل به جای بررسی نشست، جابجایی قائم سطح شیب مورد بررسی قرار گرفت.



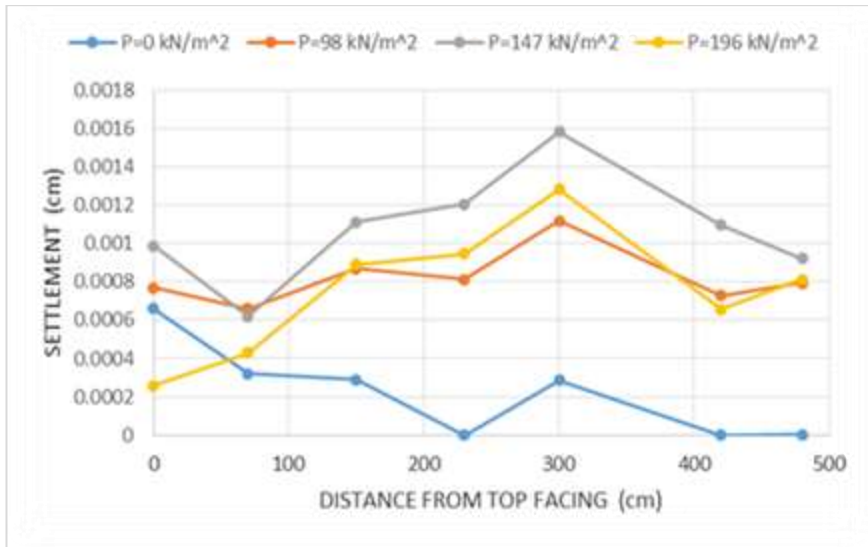
۳-۸: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۳ متر و با  $M=200$  kN/m و پر شده با خاک ماسه (تأثیر سربار)



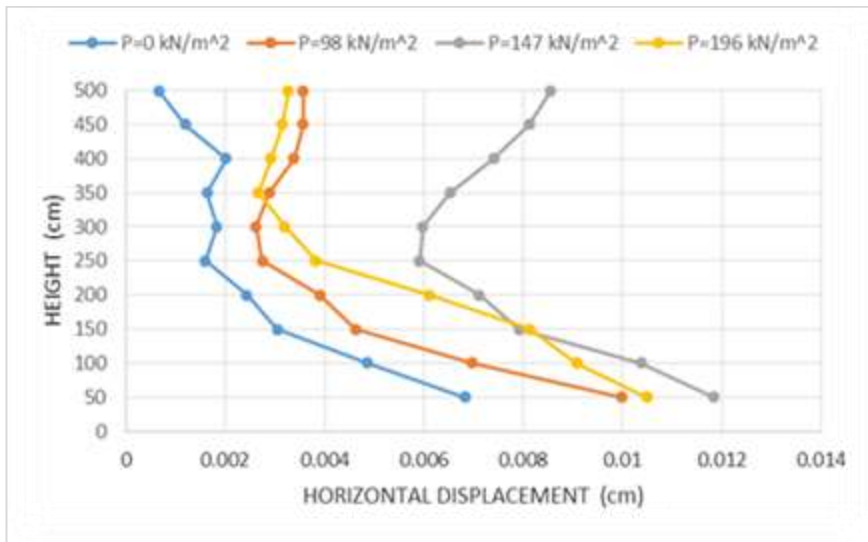
۳-۳۹: مقایسه نشست شیروانی برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۳ متر و با  $M=200$  kN/m و پر شده با خاک ماسه (تأثیر سربار)



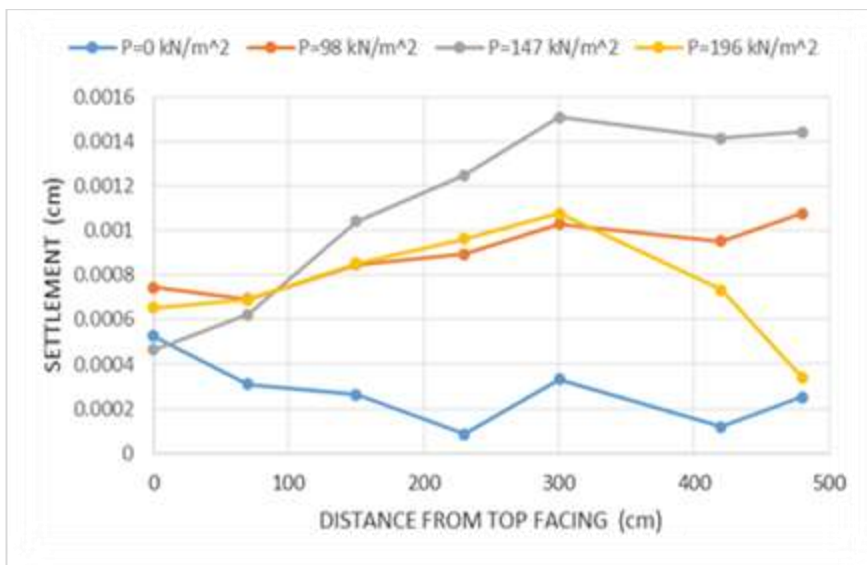
۳-۴۰: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۳ متر و با  $M=200$  kN/m و پر شده با خاک شن (تأثیر سربار)



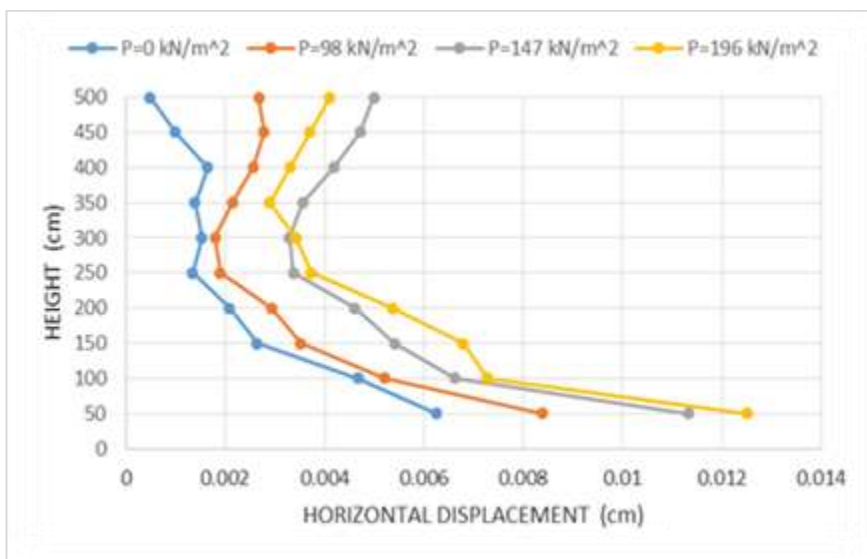
۴۱-۳: مقایسه نشست شبروانی برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۳ متر و با  $M=200$  kN/m و پر شده با خاک شن (تأثیر سربار)



