



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و شش، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۳، صفحه ۶۷ تا ۷۸
Vol. 46, No. 2, Winter 2014, pp. 67- 78



نشریه علمی- پژوهشی امیرکبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)

Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)
(AJSR - CEE)

مقایسه‌ی نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی مقاومت بیرون کشش ژئوگرید و مهار شبکه محصور شده توسط لایه‌ی درشت‌دانه در خاک چسبنده

نازنین سهرابی^۱، نادر هاتف^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، بخش راه و ساختمان و محیط زیست، دانشگاه شیراز

۲- استاد، بخش راه و ساختمان و محیط زیست، دانشگاه شیراز

(دریافت ۱۳۹۰/۸/۱۵، پذیرش ۱۳۹۳/۸/۲۴)

چکیده

در عملکرد اکثر سازه‌های خاکی مسلح، مقاومت بیرون کشش مسلح‌کننده نقش عمده‌ای را به عهده دارد. از طرفی به علت اینکه خاک‌های درشت‌دانه معمولاً اندرکنش بهتری با مسلح‌کننده برقرار می‌کنند، در این سازه‌ها بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. خاک درشت‌دانه عموماً از محل قرضه به محل اجرای سازه‌های خاکی منتقل می‌شود و از این رو، تهیه‌ی آن پرهزینه است. از طرفی به علت اهمیتی که مقاومت بیرون کشش مسلح‌کننده‌ها در تعیین نوع آنها دارد، در این تحقیق به بررسی مقاومت بیرون کشش دو نوع مسلح‌کننده قرار گرفته در بین لایه‌ای از خاک درشت‌دانه پرداخته شده است. برای این منظور ابتدا تعدادی آزمایش بیرون کشش بر روی یک نوع ژئوگرید معمولی و نوعی مسلح‌کننده به نام مهار- شبکه انجام شده است، در حالتی که فقط لایه‌ای از خاک درشت‌دانه با ضخامت‌های انتخابی مختلف اطراف مسلح‌کننده قرار می‌گیرد و باقیمانده‌ی حجم سازه‌ی خاکی با خاک ریزدانه جایگزین می‌شود. به علاوه، در این تحقیق، مدل‌سازی آزمایش بیرون کشش با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود پلکسیز تری- دی تونل انجام شده است. نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان از کارایی روش مورد بحث در کاهش هزینه‌ی اجرا همراه با حفظ عملکرد خاک مسلح دارد.

کلمات کلیدی

آزمایش بیرون کشش، ژئوگرید، مهار- شبکه، خاک ریزدانه، خاک درشت‌دانه، نرم‌افزار اجزای محدود پلکسیز تری- دی تونل.

* نویسنده مسئول وعهده دار مکاتبات Email: nhataf@shirazu.ac.ir

۱- مقدمه

مطابق تعریف مؤسسه‌ی استاندارد آمریکا، ژئوسنتتیک‌ها محصولات صفحه‌ای از جنس پلیمرها هستند که به عنوان جزئی جدایی‌ناپذیر همراه با مصالح طبیعی ژئوتکنیکی مثل خاک و سنگ در سازه‌های مهندسی عمران بکار برده می‌شوند. به علت ضعف خاک، از این محصولات در تقویت مقاومت برشی خاک استفاده می‌شود. خاک، بیشترین حجم یک سازه‌ی خاک مسلح را تشکیل می‌دهد. می‌توان گفت که تقریباً همیشه امکان اجرای یک سازه‌ی خاک مسلح حتی با استفاده از خاکی که در محل موجود است یا با استفاده از خاکی که از نزدیکی محل آورده شده است، وجود دارد. اما لازم است که بدانیم آیا خاک مورد استفاده برای ساختن یک سازه‌ی خاک مسلح مناسب است یا خیر؟ به همین منظور انتخاب خاک با در نظر گرفتن مواردی مثل نوع سازه، پایداری طولانی مدت سازه‌ی نهایی، پایداری کوتاه مدت (در حین ساخت)، خصوصیات فیزیکی- شیمیایی مصالح و هزینه‌ی کار، صورت می‌گیرد. پایداری سازه‌ی خاک مسلح به توسعه‌ی مناسب اصطکاک بین خاک و مسلح‌کننده بستگی دارد. اصطکاک‌ای که در این حالت بین خاک و مسلح‌کننده به وجود می‌آید تابعی از خصوصیات آنها خواهد بود.

