

تعیین ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی خاک درشت‌دانه‌ی محصورکننده‌ی ژئوگرید و مهار - شبکه در خاک چسبنده

نازنین سه‌رای (دانشجوی کارشناسی ارشد)

نادر هاتف* (استاد)

بخش راه ساختمان و محیط زیست، دانشگاه شیراز

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۳ (ص. ۸۹-۹۸، یادداشت شنی)
دروی ۲-۳، شماره ۱/۱، ص. ۸۹-۹۸، یادداشت شنی

در اجرای یک سازه‌ی خاک مسلح، برای بالا بردن راندمان مسلح‌کننده‌ها، معمولاً از خاک‌های درشت‌دانه استفاده می‌شود. خاک‌های درشت‌دانه به علت ویژگی‌های ذاتی که دارند با چشمه‌های مسلح‌کننده بهتر درگیر می‌شوند، اما عموماً از محل قرضه به محل اجرای پروژه منتقل شده و از این جهت تهیه‌ی آنها پرهزینه است. به همین دلیل در این تحقیق سعی شده است که فقط لایه‌ی خاک درشت‌دانه در اطراف مسلح‌کننده استفاده شود و حجم باقیمانده با خاک محل یا خاک ریزدانه جایگزین شود. در این نوشتار، نتایج آزمایش‌های بیرون‌کشش^۱ که بر روی ژئوگرید معمولی و مسلح‌کننده‌ی مهار-شبکه^۲ انجام شده‌اند، ارائه شده است و با مقایسه‌ی نتایج این آزمایش‌ها، ضخامت تقریبی بهینه برای لایه‌ی خاک درشت‌دانه‌ی اطراف مسلح‌کننده به دست آمده است. در نهایت، نتایج تحلیل عددی، با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود Plaxis ۳D Tunnel، از طریق مقایسه با نتایج تحلیل آزمایشگاهی به تأیید رسیده‌اند.

واژگان کلیدی: آزمایش بیرون‌کشش، ژئوگرید، مهار-شبکه، خاک ریزدانه، خاک درشت‌دانه، ضخامت بهینه، نرم‌افزار اجزاء محدود Plaxis ۳D Tunnel.

۱. مقدمه

در سازه‌های خاک مسلح هستند. این خاک‌ها در محدوده‌ی که سازه‌های خاک مسلح بارگذاری می‌شوند، به صورت مصالح کشسان عمل می‌کنند. عیب خاک‌های غیرچسبنده فقط این است که این خاک‌ها معمولاً مصالحی تهیه‌شده از محل قرضه هستند، و بنابراین ممکن است جهت اجرای پروژه‌ی مورد نظر پرهزینه باشند. از طرف دیگر، خاک‌های چسبنده برای ساختن سازه‌های خاک مسلح مناسب نیستند. رفتار این خاک‌ها به صورت خمیری یا کشسان خمیری است. مسلح‌کننده‌هایی که در خاک‌های چسبنده تحت اثر تنش زیادی واقع می‌شوند، ممکن است مستعد خزش و تحت صدمه‌ی بیشتر در اثر خوردگی باشند. مهم‌ترین مزیت خاک‌های چسبنده در دسترس بودن آنهاست، لذا این مصالح مقرون به صرفه هستند.^[۱]

در رابطه با عوامل مؤثر و نیز رفتار مسلح‌کننده‌هایی از نوع ژئوسنتتیک در حین بیرون‌کشش، تاکنون پژوهشگران مختلفی مطالعات آزمایشگاهی و عددی بسیاری انجام داده‌اند. در سال ۱۹۹۳ بر روی ژئوگرید Tensar که در خاک ماسه‌ی قرار داده شده است، آزمایش‌های بیرون‌کشش انجام شد. یکی از اهداف این مطالعه، بررسی تأثیر ضخامت خاک ماسه‌ی اطراف ژئوگرید در تغییرات مقاومت بیرون‌کشش آنها بود. پژوهشگران معتقدند که شرایط مرزی (صلب و انعطاف‌پذیر بودن مرزها) از طریق ضخامت خاک، تأثیر مستقیمی در افزایش یا کاهش مقدار این مقاومت دارد.^[۲]

دو مؤلفه‌ی مهم برای هر سازه‌ی خاک مسلح عبارت‌اند از: خاک و عنصر مسلح‌کننده. خاک، بیشترین حجم یک سازه‌ی خاک مسلح را تشکیل می‌دهد. براساس یک قانون کلی تقریباً همیشه امکان ساخت یک سازه‌ی خاک مسلح حتی با استفاده از خاکی که در محل موجود است یا با استفاده از خاکی که از نزدیکی محل جمع‌آوری شده است، وجود دارد. اما لازم است بدانیم آیا خاک مورد استفاده برای ساخت سازه‌ی خاک مسلح، مناسب است یا خیر؟ به همین منظور، انتخاب خاک با در نظر گرفتن پارامترهایی مثل نوع سازه، پایداری طولانی‌مدت سازه‌ی ساخته‌شده، پایداری کوتاه‌مدت (در حین ساخت)، خصوصیات فیزیکی-شیمیایی مصالح و هزینه‌ی کار صورت می‌گیرد. پایداری سازه‌ی خاک مسلح بستگی به بسیج مناسب اصطکاک بین خاک و مسلح‌کننده دارد. اصطکاک‌کی که در این حالت بسیج می‌شود، تابعی از خصوصیات خاک و مسلح‌کننده است. خصوصیات مصالح پرکننده که بر اصطکاک بین خاک و مسلح‌کننده تأثیر می‌گذارند، عبارت‌اند از: چگالی، دانه‌بندی، درصد رطوبت، شکل و اندازه‌ی ذرات. خاک‌های غیرچسبنده با حدی از تراکم که منجر به انبساط حجمی آنها در حین آزمایش برش می‌شود، خاک‌های مناسب و ایده‌آلی برای استفاده

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۹/۲۶، اصلاحیه ۱۲/۱۶/۱۳۹۱، پذیرش ۱۳۹۱/۰۷/۲۲.

پژوهشگران دیگری در زمینه‌ی جایگزینی مصالح درشت‌دانه و صرفه‌جویی در هزینه‌های پروژه، به مطالعات آزمایشگاهی (۲۰۰۲) پرداختند. آنها با جایگزینی مصالح بازیافتی به جای مصالح سنگی طبیعی در حالت مسلح و غیرمسلح، آزمایش‌های برش مستقیم را به منظور بررسی پارامترهای مقاومتی این مصالح انجام دادند. مصالح بازیافتی مورد استفاده در پژوهش‌های آنها شامل نخاله‌های ساختمانی، بتن خردشده، و نخاله‌های معدنی بود. نتایج پژوهش‌ها نشان داد که مصالح بازیافتی نسبت به سنگ‌های شکسته‌ی معمولی مقاومت برشی بسیار کمتری دارند، ولی تسلیخ خاک در این خصوص حتی باعث افزایش ۵۰ درصدی مقاومت برشی مصالح درشت‌دانه‌ی مصرفی شده است.^[۴]

در سال ۲۰۰۸ نیز بر روی ژئوگرید Netlon با چشمه‌های شش ضلعی و مسلح‌کننده‌ی مهار - شبکه (ساخته‌شده از ژئوگرید) مطالعات تجربی انجام شد. هدف از این پژوهش، در واقع بررسی رفتار مسلح‌کننده‌ی ابداعی (مهار - شبکه) با نسبت‌های مختلف تعداد مهار در واحد سطح ژئوگرید در خاک ماسه‌یی از نوع SW بود. نتایج آزمایش‌های بیرون‌کشش در این پژوهش، برتری مسلح‌کننده‌ی مهار - شبکه را نسبت به ژئوگریدی که از آن ساخته شده بود، نشان می‌داد.^[۵]