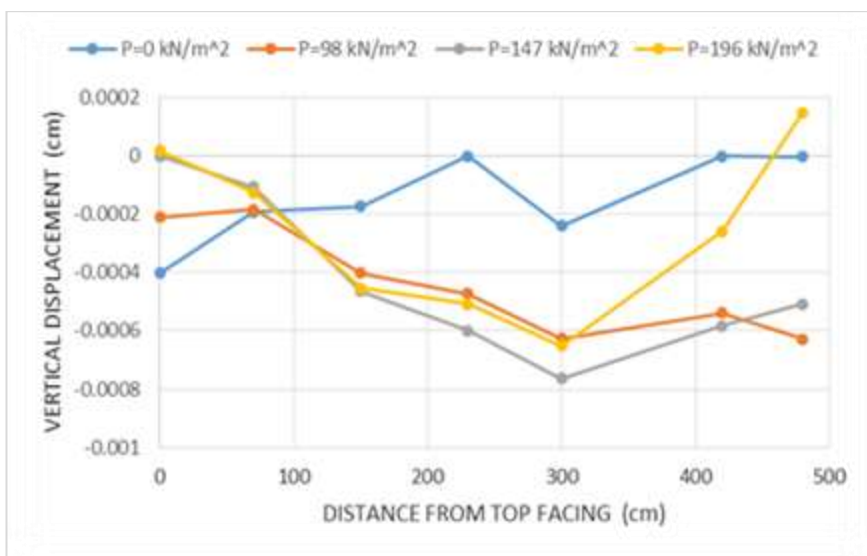
۴۲-۳: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۳ متر و با  $M=500$  kN/m و پر شده با خاک ماسه (تأثیر سربار)



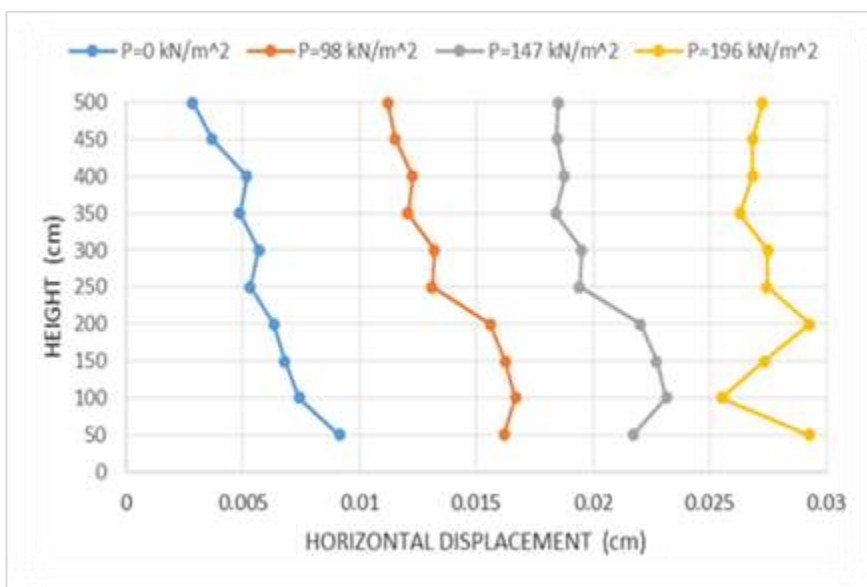
۳-۴۳: مقایسه نشست شیروانی نما برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۳ متر و با  $M=500$  kN/m و پر شده با خاک ماسه (تأثیر سربار)



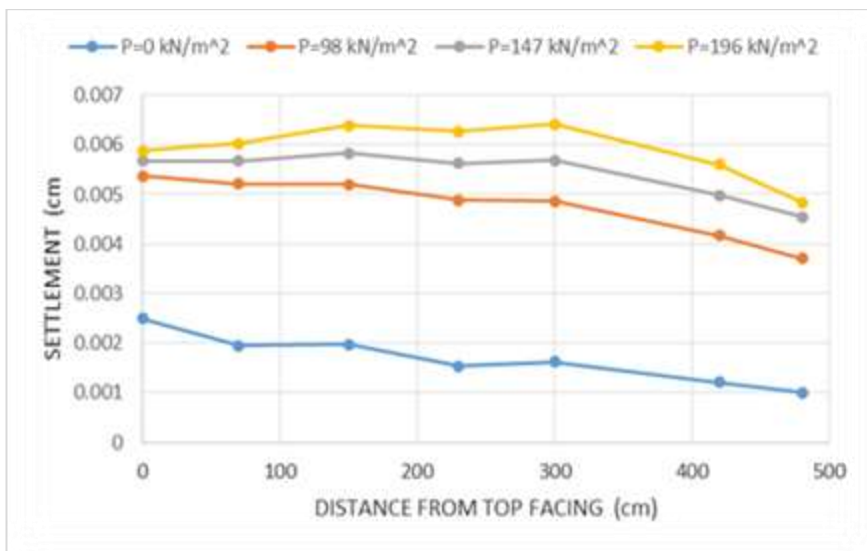
۳-۴۴: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۳ متر و با  $M=500$  kN/m و پر شده با خاک شن (تأثیر سربار)



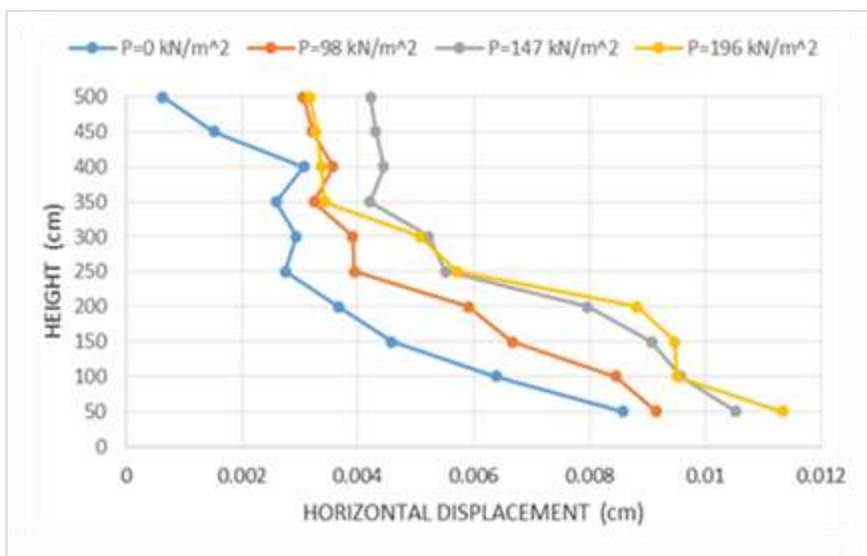
۳-۴۵: مقایسه نشست شیروانی نما برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۳ متر و با  $M=500$  kN/m و پر شده با خاک شن (تأثیر سربار)



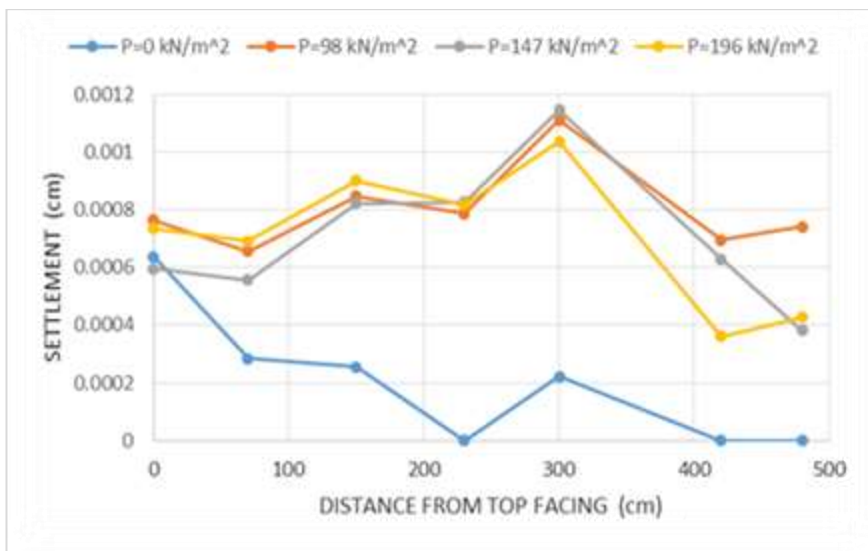
۳-۴۶: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۳ متر در نما و ۵ متر در عمق و با  $M=200$  kN/m و پر شده با خاک ماسه (تأثیر سربار)