خاک‌های غیرچسبنده‌ی متراکم شده به میزانی که این تراکم منجر به انبساط حجمی آنها در حین آزمایش برش شود، خاک‌های مناسب و ایده‌آلی برای استفاده در سازه‌های خاک مسلح هستند. این خاک‌ها در محدوده‌ای که سازه‌های خاک مسلح معمولاً بارگذاری می‌شوند به صورت مصالح الاستیک عمل می‌کنند. تنها عیب خاک‌های غیرچسبنده آن است که این خاک‌ها معمولاً مصالحی وارداتی هستند و بنابراین ممکن است برای اجرای یک سازه‌ی خاک مسلح، مصالح پر هزینه‌ای باشند.

از طرف دیگر، خاک‌های چسبنده (ریزدانه‌ی رسی) برای ساختن سازه‌های خاک مسلح مناسب نیستند. این خاک‌ها معمولاً از لحاظ دانه‌بندی ضعیف هستند. رفتار این خاک‌ها به صورت پلاستیک یا الاستوپلاستیک است، بنابراین در این خاک‌ها احتمال تغییر شکل پس از اجراء زیاد 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 آنها است و بنابراین این مصالح مقرون به صرفه هستند [۷].

مشکل دیگری که در رابطه با خاک ریزدانه (رسی) مطرح است مقاومت برشی سطح تماس آن با مسلح‌کننده است. به علت پایین بودن مقدار این مقاومت، گسیختگی برشی در سطح تماس، قبل از رسیدن مقاومت بیرون‌کشش ۱ مسلح‌کننده به حد

نهایی، به وقوع می‌پیوندد. بنابراین مقاومت مسلح‌کننده در این خاک، به صورت کامل مورد بهره‌برداری قرار نمی‌گیرد [۶]. مکانیزم اندرکنش خاک و مسلح‌کننده را می‌توان به سادگی به دو گروه زیر تقسیم‌بندی نمود:

- ۱- لغزش خاک به صورت برش مستقیم بر روی سطح مسلح-کننده. ۲- بیرون کشیده شدن مسلح‌کننده از داخل خاک [۸].
- به همین دلیل با استناد به مفاهیم فوق، برای مسلح‌کننده‌هایی که به شکل شبکه‌ای ساخته شده‌اند، مثل ژئوگریدها، مکانیزم شماره‌ی ۱ به کمک اصطکاک بین خاک و سطح ژئوگرید و نیز توسط اصطکاک داخلی ذرات خاک به تنهایی، کنترل می‌شود. در مکانیزم شماره‌ی ۲ مقاومت بیرون‌کشش ژئوگرید به کمک اصطکاک بین خاک و ژئوگرید و همچنین توسط مقاومت باربری خاک بر روی اعضای عرضی ژئوگرید، قابل کنترل است [۹].

در رابطه با عوامل مؤثر و نیز رفتار مسلح‌کننده‌هایی از نوع ژئوسنتتیک در حین بیرون‌کشش، تاکنون مطالعات مختلف آزمایشگاهی و عددی توسط محققین مختلف انجام شده است. برگادو و همکاران در سال ۱۹۸۷، اندرکنش بین خاک و ژئوگرید را با استفاده از آزمایش‌های برش مستقیم و بیرون‌کشش گزارش دادند و از نتایج آنها در یک مطالعه‌ی موردی، استفاده نمودند. در این آزمایش‌ها از ژئوگریدی که در خاک ماسه‌ی رسی قرار گرفته است، استفاده شده است [۱۰]. میلیگان و پالمیرا در سال ۱۹۸۹ تأثیر شرایط مرزی را بر روی رفتار بیرون‌کشش بررسی کردند. آنها به این مسأله پی بردند که زاویه‌ی اصطکاک داخلی به دست آمده بین خاک و مسلح‌کننده، مقداری دست بالا است و این به علت اصطکاک دیواره‌ی داخلی جعبه‌ی آزمایش در آزمایش‌های کوچک مقیاس است. به همین دلیل آنها توصیه به روغن‌کاری دیواره‌ی داخلی جعبه و نیز افزایش مقیاس آزمایش، کردند [۱۱].

فاراگ و همکاران در سال ۱۹۹۳ بر روی ژئوگرید تنسارک در خاک ماسه‌ای قرار داده شده است، آزمایش‌های بیرون‌کشش انجام دادند. یکی از اهداف آنها در این مطالعه، بررسی تأثیر ضخامت خاک ماسه‌ای اطراف ژئوگرید در تغییرات مقاومت بیرون‌کشش آنها بود. فاراگو همکاران معتقدند که شرایط مرزی صلب و انعطاف پذیر بودن مرزها) از طریق ضخامت خاک، تأثیر مستقیمی در افزایش یا کاهش مقدار این مقاومت دارد [۱۲].