همچنین در سال ۲۰۰۸ مطالعات آزمایشگاهی بر روی دو نوع مسلح‌کننده، ژئوگرید Netlon CE۱۳۱ (با چشمه‌های شش ضلعی) و مهار - شبکه‌ی ساخته‌شده از این ژئوگرید در تنش‌های سربار ۸ و ۱۸ کیلوپاسکال و در خاک ماسه‌یی SW انجام شد. هدف از انجام این آزمایش‌ها، در واقع مقایسه‌ی مقاومت بیرون‌کشش این دو نوع مسلح‌کننده با هم و در تنش‌های سربار مذکور بوده است. نتایج مطالعات در این پژوهش نشان داد که مسلح‌کننده‌ی مهار - شبکه، تحت شرایط یکسانی با ژئوگرید معمولی، مقاومت بیرون‌کشش بیشتری از خود بروز می‌دهد، این در حالی است که این مسلح‌کننده برای رسیدن به مقاومت نهایی خود، جابه‌جایی کمتری نسبت به ژئوگرید معمولی، در نقطه‌ی نزدیک به اعمال بار، دارد. به علاوه، مسلح‌کننده‌ی مهار - شبکه رفتار سخت‌تری را نسبت به ژئوگرید معمولی از خود بروز می‌دهد و این به دلیل ظرفیت بالا و توانایی آن در بسیج‌شدن مقاومت بیرون‌کشش در جابه‌جایی‌های کمتر است. این افزایش ظرفیت در مسلح‌کننده‌ی مهار - شبکه به علت مکانیزم مقاومت فعال مهارهاست.^[۵]

در سال ۲۰۰۸ نیز پژوهش‌هایی در رابطه با رفتار بیرون‌کشش ژئوگرید مدفون در رس سرخ انجام شد. نتایج بیانگر این مسئله بود که در این حالت، ژئوگرید دچار گسیختگی بیرون‌کشش می‌شود و مقاومت نهایی آن در برابر میزان رطوبت خاک حساس است، به طوری که در ابتدا با افزایش درصد رطوبت خاک کاهش پیدا می‌کند و سپس با رسیدن درصد رطوبت به رطوبت حد خمیری خاک، یعنی هنگامی که نیروی بیرون‌کشش نهایی مستقل از فشار نرمال می‌شود، به یک مقدار ثابت میل می‌کند.^[۶]

در سال ۲۰۰۹ هم در حین بررسی اثر محصورکردن ژئوگرید در یک پائل ساندویچی با خاک ماسه‌یی SW، اثر این پائل بر افزایش مقاومت خاک رس بررسی شد. این اثر با استفاده از آزمایش برش مستقیم بر روی ژئوگریدها، در ضخامت‌های ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ میلی‌متر خاک ماسه‌یی دربرگیرنده‌ی ژئوگرید مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، ضخامت ۱۰ میلی‌متر خاک ماسه‌یی اطراف ژئوگرید، مقاومت برشی خاک مسلح را بیشتر از سایر ضخامت‌ها افزایش می‌دهد. تعیین این ضخامت بهینه، با توجه به نتایج مطالعات، مستقل از تنش سربار است.^[۷]

در سال ۲۰۱۱ نیز مطالعات آزمایشگاهی بر روی لایه‌یی از خاک ماسه‌یی

مسلح‌شده با ژئوگرید که در خاک رسی مدفون شده بود، انجام شد. این مطالعات بر مبنای آزمایش‌های بیرون‌کشش بر روی ژئوگرید انجام شده است. در این مطالعات، دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس به قصد انجام آزمایش‌های بیرون‌کشش اصلاح و آزمایش‌های مذکور با استفاده از آن انجام شد. ضخامت لایه‌ی ماسه‌یی مورد آزمایش در این مطالعات برابر با ۶، ۱۰ و ۱۴ میلی‌متر بوده است. نتایج این آزمایش‌ها حاکی از آن بود که محصورکردن ژئوگرید در لایه‌یی از خاک ماسه‌یی می‌تواند مقاومت بیرون‌کشش خاک رس مسلح‌شده را افزایش دهد. همچنین با استناد به نتایج آزمایش‌های بیرون‌کشش این پژوهشگران، ضخامت ۱۰ میلی‌متر خاک ماسه‌یی به‌عنوان ضخامت بهینه برای خاک ماسه‌یی اطراف ژئوگرید به دلیل بیشتربودن مقاومت بیرون‌کشش آن نسبت به سایر ضخامت‌ها در نظر گرفته شده است. این ضخامت بهینه در همه‌ی فشارهای سربار نتیجه داده است.^[۹]

با توجه به مطالعات پیشین، که در رابطه با مسلح‌کننده‌ها وجود دارد، کمبود مطالعات تجربی در زمینه‌ی آزمایش بیرون‌کشش، که در جهت تعیین ضخامت بهینه برای خاک درشت‌دانه‌ی اطراف مسلح‌کننده باشد، دیده می‌شود. به همین دلیل مطالعات تجربی این تحقیق بر مبنای بررسی ضخامت‌های مختلف خاک درشت‌دانه‌ی اطراف مسلح‌کننده قرار داده شده است. در واقع، هدف این است که با تحلیل نتایج این آزمایش‌ها، تأثیر ضخامت‌های مختلف خاک غیرچسبیده بر روی مقاومت بیرون‌کشش دو نوع مسلح‌کننده بررسی و مقایسه شود و در نهایت ضخامت مناسبی برای خاک درشت‌دانه‌ی اطراف مسلح‌کننده تعیین شود، طوری که از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه باشد. به علاوه، مقایسه‌ی نتایج تجربی و عددی، که در این تحقیق به کمک نرم‌افزار اجزای محدود Plaxis ۳D Tunnel انجام شده است، راهکار مناسبی برای به تأییدرسانیدن نتایج عددی به کمک نتایج تجربی است.

۲. مواد و مصالح مورد استفاده

۱.۲. مصالح خاکی

مصالح خاکی مورد استفاده در آزمایش‌های مربوط به این تحقیق، دو نوع ریزدانه و درشت‌دانه است. خاک ریزدانه‌ی مورد استفاده از نوع CL با زاویه‌ی اصطکاک داخلی ۲۸ درجه و مقدار چسبندگی کم است (مقادیر مذکور از آزمایش برش مستقیم به‌دست آمده است) و خاک درشت‌دانه از نوع SW با زاویه‌ی اصطکاک داخلی ۴۳ درجه است. میزان تراکم نسبی لایه‌ی درشت‌دانه در تمامی نمونه‌ها حدوداً ۸۲٫۸٪ است. خاک ریزدانه‌ی مورد استفاده در این آزمایش‌ها پس از پهن‌کردن و خشک‌کردن به کمک چکشی پلاستیکی کوبیده و سپس از الک نمره‌ی ۱۰ عبور داده شده است تا حالت یکنواختی در تمامی آزمایش‌ها داشته باشد. در آزمایش‌های انجام شده، خاک به‌صورت خشک مورد استفاده قرار گرفته و رطوبت آن به‌عنوان یک پارامتر متغیر مورد بررسی قرار نگرفته است. میزان تراکم نسبی لایه‌ی ریزدانه در تمامی نمونه‌ها حدوداً ۶۵٫۸٪ است. نمودار دانه‌بندی هر دو نوع خاک در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲.۲. مشخصات ژئوگرید و مهار - شبکه‌ی مورد استفاده

مسلح‌کننده‌های مورد استفاده در این تحقیق عبارت‌اند از:

۱. ژئوگرید Netlon دو محوره با نام تجاری CE۱۳۱ (شکل ۲)، که مشخصات



شکل ۳. مهار-شبكة.

جدول ۲. مشخصات مهار-شبكة.

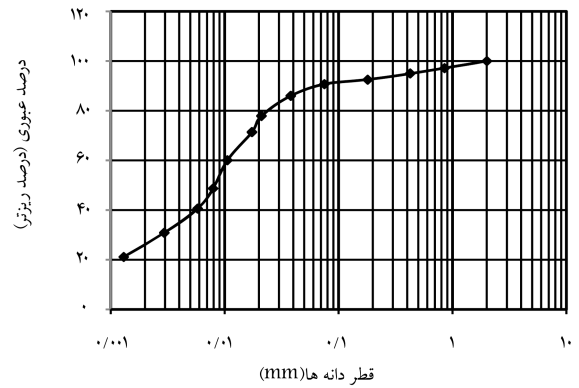
مقدار	ویژگی
۰/۱۸	سختی محوری مهارها (KN)
۳۰	طول مهارها (mm)
۱/۱	ضخامت مهارها (mm)

مذکور شامل یک عدد المان مکعب شکل از جنس پلاستیک فشرده‌اند که هر یک توسط بست کمربندی، از جنس نوعی پلیمر با مقاومت کششی مناسب، در نقاطی که به فواصل ۱۵ و ۳۰ سانتیمتر از نقطه‌ی ابتدایی ژئوگرید قرار دارند، مطابق شکل ۳، به ژئوگرید متصل شده‌اند. بست‌های مورد استفاده قادر به اتصال المان‌ها تحت هر زاویه‌ی هستند که در این پژوهش با زاویه‌ی ۴۵ درجه نسبت به راستای افق به ژئوگرید متصل شده‌اند. ژئوگرید CE۱۳۱ دارای فضاهای خالی شش‌وجهی است و بست‌های مذکور دقیقاً در دو سوی محل اتصال اعضای طولی و عرضی در هر حفره قرار می‌گیرند، که این عمل پایداری بهتر مهار را حین اعمال بار موجب می‌شود. شایان ذکر است که مقاومت کششی بست‌ها تأثیری در مقاومت بیرون‌کشش مسلح‌کننده ندارد و فقط قرارگرفتن المان‌های مکعبی در حالت فعال ۳ افزایش مقاومت بیرون‌کشش را موجب می‌شود.^[۱۰] ویژگی‌های مهار- شبکه در جدول ۲ ذکر شده است.