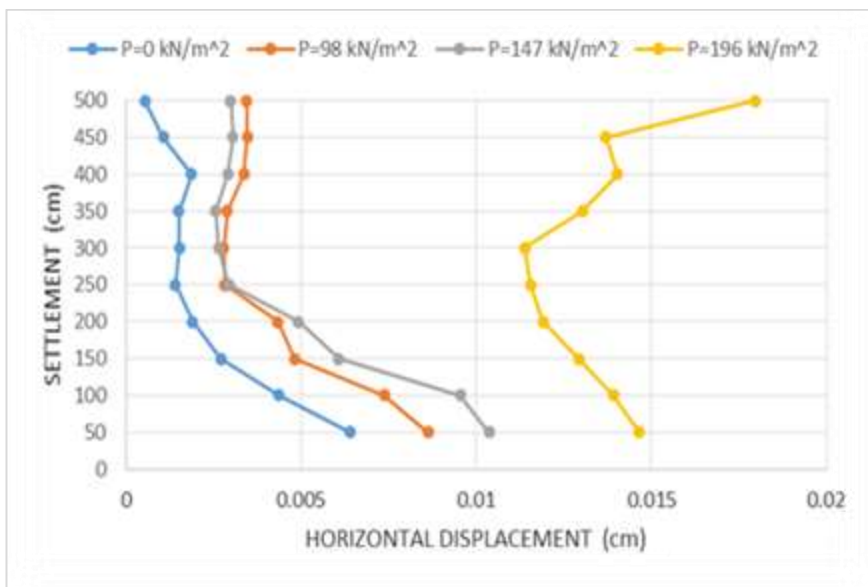
۳-۴۷: مقایسه نشست شیروانی برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۳ متر در نما و ۵ متر در عمق و با  $M=200 \text{ kN/m}$  و پر شده با خاک ماسه (تأثیر سربار)



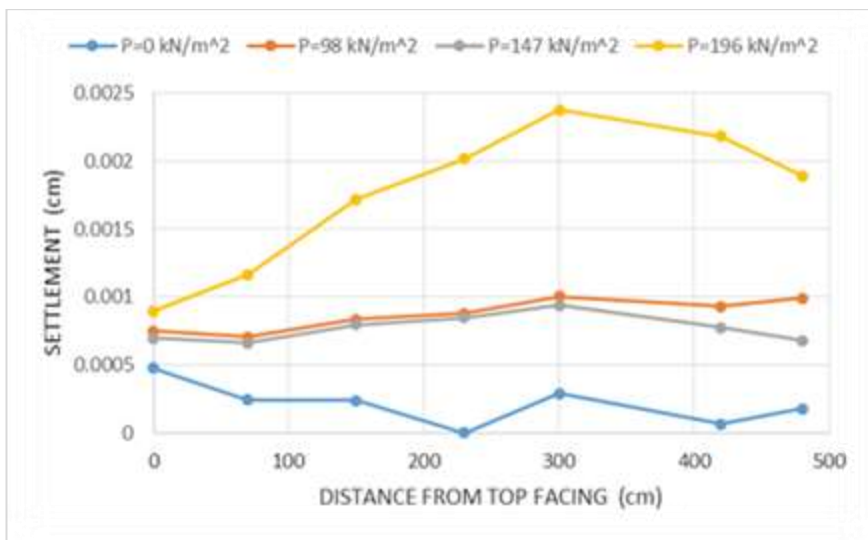
۳-۴۸: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۳ متر در نما و ۵ متر در عمق و با  $M=200 \text{ kN/m}$  و پر شده با خاک شن (تأثیر سربار)



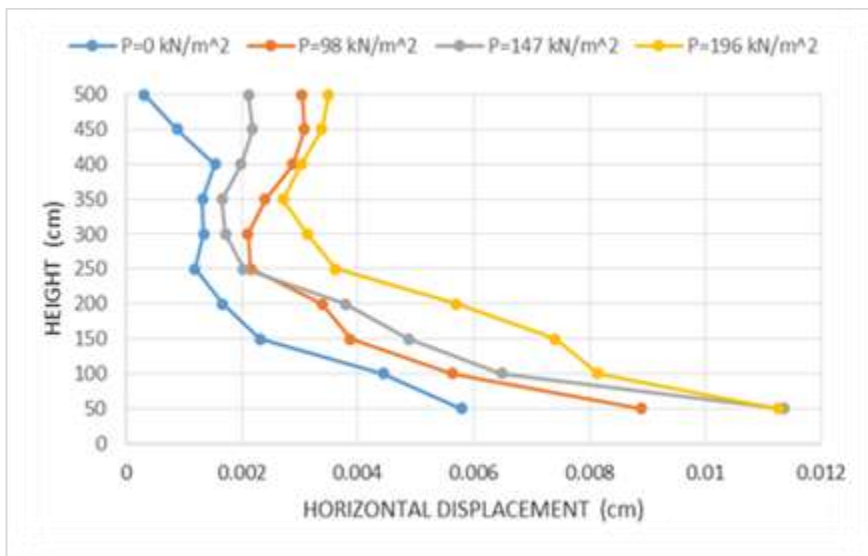
۴۹-۳: مقایسه نشست شبروانی برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۳ متر در نما و ۵ متر در عمق و با  $M=200 \text{ kN/m}$  و پر شده با خاک شن (تأثیر سربار)



۵۰-۳: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۳ متر در نما و ۵ متر در عمق و با  $M=500 \text{ kN/m}$  و پر شده با خاک ماسه (تأثیر سربار)

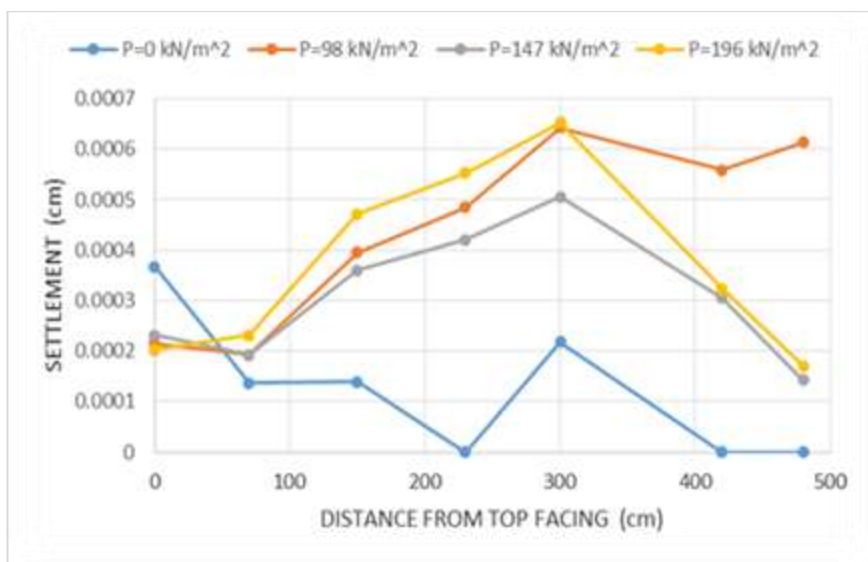


۳-۵: مقایسه نشست شیروانی برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۳ متر در نما و ۵ متر در عمق و با  $M=500 \text{ kN/m}$  و پر شده با خاک ماسه (تأثیر سربار)