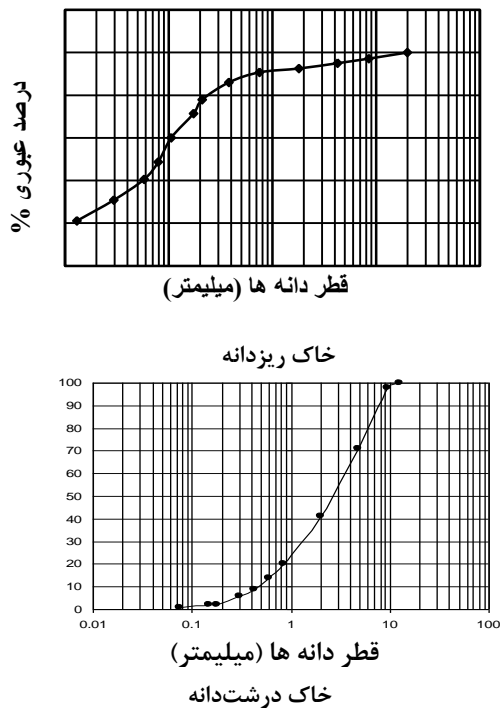
مصلى نژاد در سال ۲۰۰۸ بر روی ژئوگرید نتلون با چشمه‌های شش ضلعی و مسلح‌کننده‌ی مه‌ار- شبکه‌ی ۲ ساخته شده از همین ژئوگرید) مطالعات تجربی انجام داد. هدف او از این مطالعات در واقع بررسی رفتار مسلح‌کننده‌ی ابداعی (مه‌ار- شبکه)، با نسبت‌های مختلف تعداد مه‌ار در واحد سطح ژئوگرید،

که در ضخامت‌های مختلف خاک درشت‌دانه واقع شده‌اند، انجام شده است. به علاوه، مطالعات عددی این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود پلکسیز تری- دی تونل ۳ برای مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، انجام شده تا درستی نتایج تجربی به اثبات برسد.

۲- مواد و مصالح مورد استفاده

۲-۱- مصالح خاکی

مصالح خاکی مورد استفاده در آزمایش‌های مربوط به این تحقیق از دو نوع ریزدانه و درشت‌دانه است. خاک ریزدانه‌ی مورد استفاده از نوع CL با زاویه‌ی اصطکاک داخلی ۲۸/۴۲ درجه و مقدار چسبندگی کم بوده و خاک درشت‌دانه از نوع SW با زاویه اصطکاک داخلی ۴۳ درجه است. میانگین تراکم نسبی لایه‌ها در تمامی نمونه‌ها در حدود ۷۵٪ است. خاک ریزدانه‌ی مورد استفاده در این آزمایش‌ها پس از پهن و خشک کردن به کمک یک چکش پلاستیکی کوبیده و سپس از الک نمره‌ی ۱۰ عبور داده شده است تا حالت یکنواختی در تمامی آزمایش‌ها داشته باشد. در آزمایش‌هایی که انجام شده‌اند، خاک به صورت خشک مورد استفاده قرار گرفته و رطوبت آن به عنوان یک عامل متغیر، مورد بررسی قرار نگرفته است. نمودار دانه‌بندی هر دو نوع خاک در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): نمودار دانه بندی مصالح درشت‌دانه و ریزدانه

در خاک ماسه‌ای از نوع SW بود. نتایج آزمایش‌های بیرون کشش مصلی‌نژاد برتری مسلح‌کننده‌ی مهار- شبکه را نسبت به ژئوگریدی که از آن ساخته شده، نشان می‌دهد [۲]. هاتف و صدر در سال ۲۰۰۸ مطالعات آزمایشگاهی بر روی دو نوع مسلح‌کننده، ژئوگرید «با چشمه‌های شش ضلعی» و مهار- شبکه‌ی ساخته شده از این ژئوگرید در تنش‌های سربار ۸ kPa و ۱۸ kPa و در خاک ماسه‌ای SW انجام دادند. هدف آنها از انجام این آزمایش‌ها در واقع مقایسه‌ی مقاومت بیرون کشش این دو نوع مسلح‌کننده با هم و در تنش‌های سربار گفته شده بود. نتایج مطالعات آنها نشان می‌دهد که مسلح‌کننده‌ی مهار- شبکه، تحت شرایط یکسانی با ژئوگرید معمولی، مقاومت بیرون کشش بیشتری از خود بروز می‌دهد، این در حالی است که مهار- شبکه برای رسیدن به مقاومت نهایی خود، جابه‌جایی کمتری نسبت به ژئوگرید معمولی در نقطه‌ی نزدیک به اعمال بار دارد. به علاوه، مهار- شبکه رفتار سخت‌تری را نسبت به ژئوگرید معمولی از خود بروز می‌دهد و این به دلیل ظرفیت بالا و توانایی مهار- شبکه در کسب مقاومت بیرون کشش در جابه‌جایی‌های کمتر است. این افزایش ظرفیت در مسلح‌کننده‌ی مهار- شبکه به علت مکانیزم مقاومت فعال مهارها است [۱۳].