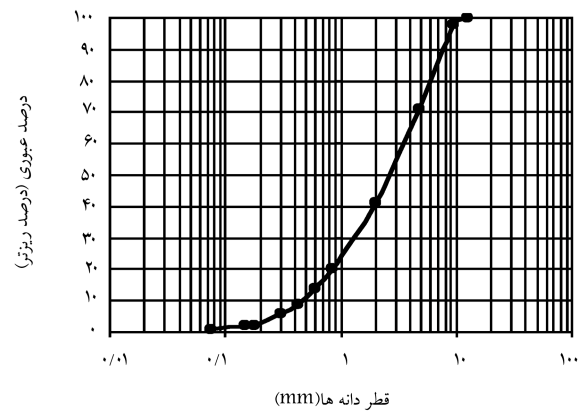
۳. مشخصات دستگاه آزمایش

دستگاه مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۴ نشان داده شده است. این دستگاه مطابق توصیه‌های Palmeira در سال ۱۹۸۹ و Hayashi در سال ۱۹۹۶ و نیز بر طبق استاندارد ASTM، قبلاً به منظور انجام مطالعات دیگری بر روی همین دو مسلح‌کننده، در دانشگاه شیراز ساخته شده بود.^[۱۰] البته در مطالعات پیشین از دستگاه‌هایی با ابعاد و اندازه و نیز تجهیزات مختلف جهت بررسی مقاومت بیرون‌کشش ژئوسنتتیک‌ها استفاده شده است، اما عموماً تمامی دستگاه‌های مورد استفاده از این اجزا تشکیل شده‌اند:

۱. **جعبه ۴:** در این جعبه، نمونه‌ی خاک و مسلح‌کننده‌ی مورد نظر قرار داده می‌شود و این جعبه بسته به اندازه‌ی ذرات، نوع و هندسه‌ی مسلح‌کننده‌ی مورد استفاده، ابعاد متفاوتی خواهد داشت.
۲. **جک فنری:** تأمین‌کننده‌ی نیروی کششی لازم برای بیرون‌کشیدن مسلح‌کننده که ظرفیت کششی آن ۲۰ KN است.
۳. **گیج:** وسیله‌ی سنجش میزان جابه‌جایی قسمت‌های مختلف مسلح‌کننده است و دقت اندازه‌گیری آن، صدم میلی‌متر است.

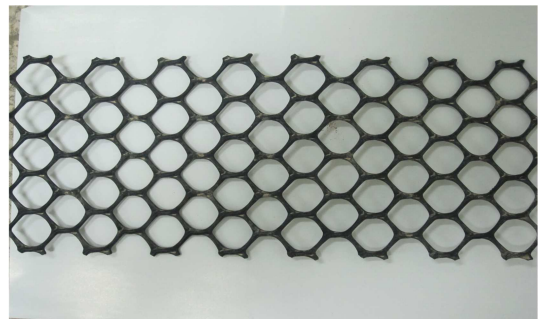


۱-الف) خاک ریزدانه؛



۱-ب) خاک درشت دانه.

شکل ۱. نمودارهای دانه‌بندی مصالح درشت دانه و ریزدانه.



شکل ۲. ژئوگرید معمولی (Netlon).

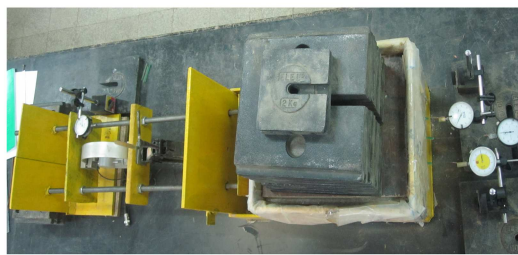
جدول ۱. مشخصات ژئوگرید معمولی.

مقدار	ویژگی
۱۱/۷	سختی کشسان EA (kN/m)
۲۷×۲۷	ابعاد حفره‌ها (mm)
۲/۲	ضخامت متوسط اعضای عرضی (mm)

هندسی و مقاومتی آن در جدول ۱ ارائه شده است. ابعاد کلیه‌ی نمونه‌های مسلح‌کننده‌ی مورد استفاده در این آزمایش به علت محدودیتی که در ابعاد دستگاه وجود دارد، ۴۰×۱۶ سانتی‌متر است.

۲. مهار- شبکه مورد استفاده در این تحقیق نوعی مسلح‌کننده‌ی ابداعی است،^[۴] که از اتصال تعدادی مهار (آنکر) به ژئوگرید معمولی به دست آمده است. مهارهای

درشت‌دانه و مابقی جعبه‌ی خاک ریزدانه، ۵ سانتی‌متر پایین و ۱۱ سانتی‌متر بالای مهار - شبکه‌ی خاک درشت‌دانه و مابقی جعبه‌ی خاک ریزدانه. آزمایش‌هایی که نتایج آنها ارائه نشده است، با خطا همراه بوده و نتایج قابل قبولی نداشته و در نتیجه حذف شده‌اند. لایه‌های ۵ سانتی‌متری خاک با اعمال ۳۶ ضربه با یک چکش چوبی به میزان کافی متراکم شده‌اند (میزان تراکم نسبی خاک ریزدانه و درشت‌دانه در بخش ۱.۲. توضیح داده شده است) (تأثیر تراکم خاک در این پژوهش به‌عنوان یک پارامتر متغیر مورد بررسی قرار نگرفته است). بار قائم اعمال‌شده به نمونه، ۵ کیلو پاسکال بوده است (این نوع ژئوگرید برای تنش‌های سربار دیگر نیز آزمایش شده است و در تنش سربار بزرگ‌تر از ۵ کیلو پاسکال، در این دستگاه، بیشتر دچار انبساط طولی زیاد می‌شود تا جابه‌جا شدن). جهت بارگذاری افقی نیز از یک جک فزری استفاده شده است، که سرعت اعمال بار افقی با این جک یک میلی‌متر در دقیقه تنظیم شده است. بار افقی با یک گیج رینگ‌ی اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری تمامی جابه‌جایی‌ها از گیج‌هایی با دقت صدم و هزارم میلی‌متر استفاده شده است. دلیل استفاده از ضخامت‌های مختلف خاک درشت‌دانه و ریزدانه در این آزمایش‌ها این است که هدف انجام این پژوهش در واقع پیدا کردن ضخامت بهینه، یک‌بار برای خاک درشت‌دانه‌ی قرارگرفته در بالای مسلح‌کننده‌ها و بار دیگر برای خاک درشت‌دانه‌ی قرارگرفته در زیر مسلح‌کننده‌ها، در شرایط آزمایشگاهی مذکور بوده است، به‌طوری که به لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه باشد. بدین ترتیب، ابتدا ضخامتی ثابت (۵ سانتی‌متر) برای خاک درشت‌دانه‌ی احاطه‌کننده‌ی بالای مسلح‌کننده‌ها در نظر گرفته شد و با انجام آزمایش‌های بیرون‌کشش بر روی مسلح‌کننده‌ها، مقدار ضخامت بهینه برای خاک درشت‌دانه‌ی قرارگرفته در زیر مسلح‌کننده‌ها، مترادف با بیشترین ظرفیت تحمل مسلح‌کننده‌ها، به‌گونه‌ی که مقرون به صرفه باشد، تعیین شد. سپس با داشتن این ضخامت، آزمایش‌های بیرون‌کشش برای ضخامت‌های ۵، ۷، ۹ و ۱۱ سانتی‌متری خاک درشت‌دانه‌ی قرارگرفته در بالای مسلح‌کننده‌ها انجام و با توجه به نتایج، ضخامتی بهینه برای لایه‌ی خاک بالای مسلح‌کننده‌ها مشخص شد.



(الف)



(ب)

شکل ۴. دستگاه آزمایش بیرون کشش.