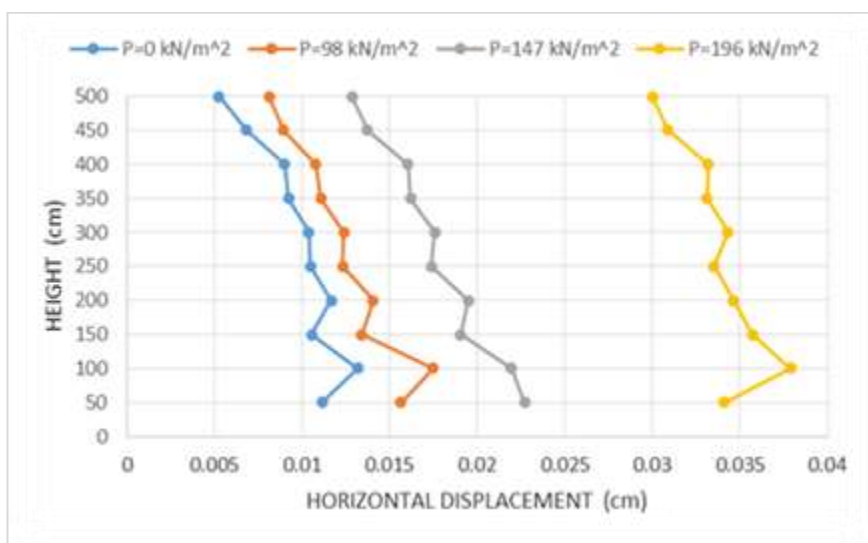


۳-۵: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۳ متر در نما و ۵ متر در عمق و با  $M=500 \text{ kN/m}$  و پر شده با خاک شن (تأثیر سربار)

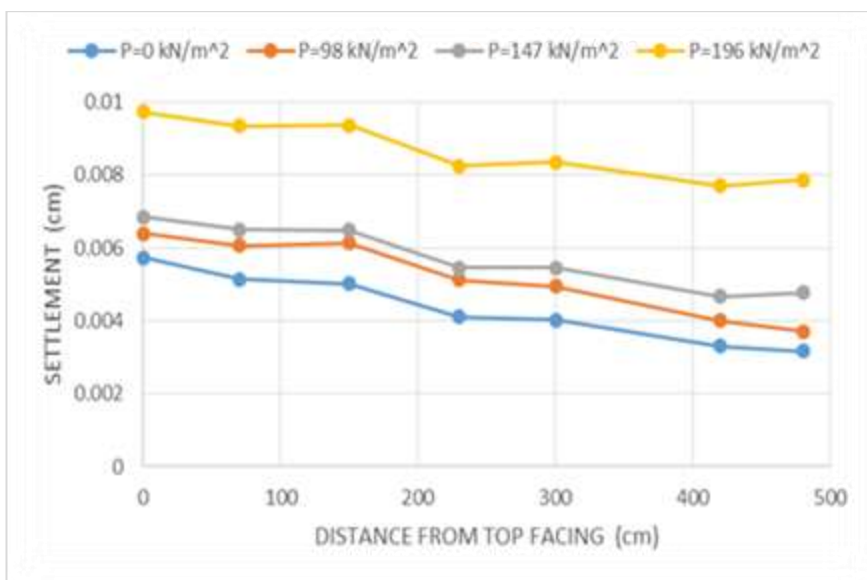




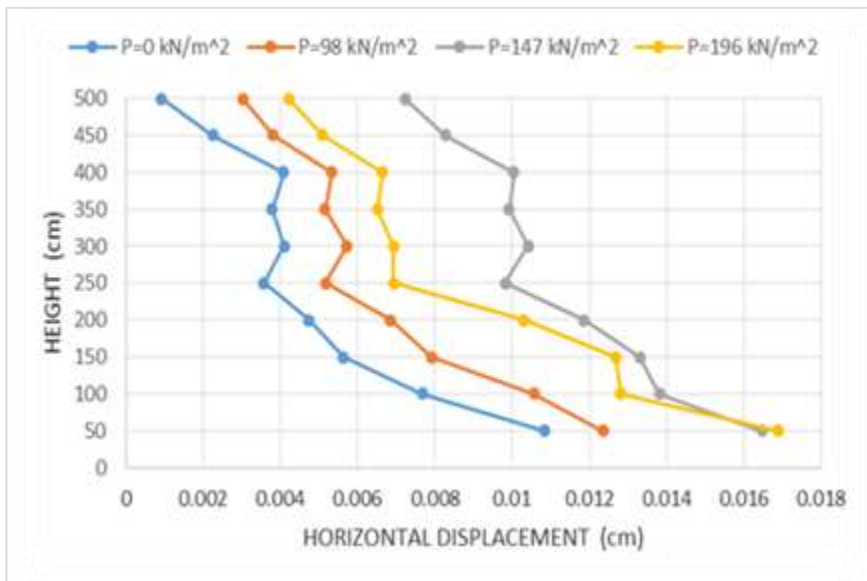
۳-۵۳: مقایسه نشست شبروانی برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۳ متر در نما و ۵ متر در عمق و با  $M=500 \text{ kN/m}$  و پر شده با خاک شن (تأثیر سربار)



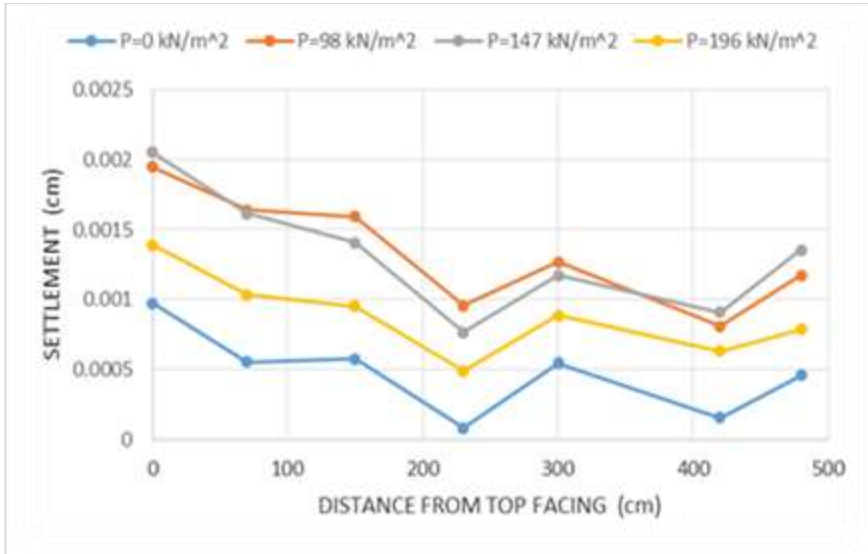
۳-۵۴: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۱/۵ متر و با  $M=200 \text{ kN/m}$  و پر شده با خاک ماسه (تأثیر سربار)



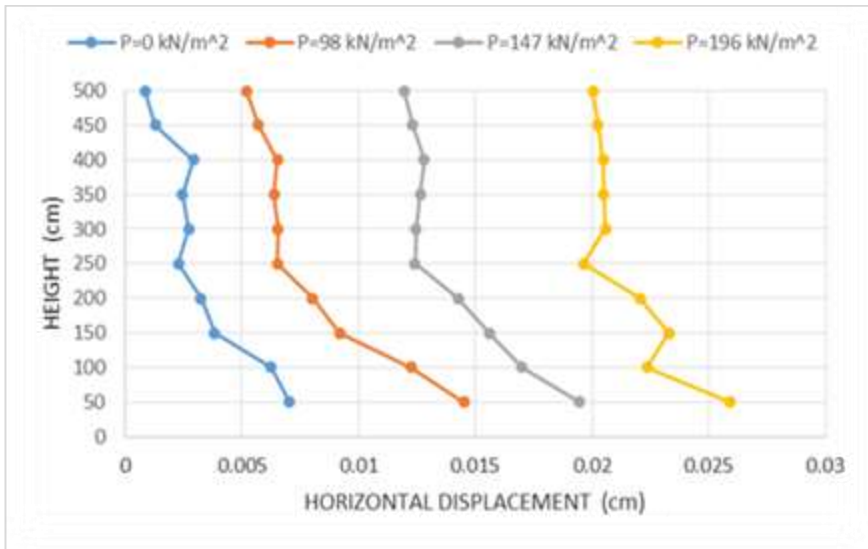
۳-۵۵: مقایسه نشست شیروانی برای مدل های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۱/۵ متر و با  $M=200$  kN/m و پر شده با خاک ماسه (تأثیر سربار)