۴. گیره‌ی مسلح‌کننده^۵: رابط بین جک و مسلح‌کننده است و باید به گونه‌ی طراحی شود که بدون هیچ‌گونه تغییرشکلی نیروی کششی را به نمونه انتقال دهد (در این دستگاه، گیره‌ی مسلح‌کننده بیرون از جعبه قرار می‌گیرد).
۵. صفحه‌ی صلبی که در بالای جعبه قرار داده شده است و تنش سربار از طریق آن به نمونه اعمال می‌شود.^[۱۰]
۶. سیم‌های فلزی سخت جهت اندازه‌گیری جابه‌جایی در طول نمونه‌ی مسلح‌کننده در فواصل ۱۴، ۲۷ و ۴۰ سانتی‌متر از ابتدای آن.

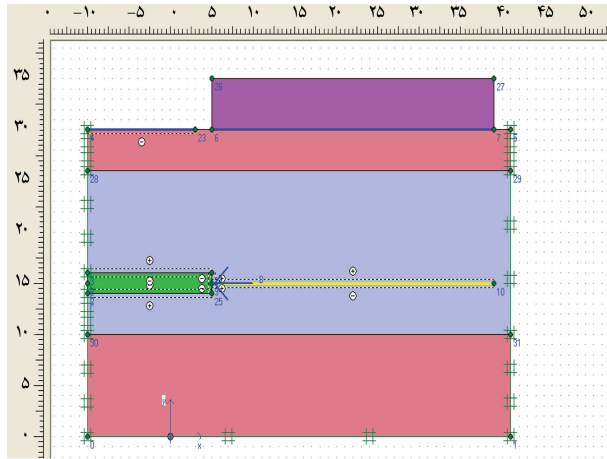
۴. روش انجام آزمایش

در این تحقیق حدود ۳۳ آزمایش انجام شده است که از این تعداد ۱۹ آزمایش بر روی ژئوگرید معمولی و ۱۴ آزمایش بر روی مهار- شبکه‌ی محصورشده در ضخامت‌های متفاوتی از خاک ماسه‌ی پی بوده است. برای مسلح‌کننده‌ی ژئوگرید معمولی، این حالت‌ها در نظر گرفته شده است: کل جعبه‌ی خاک درشت‌دانه، کل جعبه‌ی خاک ریزدانه، ۳ سانتی‌متر پایین و ۵ سانتی‌متر بالای ژئوگرید خاک درشت‌دانه و مابقی جعبه‌ی خاک ریزدانه، ۵ سانتی‌متر پایین و ۵ سانتی‌متر بالای ژئوگرید خاک درشت‌دانه و مابقی جعبه‌ی خاک ریزدانه، ۷ سانتی‌متر پایین و ۵ سانتی‌متر بالای ژئوگرید خاک درشت‌دانه و مابقی جعبه‌ی خاک ریزدانه، ۹ سانتی‌متر بالای ژئوگرید خاک درشت‌دانه و مابقی جعبه‌ی خاک ریزدانه، ۱۱ سانتی‌متر بالای ژئوگرید خاک درشت‌دانه و مابقی جعبه‌ی خاک ریزدانه.

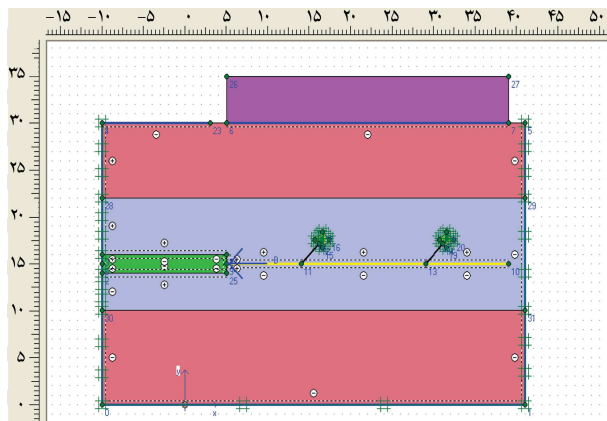
برای مسلح‌کننده‌ی مهار- شبکه، جعبه‌ی آزمایش به این حالت‌ها پر شده است: کل جعبه‌ی خاک درشت‌دانه، کل جعبه‌ی خاک ریزدانه، ۵ سانتی‌متر پایین و ۵ سانتی‌متر بالای مهار - شبکه‌ی خاک درشت‌دانه و مابقی جعبه‌ی خاک ریزدانه، ۵ سانتی‌متر پایین و ۷ سانتی‌متر بالای مهار - شبکه‌ی خاک درشت‌دانه و مابقی جعبه‌ی خاک ریزدانه، ۵ سانتی‌متر پایین و ۹ سانتی‌متر بالای مهار - شبکه‌ی خاک

۵. نحوه‌ی مدل‌سازی با نرم‌افزار Plaxis ۳D Tunnel

برای مدل‌سازی آزمایش بیرون‌کشش ابتدا باید شرایط مرزی را مطابق مدل واقعی مدل‌سازی کرد. به همین منظور ابتدا جعبه‌ی آزمایش با ابعاد ۳۵×۳۰×۳۵ سانتی‌متر، در فضای نرم‌افزار با محورهای x و y رسم شده است. شرایط مرزی که باید در این نرم‌افزار در نظر گرفته شود تا مدل نرم‌افزاری با مدل واقعی مطابقت نزدیکی داشته باشد، عبارت است از صفحات^۶ به ضخامت ۵ سانتی‌متر با صلبیت بالا در سه طرف مدل جعبه به جای صفحات واقعی (که البته اگر حرکت مرزهای جعبه در ۳ جهت با استفاده از ابزار Total Fixities که در منوی Load موجود است، محدود شود؛ نیازی به استفاده از این صفحات نیست)، یک صفحه به ضخامت ۵ سانتی‌متر و با صلبیت بالا که بر روی خاک قرار می‌گیرد. تنش سرباری که بر خاک وارد می‌شود باید دقیقاً معادل با تنش سربار ۵ کیلو پاسکالی باشد که در آزمایشگاه بر خاک وارد شده است، که جهت مدل‌سازی آن از یک خاک با ارتفاع ۵ سانتی‌متر و وزن مخصوص 100 kN/m^3 بر روی صفحه‌ی مدل‌شده بر روی خاک، در مدل نرم‌افزاری استفاده شده است (برای مدل‌کردن این صفحه نباید کل سطح خاک پوشش داده شود، زیرا در این صورت بار به کلیه‌ی اجزای جعبه وارد می‌شود که این با مدل واقعی مغایرت خواهد داشت). به علاوه، برای حد فاصل



شکل ۵. مدل ژئوگرید در ۱۱ سانتی متر خاک بالا و ۵ سانتی متر خاک پایین.



شکل ۶. مدل مهار - شبکه در ۷ سانتی متر خاک بالا و ۵ سانتی متر خاک پایین.

۶. نتایج به دست آمده از تحلیل آزمایشگاهی

در این پژوهش، ابتدا ۹ آزمایش بر روی ژئوگرید معمولی انجام شد که در آنها ضخامت لایه‌ی خاک درشت‌دانه‌ی بالایی ژئوگرید به طور ثابت و برابر ۵ سانتی متر قرار داده شد و ضخامت لایه‌ی پایینی آن به ترتیب برابر ۳، ۵ و ۷ سانتی متر تغییر داده شد تا ابتدا ضخامت بهینه‌ی برای لایه‌ی پایین ژئوگرید تعیین شود. ضخامت‌های در نظر گرفته شده در آزمایشگاه به صورت کمیته بود و در واقعیت با توجه به دانه‌بندی و امکانات اجرایی می‌تواند تعیین شود. نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نیروی بیرون‌کشش وقتی ضخامت لایه‌ی پایینی خاک درشت‌دانه ۵ سانتی متر است، تقریباً حد واسط نیروی متناظر دو ضخامت دیگر است. به علاوه با توجه به شکل ۷، مقادیر به دست آمده بین دو مقدار بیشینه (وقتی جعبه کاملاً با خاک ریزدانه پر شود) قرار دارند.

با وجود اینکه مقاومت ژئوگرید در ضخامت ۳ سانتی متری تفاوت چندانی با ضخامت ۵ سانتی متری ندارد، اما ترجیح بر این است که ضخامتی برای برگردن حجم خاک پایین مسلح‌کننده در این سیستم در نظر گرفته شود که نسبت به ضخامت خاک درشت‌دانه‌ی بالای ژئوگرید آنقدر کم نباشد، طوری که خاک پایین ژئوگرید مثل یک غشای نازک عمل کند و ژئوگرید به راحتی روی آن بلغزد و پارامترهای مقاومتی سطح مشترک خاک - ژئوگرید مؤثر واقع نشوند. همچنین علت اینکه ضخامت ۷

کلیه‌ی سطوح متفاوت در تماس با خاک از جمله کلیه‌ی صفحات، ژئوگرید و غیره باید المان فصل مشترک تعریف کرد.

برای مدل‌کردن مهار - شبکه از ژئوگرید و برای مدل‌کردن مهارها از ابزار "node anchor" to node استفاده شده است. در فواصل ۱۵ و ۳۰ سانتی متری از ابتدای ژئوگرید این مهارها با زاویه‌ی ۴۵ درجه نسبت به راستای افق قرار داده شده‌اند. به منظور مدل‌سازی المان‌های مکعب‌شکلی که به مهارها متصل‌اند، از یک هندسه‌ی مکعب‌شکل استفاده شده است که حرکت محیط آن با گزینه‌ی Total Fixities مقید شده است. به منظور مدل‌سازی جنس پلاستیک فشرده مانند این المان‌ها، داخل محیط مقیدشده‌ی آنها در نرم‌افزار، با خاکی دارای مدول کشسانی زیادی پر شده است. نحوه‌ی مش‌بندی به صورت درشت انجام شده است.

به منظور مدل‌کردن مناسب نیروی بیرون‌کشش، مدل‌های مختلفی با انواع شرایط بارگذاری ساخته شد. در این مدل‌ها پس از انجام محاسبات با این نرم‌افزار، نتیجه‌ی نهایی با آنچه که قابل انتظار بود هر یک به دلایلی مغایرت داشت. البته علت این مغایرت کاملاً قابل فهم و قابل توضیح است. از آنجا که در این پژوهش رفتار ژئوگرید و مهار - شبکه حین بیرون‌کشیدگی مدنظر است، بنابراین به منظور مدل‌سازی هر چه بهتر رفتار این مسلح‌کننده‌ها از Load system A جهت مدل‌سازی نیروی بیرون‌کشش استفاده شده است. برای مدل‌سازی دقیق‌تر خاک، وزن حجمی هر دو نوع خاک ریزدانه و درشت‌دانه‌ی مترادف با تراکم خاک در مدل آزمایشگاهی استفاده شده است.

مقدار پارامترهایی که در این نرم‌افزار برای مدل‌سازی انواع المان‌ها از جمله: خاک درشت‌دانه و ریزدانه، ژئوگرید، و مهارها به کار رفته است، به طور خلاصه به این شرح است:

۱. المان‌های خاکی: پارامترهای به کار برده شده در مدل‌سازی عددی در جدول ۳ نشان داده شده است. پارامترهایی که مستقیماً از آزمایش به دست نیامده‌اند (مانند ضریب پواسون) از محدوده‌ی گزارش شده توسط صدر^[۱۰] و مصلی نژاد^[۴] و سعی و خطا به صورتی که نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمایش تطابق داشته باشند، تعیین شده‌اند. مدل به کار رفته برای خاک، از نوع موهر سکولمب است.

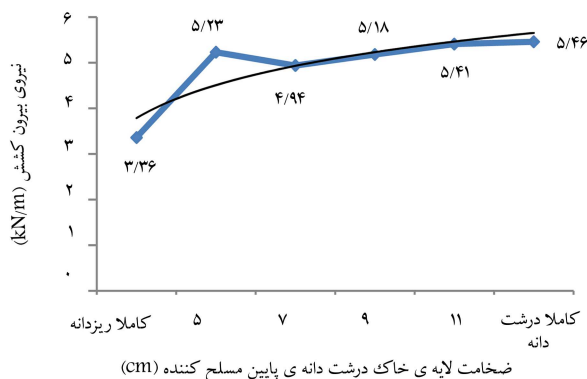
۲. ژئوگرید: $EA = 0.117 \text{ KN/cm}$.

۳. مهارها: $EA = 0.18 \text{ KN}$.

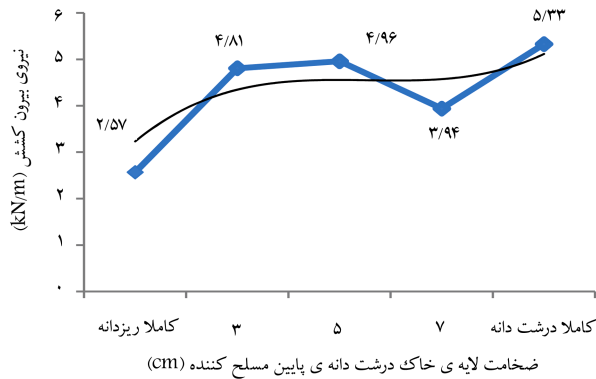
در شکل‌های ۵ و ۶ نمونه‌ی از مدل ساخته شده در این نرم‌افزار نشان داده شده است.

جدول ۳. پارامترهای خاک به کار برده شده در تحلیل عددی.

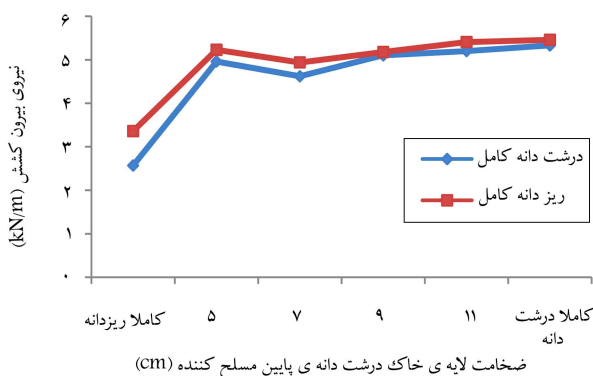
نوع خاک	خاک ریزدانه	خاک درشت‌دانه
γ_{sat} (kN/cm ³)	1.6×10^{-6}	2×10^{-6}
γ_{unsat} (kN/cm ³)	1.4×10^{-6}	1.7×10^{-6}
Ψ (degree)	۰	۱۳
φ (degree)	۲۸	۴۳
c (kN/cm ²)	1×10^{-2}	1×10^{-6}
ν	۰.۳	۰.۱
E (kN/cm ²)	۰.۹	۱
نسل مشترک R	۰.۶	۰.۳



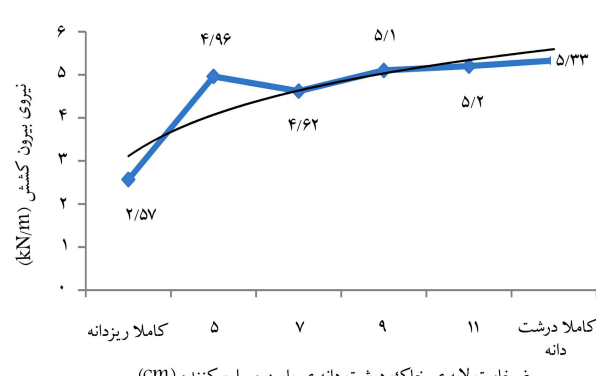
شکل ۹. نمودار نیرو - ضخامت درشت‌دانه‌ی بالای مهار - شبکه.



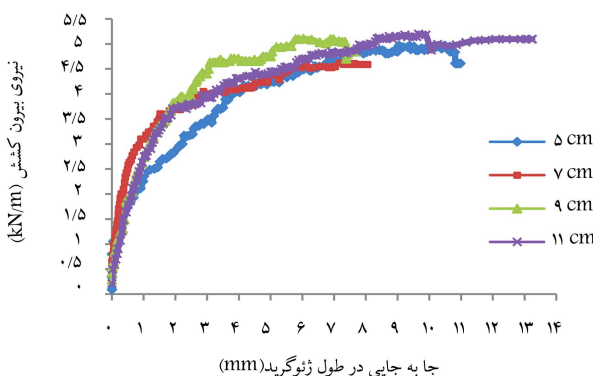
شکل ۷. نمودار نیرو - ضخامت درشت‌دانه‌ی پایین ژئوگرید.



شکل ۱۰. نمودار نیرو - ضخامت درشت‌دانه‌ی بالای ژئوگرید و مهار - شبکه.



شکل ۸. نمودار نیرو - ضخامت درشت‌دانه‌ی بالای ژئوگرید.