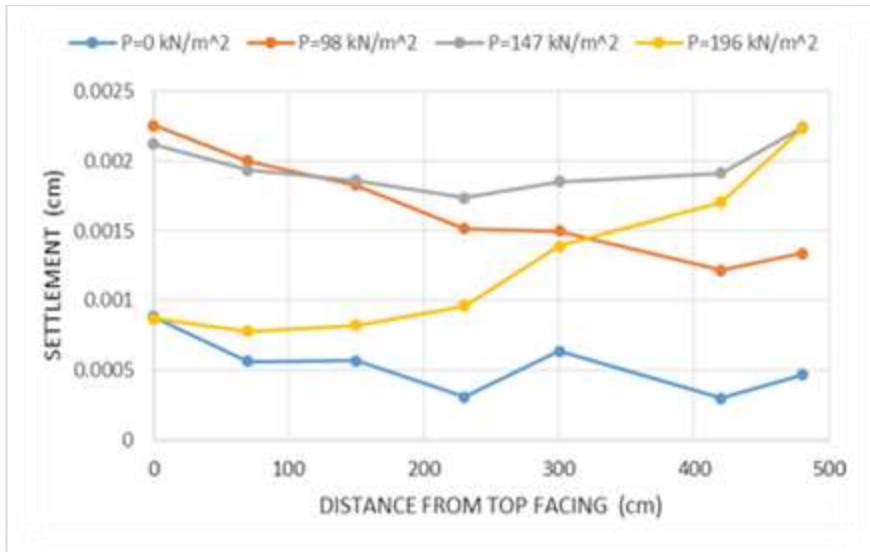
۳-۵۶: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای مدل های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۱/۵ متر و با  $M=200$  kN/m و پر شده با خاک شن (تأثیر سربار)



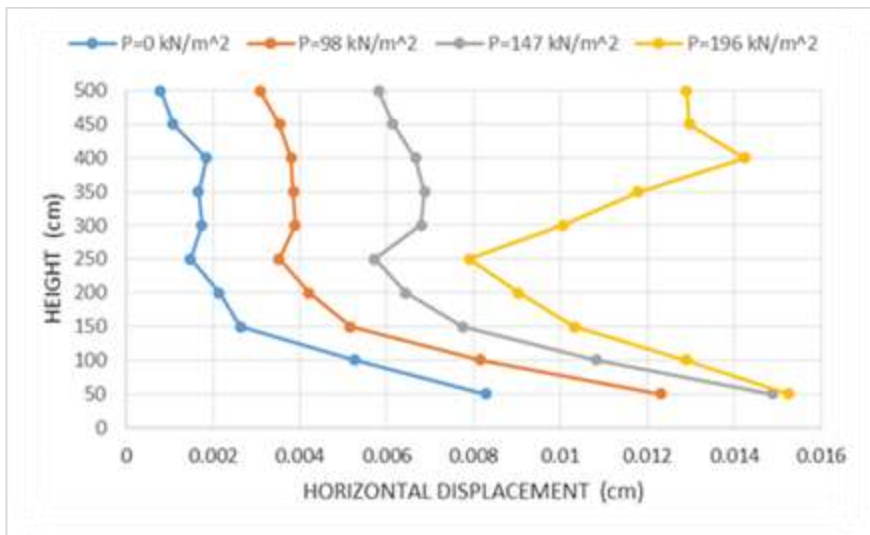
۳-۵۷: مقایسه نشست شیروانی نما برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۱/۵ متر و با  $M=200 \text{ kN/m}$  و پر شده با خاک شن (تأثیر سربار)



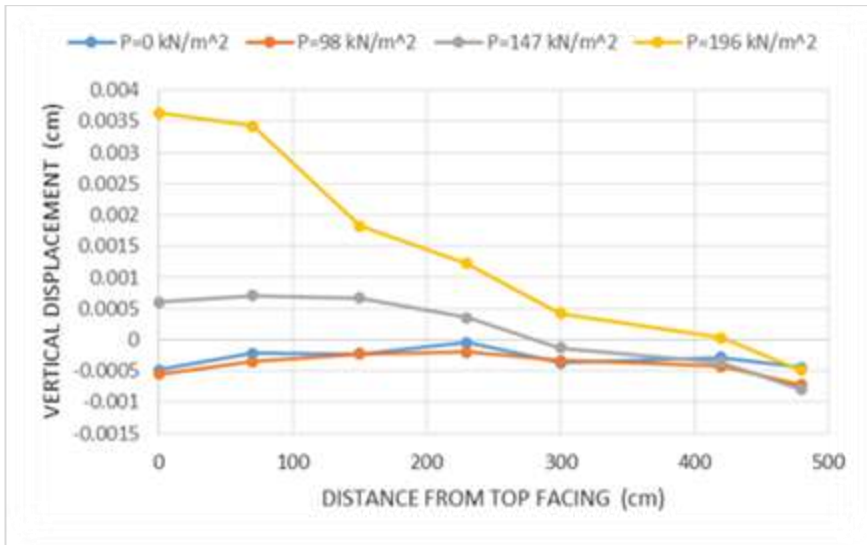
۳-۵۸: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۱/۵ متر و با  $M=500 \text{ kN/m}$  و پر شده با خاک ماسه (تأثیر سربار)



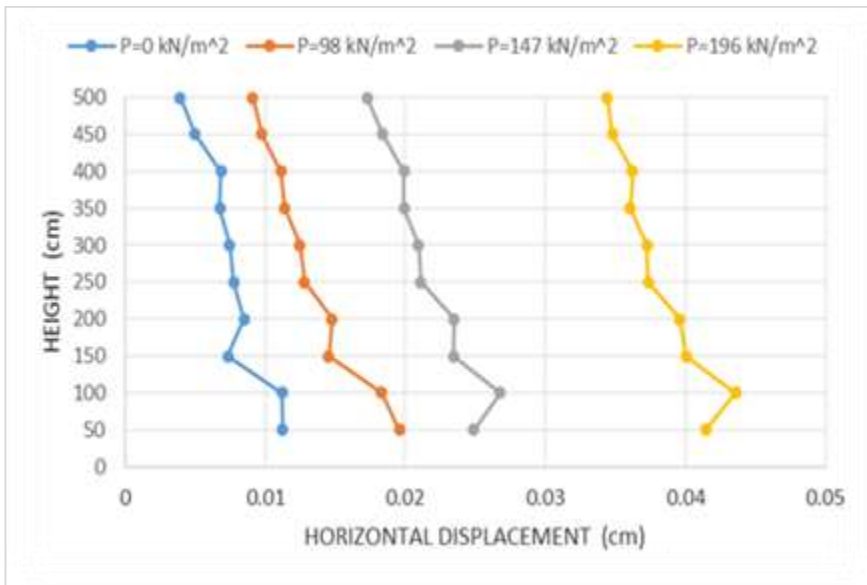
۳-۵۹: مقایسه نشست شیروانی برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۱/۵ متر و با  $M=500$  kN/m و پر شده با خاک ماسه (تأثیر سربار)