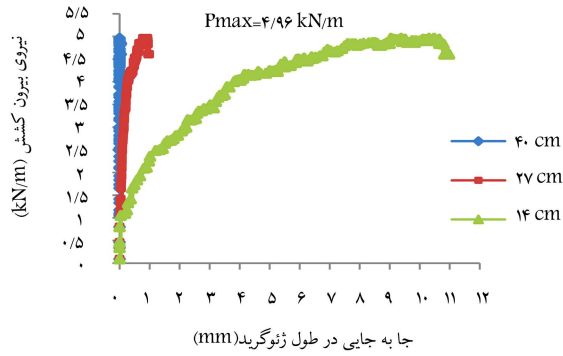


شکل ۱۱. نمودار نیرو - جابه‌جایی ضخامت‌های مختلف درشت‌دانه‌ی بالای ژئوگرید.

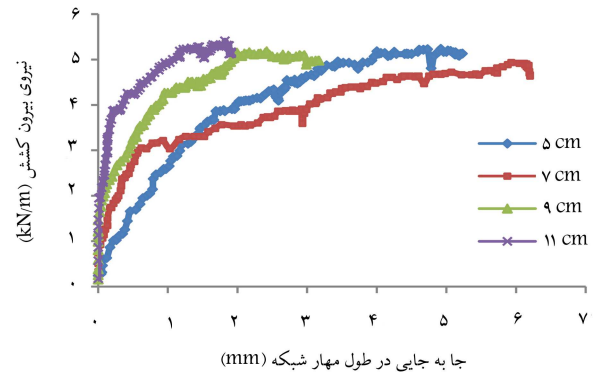
وقتی ضخامت خاک روی آنها ۵ سانتی‌متر است، با مقدار بیشینه تفاوت چندانی ندارد و از طرفی مقدار این مقاومت نسبت به خاک کاملاً ریزدانه جهش ناگهانی داشته است، بنابراین ضخامت ۵ سانتی‌متر بالا و ۵ سانتی‌متر پایین و در نهایت ضخامت ۱۰ سانتی‌متر خاک دانه‌ی جهت محصورکردن کل سطح این دو نوع مسلح‌کننده تحت تنش سربار ۵ کیلوپاسکال و شرایطی که برای این آزمایش‌ها ذکر شده است، به عنوان ضخامت بهینه انتخاب می‌شود. نمودار نیرو - جابه‌جایی این آزمایش‌ها، برای نقطه‌ی از آنها که به فاصله‌ی ۱۴ سانتی‌متر از دیواره‌ی جلویی دستگاه واقع شده است، برای ژئوگرید معمولی در شکل ۱۱ و برای مهار - شبکه در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که از این نمودارها پیداست، با افزایش نیروی بیرون‌کشش، ژئوگرید به تدریج با گذشت زمان نیرو می‌گیرد و پس از اینکه این

سانتی‌متر خاک درشت‌دانه‌ی پایین ژئوگرید در این آزمایش نسبت به دو حالت دیگر افت مقاومت داشته است، در ضخامت‌هایی بیشتر از یک ضخامت معین، دیگر افزایش ضخامت خاک درشت‌دانه تأثیری در افزایش مقاومت مسلح‌کننده ندارد؛ این یافته مطابق با نتایج سایر پژوهشگران^[۹] است. در این حالت مقاومت مسلح‌کننده، با افزایش ضخامت خاک، یا افزایش می‌یابد و یا ثابت می‌ماند. البته در مورد ضخامت ۷ سانتی‌متر خاک درشت‌دانه‌ی قرارگرفته در زیر ژئوگرید، مقدار مقاومت به میزان تقریباً ۲۰٪ کاهش یافته است که می‌تواند به علت خطاهای ناشی از ثبت پارامترها به صورت دستی باشد (آزمایش برای ضخامت ۷ سانتی‌متر خاک درشت‌دانه‌ی قرارگرفته در زیر ژئوگرید به دلیل مذکور ۳ بار تکرار شده است که در هر ۳ مورد نتایج مشابه به همین منوال بوده است).

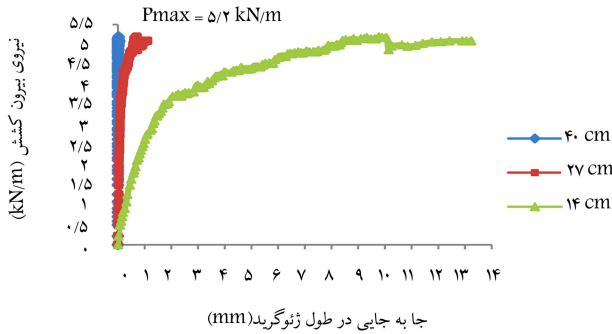
در سری دوم آزمایش‌ها، ۶ آزمایش بر روی ژئوگرید معمولی و ۹ آزمایش نیز بر روی مهار - شبکه با لحاظکردن مقدار ثابت ۵ سانتی‌متر لایه‌ی درشت‌دانه به عنوان لایه‌ی خاک پایین مسلح‌کننده، برای ضخامت‌های ۵، ۷، ۹ و ۱۱ سانتی‌متر لایه‌ی خاک درشت‌دانه به عنوان لایه‌ی خاک بالای مسلح‌کننده، انجام شده است. در شکل ۸، نمودارهای مقاومت بیرون‌کشش ژئوگرید معمولی برای ضخامت‌های ۵، ۷، ۹ و ۱۱ سانتی‌متر لایه‌ی خاک درشت‌دانه‌ی بالای ژئوگرید رسم شده است. با توجه به این نمودارها مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت درشت‌دانه، نیروی بیرون‌کشش تقریباً افزایش می‌یابد. برای مسلح‌کننده‌ی مهار - شبکه نیز نمودار مشابهی در شکل ۹ رسم شده است. در نمودار شکل ۱۰ نیز هر دو نمودار به طور هم‌زمان رسم شده‌اند. مطابق این شکل، مهار - شبکه نسبت به ژئوگرید معمولی نیروی بیشتری را تحمل می‌کند و مقاومت بیرون‌کشش بیشتری از خود بروز می‌دهد. با توجه به شکل‌های ۸ و ۹، چون مقدار مقاومت بیرون‌کشش ژئوگرید و مهار - شبکه،



الف) در حالت ۵ سانتی متر بالا و ۵ سانتی متر پایین ژئوگرید، خاک ماسه‌ی؛

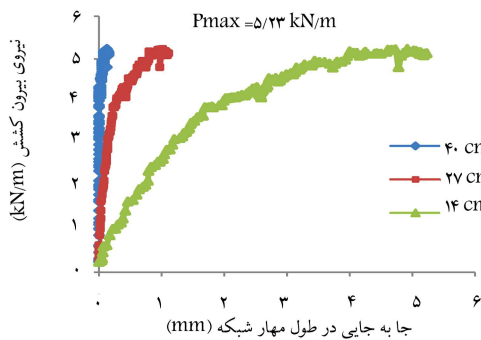


شکل ۱۲. نمودار نیرو - جابه‌جایی ضخامت‌های مختلف درشت‌دانه‌ی بالای مهار - شبکه.

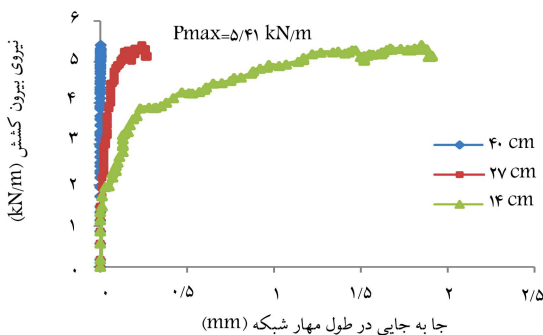


ب) در حالت ۱۱ سانتی متر بالا و ۵ سانتی متر پایین ژئوگرید، خاک ماسه‌ی.

شکل ۱۳. نمودار نیرو - جابه‌جایی سه نقطه در طول ژئوگرید.



الف) در حالت ۵ سانتی متر بالا و ۵ سانتی متر پایین مهار - شبکه، خاک ماسه‌ی؛



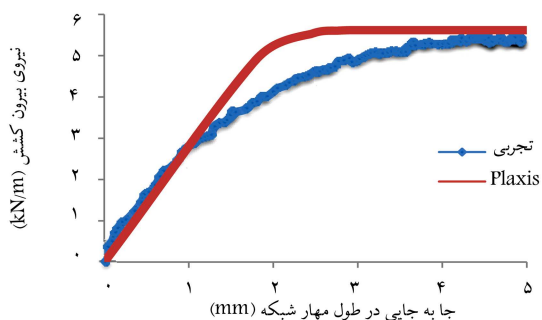
ب) در حالت ۱۱ سانتی متر بالا و ۵ سانتی متر پایین مهار - شبکه، خاک ماسه‌ی.