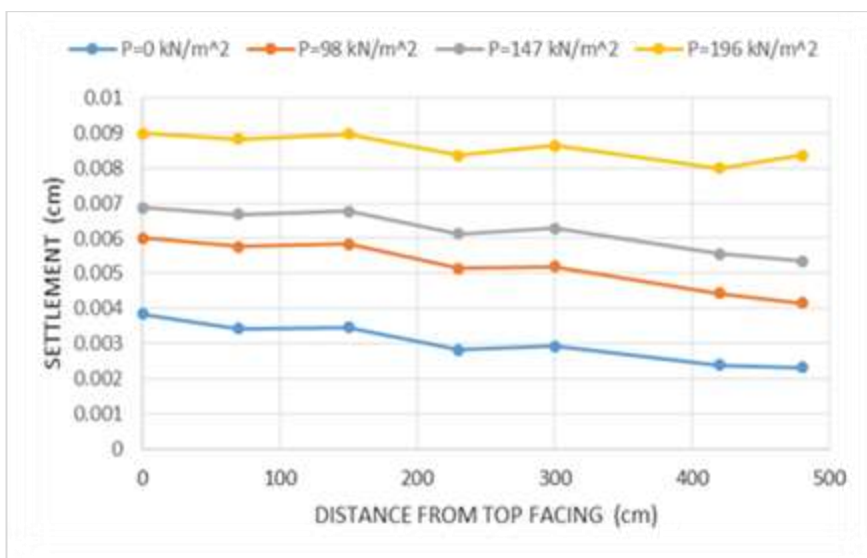
۳-۶۰: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۱/۵ متر و با  $M=500$  kN/m و پر شده با خاک شن (تأثیر سربار)



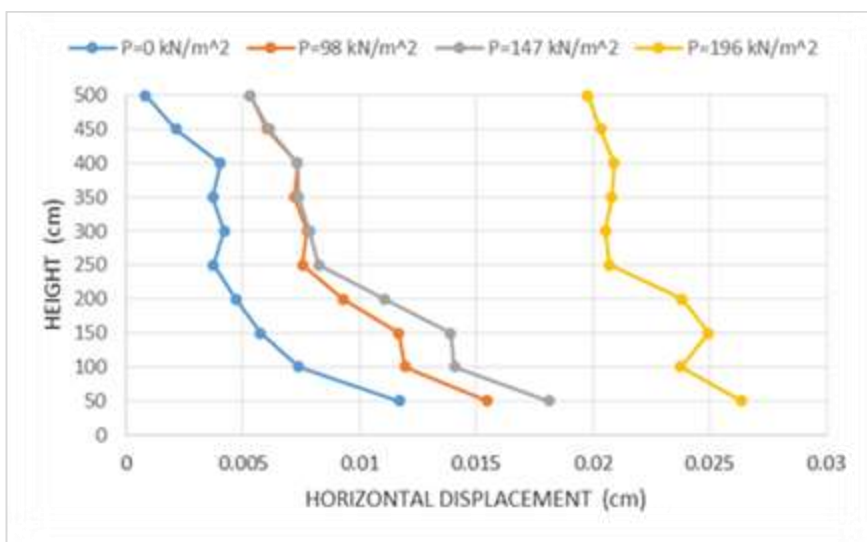
۶۱-۳: مقایسه نشست شیروانی برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۱/۵ متر و با  $M=500$  kN/m و پر شده با خاک شن (تأثیر سربار)



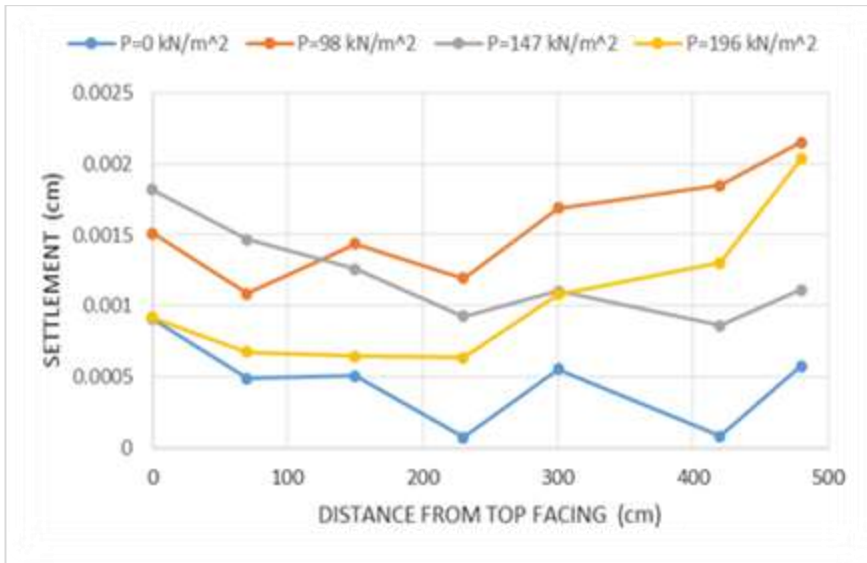
۶۲-۳: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۱/۵ متر در نما و ۴ متر در عمق و با  $M=200$  kN/m و پر شده با خاک ماسه (تأثیر سربار)



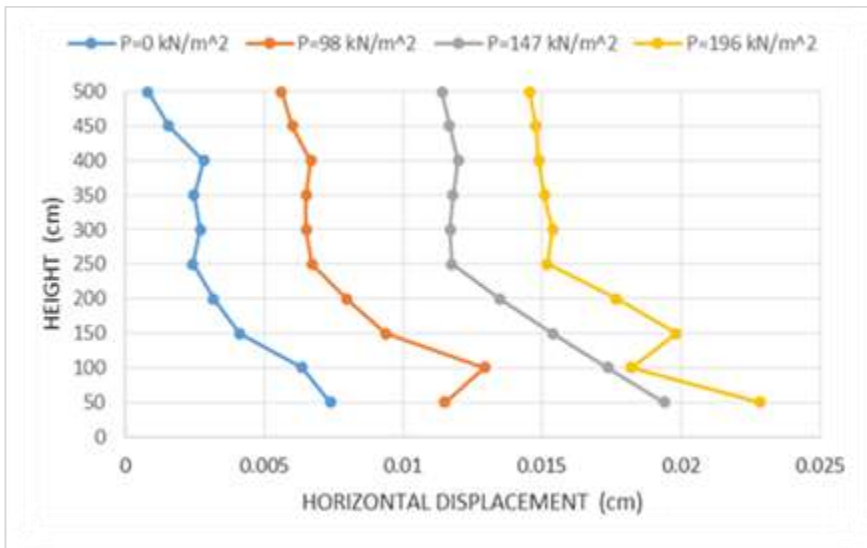
۳-۶: مقایسه نشست شیروانی برای مدل های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۱/۵ متر در نما و ۴ متر در عمق و با  $M=200 \text{ kN/m}$  و پر شده با خاک ماسه (تأثیر سربار)



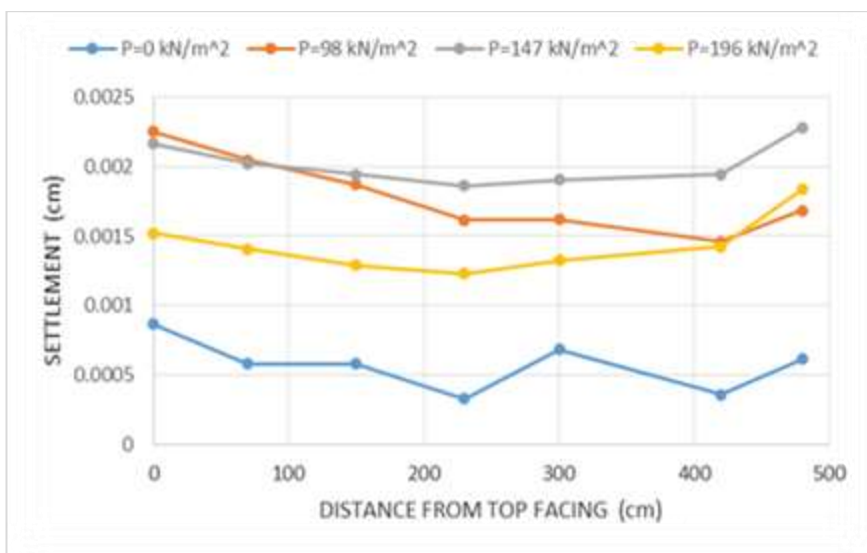
۳-۶: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای مدل های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۱/۵ متر در نما و ۴ متر در عمق و با  $M=200 \text{ kN/m}$  و پر شده با خاک شن (تأثیر سربار)



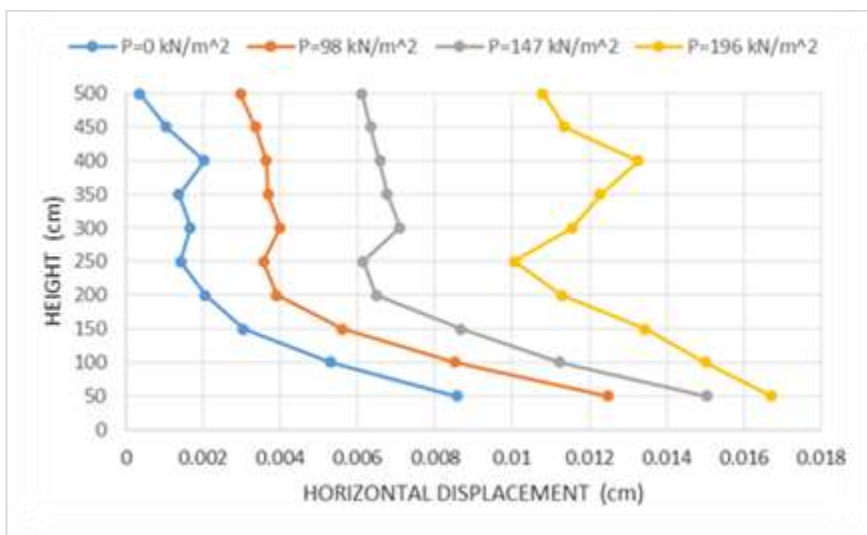
۳-۶۵: مقایسه نشست شبروانی برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۱/۵ متر در نما و ۴ متر در عمق و با  $M=200 \text{ kN/m}$  و پر شده با خاک شن (تأثیر سربار)



۳-۶۶: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۱/۵ متر در نما و ۴ متر در عمق و با  $M=500 \text{ kN/m}$  و پر شده با خاک ماسه (تأثیر سربار)

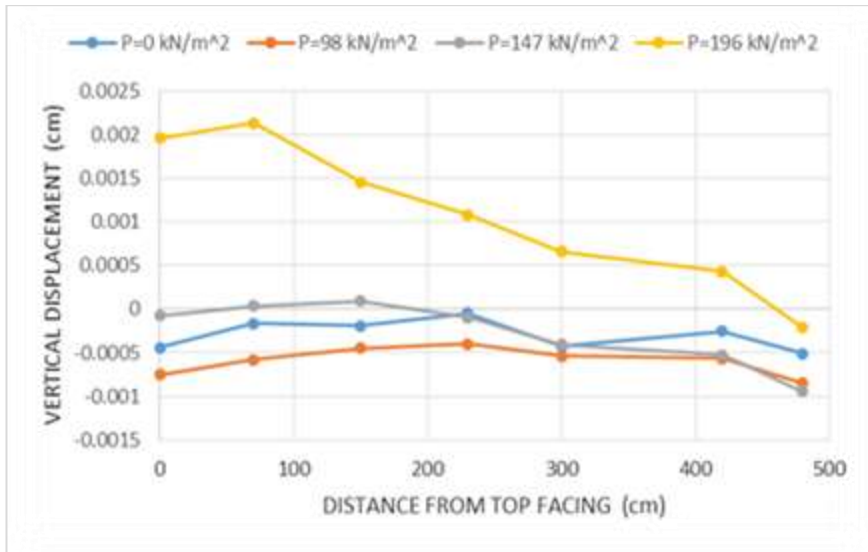


۳-۶۷: مقایسه نشست شیروانی برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۱/۵ متر در نما و ۴ متر در عمق و با  $M=500 \text{ kN/m}$  و پر شده با خاک ماسه (تأثیر سربار)



۳-۶۸: مقایسه تغییر مکان افقی نما برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۱/۵ متر در نما و ۴ متر در عمق و با  $M=500 \text{ kN/m}$  و پر شده با خاک شن (تأثیر سربار)





۶۹-۳: مقایسه نشست شیروانی برای مدل‌های مسلح شده در نما با لایه ژئوسل به طول ۱/۵ متر در نما و ۴ متر در عمق و با  $M=500 \text{ kN/m}$  و پر شده با خاک شن (تأثیر سربار)



## فصل چهارم: جمع بندی

### ۴-۱ مقدمه

۱- با افزایش جمعیت و توسعه ساخت و ساز، با کمبود زمین‌های مقاوم جهت احداث سازه‌های مورد نظر مواجه می‌باشیم. لذا جهت ساخت و ساز ایمن، نیاز به مقاوم سازی خاک‌ها می‌باشد. یکی از روش‌های مناسب جهت مقاوم سازی خاک‌ها، تسلیح خاک با ژئوسینتتیک‌ها می‌باشد. در چند دهه اخیر، پیشرفت قابل ملاحظه‌ای در زمینه ژئوسینتتیک‌ها و کاربردهایشان صورت گرفته است. بطوری که این مصالح پلیمری اکنون از مصالح اصلی در مهندسی عمران به حساب آمده و مانند مصالحی چون فولاد و بتن جایگاه خاص خود را پیدا کرده‌اند و بسیاری از سازه‌های ژئوتکنیکی نظیر پی‌ها، دیوارهای حائل، خاکریزها و ... با استفاده از آن‌ها مسلح شده و به خوبی عمل کرده‌اند.