شکل ۱۴. نمودار نیرو - جابه‌جایی سه نقطه در طول مهار - شبکه.

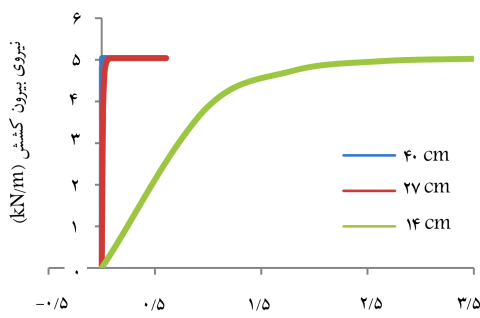
نیرو به تمام نقاط ژئوگرید مدفون در خاک منتقل شد، تدریجاً با افزایش نیرو شروع به حرکت می‌کند. نمودارها نشان‌دهنده‌ی جابه‌جایی ابتدای ژئوگرید، یعنی نزدیک‌ترین نقطه به گیره متصل به مسلح‌کننده هستند. هنگامی که نیرو به حدی برسد که ژئوگرید داخل خاک به حرکت دربیاید، از این لحظه به بعد افزایش نیروی بیرون‌کشش تأثیری در افزایش مقاومت بیرون‌کشش ژئوگرید ندارد، بدین معنی که به علت کاهش اصطکاک بین خاک و مسلح‌کننده، مسلح‌کننده مقاومتی از خود نشان نمی‌دهد و شروع به حرکت می‌کند. به علاوه، با افزایش ضخامت لایه‌ی درشت‌دانه‌ی اطراف ژئوگرید و مهار - شبکه، یک حالت سخت‌شدگی در نمودارها پیدا می‌شود. البته این حالت برای مهار - شبکه (شکل ۱۲) مشهودتر از ژئوگرید معمولی (شکل ۱۱) است. در هر یک از شکل‌های ۱۳ و ۱۴، دو نمونه از آزمایش‌هایی که بر روی ژئوگرید و مهار - شبکه انجام شده‌اند، جهت مقایسه‌ی رفتار این دو مسلح‌کننده در نقاط طولی آنها نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نقطه‌ی که به فاصله‌ی ۱۴ سانتی‌متر از ابتدای مسلح‌کننده‌ها قرار دارد، در اثر اعمال نیروی بیرون‌کشش، جابه‌جایی بیشتری داشته است. به علاوه با مقایسه‌ی شکل‌های ۱۳ و ۱۴ پدیده‌ای که هرچه ضخامت خاک ماسه‌ی اطراف مهار - شبکه افزایش یابد، رفتار سخت‌تری نسبت به ژئوگرید از خود نشان می‌دهد. چند نمونه از نتایج مقایسه‌ی تحلیل آزمایشگاهی و عددی این مسلح‌کننده‌ها در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. بر طبق این نمودارها، تطابق مناسبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده می‌شود.

۷. نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی

با انجام مطالعات عددی با استفاده از نرم‌افزار Plaxis ۳D Tunnel بر روی ژئوگرید معمولی و مهار - شبکه‌ی ساخته‌شده با آن، نتایجی در قالب نمودارهای مقایسه‌ی با نتایج تجربی ارائه شده است. در شکل ۱۵، نمونه‌ی از رفتار کلی ژئوگرید و مهار - شبکه در تحلیل عددی با استفاده از این نرم‌افزار نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشخص است که پیش‌بینی عددی رفتار این مسلح‌کننده‌ها با تقریب مناسبی به رفتار واقعی آنها، که از نتایج آزمایش بیرون‌کشش بر روی آنها مشخص می‌شود، نزدیک است. تفاوت محسوس‌تری که در این نمودارها دیده می‌شود، سختی این نمودارها نسبت به نمودارهای نتایج حاصل از آزمایش بیرون‌کشش است. با توجه به اینکه در این تحقیق قصد بر این است که با استفاده از تحلیل عددی مشخص شود آیا مسلح‌کننده‌های مزبور در این نوع مدل‌سازی از داخل خاک بیرون کشیده می‌شوند

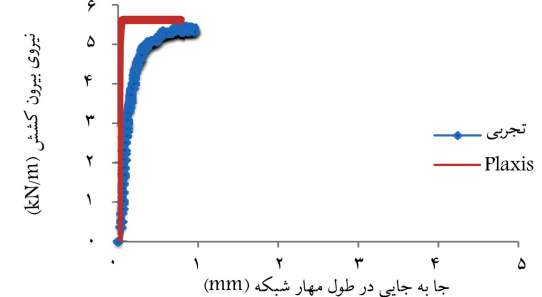


الف) نمودار مقایسه‌ی تحلیل عددی و تجربی مهار - شبکه برای نقطه‌ی ۱۴ سانتی متری از ابتدای آن؛

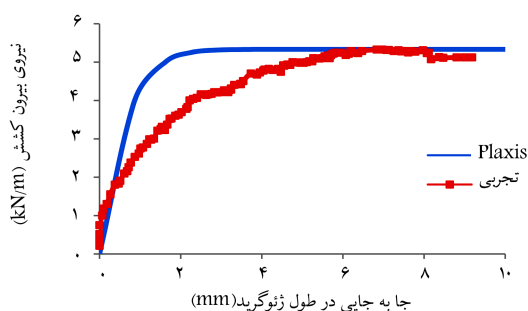


جا به جایی در طول ژنوگرید (mm)

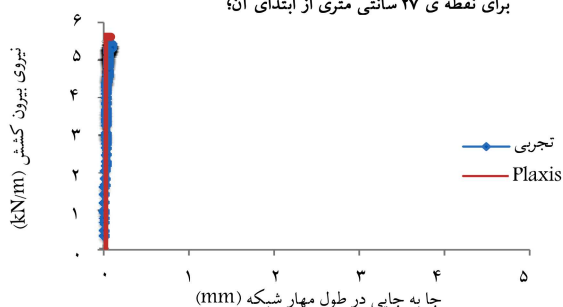
شکل ۱۵. نتایج تحلیل عددی ژنوگرید (در حالت کاملاً درشت‌دانه).



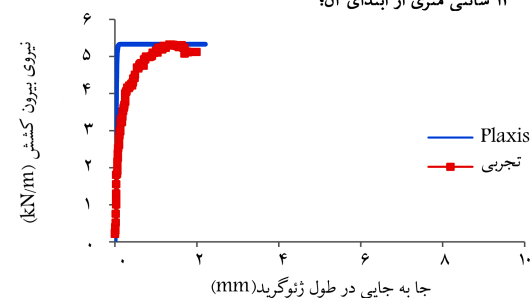
ب) نمودار مقایسه‌ی تحلیل عددی و تجربی مهار - شبکه برای نقطه‌ی ۲۷ سانتی متری از ابتدای آن؛



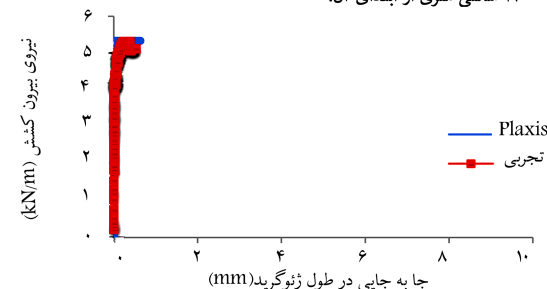
الف) نمودار مقایسه‌ی تحلیل عددی و تجربی ژنوگرید برای نقطه‌ی ۱۴ سانتی متری از ابتدای آن؛



ج) نمودار مقایسه‌ی تحلیل عددی و تجربی مهار - شبکه برای نقطه‌ی ۴۰ سانتی متری از ابتدای آن؛



ب) نمودار مقایسه‌ی تحلیل عددی و تجربی ژنوگرید برای نقطه‌ی ۲۷ سانتی متری از ابتدای آن؛



ج) نمودار مقایسه‌ی تحلیل عددی و تجربی ژنوگرید برای نقطه‌ی ۴۰ سانتی متری از ابتدای آن؛

شکل ۱۷. نتایج مقایسه‌ی تحلیل عددی و تجربی مهار - شبکه (در حالت کاملاً درشت‌دانه).

دست آمده است؛ به همین علت با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان رفتار تقریبی مسلح‌کننده‌ها را، که با درصد بالایی به رفتار واقعی آنها شبیه است، پیش‌بینی کرد.

۸. نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج آزمایش‌های بیرون کشیدگی انجام شده همان‌طور که بیشتر هم گفته شد، با افزایش ضخامت لایه‌ی خاک درشت‌دانه‌ی محصورکننده‌ی مسلح‌کننده‌ها، مقاومت بیرون‌کشش مسلح‌کننده‌ها رفته رفته افزایش می‌یابد تا اینکه به حد تقریباً ثابتی می‌رسد. این روند افزایشی به این دلیل ایجاد می‌شود که با افزایش ضخامت لایه‌ی خاک درشت‌دانه‌ی محصورکننده‌ی مسلح‌کننده‌ها مقدار اصطکاکی که بین چشمه‌های مسلح‌کننده با دانه‌های خاک در تماس با آن وجود دارد، رفته رفته افزایش می‌یابد. ولی از آنجا که افزایش بیش از حد لایه‌ی خاک درشت‌دانه تأثیر چندانی در افزایش مقدار این اصطکاک ندارد، و این به دلیل بیشتر شدن ارتفاع خاک درشت‌دانه

شکل ۱۶. نتایج مقایسه‌ی تحلیل عددی و تجربی ژنوگرید (در حالت کاملاً درشت‌دانه).

یا خیر، بنابراین رفتار کلی آنها از نتایج تحلیل عددی مد نظر است. البته، بسته به مقدار پارامترهایی که در قسمت ورودی این نرم‌افزار وارد می‌کنیم، این نمودارها دچار تغییرات مختلفی می‌شوند. مقدار پارامتر ضریب مشترک خاک و ژنوگرید، که در ورودی این نرم‌افزار با R که در محدوده‌ی ۰ تا ۱ تغییر می‌کند، تعریف می‌شود (جدول ۳)، با استفاده از آزمایش تعیین نشده است و مقدار آن با سعی و خطا به

جدول ۴. درصد نسبت مقاومت بسیج شده در مسلح کننده ها نسبت به مقاومت نهایی آنها.

ژئوگرید (%)	مهار شبکه (%)	
۴۵٫۵۶	۴۶٫۶۷	درشت دانه کامل
۴۱٫۱۱	-	۳B+۵T
۴۲٫۳۹	۴۴٫۷	۵B+۵T
۳۳٫۶۸	-	۷B+۵T
۳۹٫۴۹	۴۲٫۲۲	۵B+۷T
۴۳٫۵۹	۴۴٫۲۷	۵B+۹T
۴۴٫۴۴	۴۶٫۲۴	۵B+۱۱T
۲۱٫۹۶	۲۸٫۷۲	ریزدانه کامل

مقایسه با اختلاف این مقاومت با حالتی که جعبه‌ی آزمایش کاملاً با خاک ریزدانه پر شده است، ناچیز است. بنابراین ضخامت ۵ سانتی‌متر برای محصورکردن لایه‌ی بالای مسلح‌کننده‌ها، در شرایط مذکور آزمایشگاهی، به‌عنوان ضخامت بهینه انتخاب شده است. البته باید خاطر نشان کرد که مقاومت بیرون‌کشش مسلح‌کننده‌ها در سایر ضخامت‌ها تغییر شگرفی نسبت به ضخامت ۵ سانتی‌متری نداشته است و این مسئله متأثر از عوامل مختلفی است که از آن جمله می‌توان به محصورشدن خاک توسط مرزها و نیز ابعاد متوسط دستگاه آزمایش اشاره کرد. به‌علاوه می‌توان گفت که مسلح‌کننده‌ی مهار - شبکه نسبت به ژئوگرید، درازای جابه‌جایی کمتری در طول خود نیروی بیرون‌کشش بیشتری را تحمل می‌کند. این مسئله همچنین در نمودار مربوط به تحلیل عددی این مسلح‌کننده‌ها مشهود است. چند نمونه از نتایج مقایسه‌ی تحلیل آزمایشگاهی و عددی این مسلح‌کننده‌ها در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است. بر طبق این نمودارها، تطابق مناسبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده می‌شود.

بنابراین نتایج، می‌توان ضخامت ۵ سانتی‌متر پایین و ۵ سانتی‌متر بالا را برای ژئوگرید و مهار - شبکه به‌عنوان ضخامت بهینه، با توجه به شرایط حاکم بر آزمایش، نوع ژئوگرید و نوع خاک مورد استفاده در نظر گرفت. باید خاطر نشان کرد که در تمامی آزمایش‌های انجام شده، ژئوگرید و مهار - شبکه به بیرون‌کشیدگی کامل نرسیده‌اند و به علت محدودیت‌های موجود، فقط مقداری در خاک جابه‌جا شده‌اند. به‌علاوه باید متذکر شد که نتایج حاصل از این تحقیق فقط برای تنش سربار ۵ کیلوپاسکال و برای مسلح‌کننده‌های مذکور با شرایط توصیف شده صادق است.

با توجه به جدول ۴، درصد نسبت مقاومت بسیج شده در هر دو مسلح‌کننده نسبت به مقاومت نهایی آنها در حالتی که کل جعبه‌ی آزمایش با خاک درشت‌دانه پر شود، بیشترین مقدار است و می‌توان گفت که در این حالت تقریباً نصف مقاومت نهایی مسلح‌کننده‌ها در امتداد آنها بسیج می‌شود.

از ارتفاع محدوده‌ی اثر مسلح‌کننده‌هاست، مقدار مقاومت بیرون‌کشش آنها نهایتاً تا مقدار مشخصی افزایش می‌یابد و ثابت می‌ماند. مقدار ضخامت لایه‌ی خاک درشت‌دانه‌ی محصورکننده‌ی مسلح‌کننده‌ها را در این حالت می‌توان به‌عنوان ضخامت بهینه در نظر گرفت. با توجه به نمودارهای ترسیم شده در شکل‌های ۷ تا ۹، استفاده از خاک درشت‌دانه در اطراف مسلح‌کننده‌ها باعث افزایش مقاومت بیرون‌کشش آنها در مقایسه با حالتی می‌شود که کل جعبه‌ی آزمایش را خاک ریزدانه پر کرده است. با توجه به این نمودارها، مقاومت بیرون‌کشش مسلح‌کننده‌ها با افزایش ضخامت خاک درشت‌دانه‌ی اطراف آنها افزایش پیدا می‌کند. به این دلیل که مقدار اختلاف مقاومت در حالتی که ضخامت لایه‌ی خاک درشت‌دانه‌ی بالای مسلح‌کننده‌ها ۵ سانتی‌متر است، با حالتی که جعبه‌ی آزمایش کاملاً با خاک درشت‌دانه پر شده است، در

پانویس‌ها

1. pull-out
2. grid-anchor
3. active
4. box
5. clamp
6. plates

منابع (References)

1. Saran, S., *Reinforced Soil and its Engineering Applications*, I.K. International Pvt.Ltd., New Delhi, pp. 10-11 (2005).

2. Farrag, Kh., Acar, Y.B. and Juran, I. "Pull-out resistance of geogrid reinforcements", *Geotextile and Geomembrane*, **12**(2), pp. 133-159 (1993).
3. Touahamia, M., Sivakumar, V. and McKelvey, D. "Shear strength of reinforced-recycled material", *Construction and Building Materials*, **16**(6), pp. 331-339 (September 2002).
4. Mosallanezhad, M., "The investigation of bearing capacity improvement of granular soils using [Grid-Anchors]", Ph.D. Thesis, Shiraz University, Iran, (In Persian)(2008).
5. Hataf, N. and Sadr, A. "Pull-out behavior of an innovative grid-anchor system", *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, (**1,2,3 and 4**), pp. 909-912 (2009).

6. Feng, X., Yang, Q. and Li, S. "Pullout behavior of geogrid in red clay and the prediction of ultimate resistance", *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Bundle J., **13**, pp. 1-17 (2008).
7. Abdi, M.R., Sadrnejad, A. and Arjomand, M.A. "Strength enhancement of clay by encapsulating geogrids in thin layers of sand", *Geotextiles and Geomembranes*, **27**(6), pp. 447-455 (December 2009).
8. Arjomand, M.A., Abdi, M.R. and Sadrnejad, S.A. "Clay reinforcement using geogrid embedded in thin layers of sand", *International Journal of Civil Engineering*, **7**(4), pp. 224-235 (2009).
9. Abdi, M.R. and Arjomand, M.A. "Pullout tests conducted on clay reinforced with geogrid encapsulated in thin layers of sand", *Geotextiles and Geomembranes*, **29**(6), pp. 588-595 (December 2011).
10. Sadr, A., "Investigation of Pull-Out resistance of Grid-Anchor system in sandy Soils" M.Sc. Thesis, Shiraz University, Iran, (In Persian) (2008).