۲- پایداری شیروانی‌ها تحت بار استاتیک یا دینامیک، از مهم‌ترین مسائل در مهندسی ژئوتکنیک است. زیرا در بسیاری از موارد، سازه‌ها، راه‌ها و ... در حریم شیروانی‌ها قرار دارند و خرابی این شیب‌ها می‌تواند تلفات جانی و مالی فراوانی به وجود آورد. از این رو مهندسان ژئوتکنیک همواره به دنبال راه‌هایی برای افزایش پایداری این شیب‌ها بوده‌اند. برای پایدارسازی شیروانی‌ها، از مسلح کننده‌ها استفاده می‌شود. امروزه مسلح کننده‌های پلیمری با توجه به مزایایی که نسبت به مسلح کننده‌های فلزی دارند، مقبولیت و کاربرد بیشتری در پروژه‌ها دارند. از سوی دیگر اغلب این مسلح کننده‌های پلیمری، دارای هندسه و عملکرد صفحه‌ای هستند، اما نسل جدید این مسلح کننده‌ها، ژئوسل می‌باشد که هندسه و عملکرد سه بعدی دارد. به طوری که برای خاک داخل خود، تنش همه جانبه ایجاد می‌کند که منجر به کارایی بیشتری می‌گردد. از سوی دیگر استفاده از ژئوسل در نمای شیب‌ها، زیبایی بصری دارد که بر محبوبیت آن بین مهندسان افزوده است. تا کنون اغلب پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، در مورد پایداری شیروانی‌های مسلح تحت بارهای استاتیکی است و بارهای دینامیکی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. در این پروژه، پایداری دینامیکی شیروانی

مسلح با ژئوسل بررسی می‌گردد. به این مفهوم که، با اعمال موج برشی به شیروانی مسلح به ژئوسل، پایداری آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳- برای اعمال زلزله، از بخشی از شتاب نگاشت زلزله کوبه برای مدل‌سازی استفاده شده است. برای اعمال زلزله در مدل، مولفه افقی شمال-جنوب زلزله به تاریخچه تغییرمکان افقی تبدیل شده و سپس به عنوان تغییرمکان پیش فرض تعریف شده به کف مدل اعمال شد. این روشی است که در راهنمای برنامه پلکسیس جهت اعمال شتاب‌نگاشت‌ها به مدل تعریف شده است. (با توجه به اینکه در حضور سنگ بستر، مولفه قائم زلزله، بی تأثیر می‌شود، این مولفه به مدل اعمال نشد.) تبدیل شتاب‌نگاشت‌ها به تغییرمکان با استفاده از نرم‌افزار رایج سائسموسیگنال انجام گرفته است.

#### ۴-۲ جمع بندی و نتیجه گیری

با توجه به مطالعات پارامتریک انجام شده در فصل سوم این کتاب، می‌توان نتایج زیر را در مورد تحلیل لرزه‌ای شیروانی مسلح به ژئوسل، حاصل نمود:

(۱) بیشترین مقدار تغییرشکل افقی دیواره شیب در نیمه پایینی شیروانی به وقوع می‌پیوندد.

(۲) نشست در لبه شیب زیاد بوده و در نقطه اتمام لایه ژئوسل ناگهان افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد.

(۳) هرچه جنس ژئوسل قوی‌تر باشد (مدول سکانت بالاتر)، تسلیح سه بعدی بهتر عمل می‌کند، گرچه استفاده از ژئوسل قوی‌تر از منظر مالی نیز مهم است و در توجیه اقتصادی پروژه باید در نظر گرفته شود.

(۴) هرچه خاک داخل ژئوسل دانه‌ای‌تر باشد، عملکرد لایه تسلیح سه بعدی بهتر است.

(۵) با افزایش طول لایه تسلیح سه بعدی، جابجایی افقی و نشست کاهش می‌یابد. البته این تأثیر مثبت، باید در مقایسه با مازاد هزینه استفاده از لایه‌های مسلح کننده طویل‌تر قرار گیرد و دارای توجیه اقتصادی باشد.

(۶) اعمال سربار روی سطح شیروانی باعث افزایش مقدار تغییرشکل افقی و نشست شده و اثر منفی بر روی عملکرد شیروانی می‌گذارد. شایان ذکر است که در حالت بارگذاری در تعدادی از مدل‌ها علاوه بر نشست در برخی از نقاط سطح شیب، برخی از نقاط نیز دچار بلند شدگی می‌شوند.

## مراجع

۱. فخاریان، کاظم، مجتهدی، محمد علی، " ژئوسینتتیک‌ها: معرفی، کاربرد و وضعیت آن‌ها در جهان و ایران." نخستین کنفرانس بهسازی زمین، تهران، ۱۳۸۰
۲. شفابخش، غلامعلی، حداد، عبدالحسن، اکبری، مهدی، " بررسی مشخصات انواع ژئوسینتتیک‌ها با کارکرد زهکش در پروژه‌های عمرانی." چهاردهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، تهران، ۱۳۸۷.
۳. غفاریپور، سعید، جهرمی، شیماء، " بررسی عددی عوامل تأثیرگذار بر ظرفیت باربری خاک‌های دانه‌ای مسلح شده با ژئوسل." نهمین سمپوزیم پیشرفت‌های تکنولوژی، مشهد، ۱۳۹۳.
۴. عامل سخی، مسعود، منافی، سیاوش، " بررسی استاتیکی و شبه استاتیکی شیروانی‌های مسلح شده با ژئوفابریک." نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ۴۳، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۲.
۵. عنایتی، میلاد، قضاوی، محمود، " بررسی زاویه اصطکاک خاک مسلح در رفتار لرزه‌ای کوله‌های مسلح شده با ژئوسل با وجود عرشه." اولین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، پاییز ۱۳۹۳.
6. De Garidel, R., and Morel, G. (1986). "New soil strengthening techniques by textile elements for low-volume roads." The third International Conference on Geotextiles, Vienna, Austria, 1027-1032.
7. Wesseloo, J. (2004). "The strength and stiffness of geocell support packs." Ph.D. Dissertation, University of Pretoria, Pretoria, South Africa.
8. Rea, M. and Mitchell, J. K. (1978). "Sand reinforcement using paper grid cells." Regular meeting, Rocky Mountain Coal Mining Institute, 644-663.
9. Bathurst, R.J., and Knight, M. A. (1998). "Analysis of Geocell Reinforced-Soil Covers over large Span Conduits." Computers and Geotechnics, 22, 205-219.
10. Rajagopal, K., Krishnaswamy, N. R., and Latha, G. M. (1999). "Behavior of sand confined with single and multiple geocells." Geotextiles and Geomembranes, 17, 171-184.
11. Henkel, D. J., and Gilbert, G. D. (1952). "The effect of the rubber membrane on the measured triaxial compression strength of clay samples." Geotechnique, 3(1), 20-29.
12. Rajagopal, K., Krishnaswamy, N. R., and Madhavi Latha, G. (2001). "Finite element analysis of embankments supported on geocell layer using composite model." Computer methods and advances in geomechanics, C. S. Desai, T.

- Kundu, S. Harpalani, D. Contractor, and J. Kemeny, eds., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1251-1254.
13. Madhavi Latha, G., and Rajagopal, K. (2007). "Parametric finite element analyses of geocell-supported embankment." *Canadian Geotechnical Journal*, 44(8), 917-927.
  14. Madhavi Latha, G., Dash, S. K., and Rajagopal, K. (2008). "Equivalent continuum simulations of geocell reinforced sand beds supporting strip Footings." *Geotechnical and Geological Engineering*, 26, 387-398.
  15. Mehdipour, I., Ghazavi, M., and Ziaie Moaye, R. (2013). "Numerical study on stability analysis of geocell reinforced slopes by considering the bending effect." *Geotechnical and Geological Engineering*, 37, 23-34.
  16. Leshchinski, D., Wan, J., Mohri, Y., and Rosen, A. (2009). "Equivalent seismic coefficient in geocell retention systems." *Geotextiles and Geomembrane*, 26, 9-18.
  17. Ling, H., Leshchinsky, D., Wan, J., Mohri, Y., and Rosen, A. (2009). "Seismic Response of Geocell Retaining Walls: Experimental Studies." *ASCE*, 135, 515-534.
  18. Duncan, J. M., Byrne, P., Wong, K. S., and Mabry, P. (1980). "Strength, Stress-Strain and Bulk Modulus Parameters for Finite Element Analysis of Stresses and Movements in Soil Masses." *Geotechnical Engineering Report No. UCB/GT/80-01*, University of California, Berkeley.
  19. Kramer, S. L. (1996). "Geotechnical earthquake engineering." Prentice-Hall, New Jersey, USA.