فنگ و همکاران در سال ۲۰۰۸ تحقیقاتی در رابطه با رفتار بیرون کشش ژئوگرید مدفون در رس سرخ انجام دادند. نتایج کار آنها بیانگر این مسأله بود که در این حالت ژئوگرید دچار گسیختگی بیرون کشش می‌شود و مقاومت نهایی آن در برابر میزان رطوبت خاک، حساس است [۱۴].

ارجمند و همکاران در سال ۲۰۰۹ به منظور بررسی اثر محصور کردن ژئوگرید در یک پانل ساندویچی با خاک ماسه‌ای SW، اثر این پانل را بر افزایش مقاومت خاک رس بررسی کردند. آنها این اثر را با استفاده از آزمایش برش مستقیم بر روی ژئوگریدها در ضخامت‌های ۴ mm، ۶ mm، ۸ mm، ۱۰ mm، ۱۲ mm و ۱۴ mm خاک ماسه‌ای دربرگیرنده‌ی ژئوگرید، بررسی نمودند. با توجه به نتایج ارجمند و همکاران، ضخامت ۱۰ mm خاک ماسه‌ای اطراف ژئوگرید، مقاومت برشی خاک- مسلح را بیشتر از سایر ضخامت‌ها افزایش می‌دهد. تعیین این ضخامت بهینه، با توجه به نتایج مطالعات آنها، مستقل از تنش سربار است [۱۵].

با توجه به مطالعات پیشین که در رابطه با مسلح‌کننده‌ها انجام شده است، کمبود مطالعات تجربی در زمینه‌ی آزمایش بیرون کشش که به منظور بررسی نوع خاک دربرگیرنده‌ی مسلح- کننده باشد، دیده می‌شود. به همین دلیل مطالعات تجربی این تحقیق بر مبنای بررسی مقاومت بیرون کشش دو نوع مسلح‌کننده

جدول (۲): مشخصات مهار - شبکه

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

۳ - مشخصات دستگاه آزمایش

دستگاه مورد استفاده در این تحقیق (شکل ۴) مطابق توصیه‌های پامیرا در سال ۱۹۸۹ و هایشی در سال ۱۹۹۶ و نیز طبق استاندارد ASTM، ساخته شده است. البته در مطالعات پیشین از دستگاه‌هایی با ابعاد و اندازه و نیز تجهیزات مختلف برای بررسی مقاومت بیرون کشش ژئوسنتتیک‌ها استفاده شده است، ولی کلیه دستگاه‌های مورد استفاده در این نوع تحقیق، معمولاً از اجزاء زیر تشکیل شده‌اند:

۱- جعبه: در این جعبه نمونه‌ی خاک و مسلح‌کننده‌ی مد نظر است و این جعبه بسته به اندازه‌ی ذرات، نوع و هندسه‌ی مسلح‌کننده‌ی مورد استفاده، ابعاد متفاوتی دارد.

۲- جک فنری: تأمین‌کننده‌ی نیروی کششی لازم برای بیرون‌کشیدن مسلح‌کننده است.

۳- گیج: وسیله‌ی سنجش میزان جابه‌جایی قسمت‌های مختلف مسلح‌کننده است و دقت اندازه‌گیری آن، صدم میلی‌متر می‌باشد.

۴- گیره‌ی مسلح‌کننده: رابط بین جک و مسلح‌کننده بوده و باید به گونه‌ای طراحی شود که بدون هیچ‌گونه تغییر شکلی 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 و تنش سربار از طریق آن به نمونه اعمال می‌شود [۳].

۶- سیم‌های فلزی سخت برای اندازه‌گیری جابه‌جایی در طول نمونه‌ی مسلح‌کننده در فواصل ۱۴ cm، ۲۷ cm و ۴۰ cm از ابتدای آن.



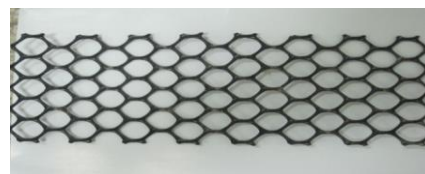
الف

۲-۲ - مشخصات ژئوگرید و مهار - شبکه‌ی مورد

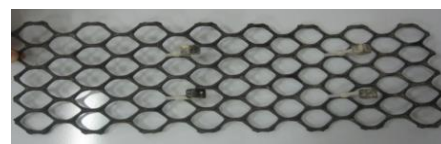
استفاده

مسلح‌کننده‌های مورد استفاده در این تحقیق از نوع ژئوگرید نتلون دو محوره، با نام تجاری CE131، است (شکل ۲) که مشخصات 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، ۱۶ cm × ۴۰ cm است. مهار - شبکه مورد استفاده در این تحقیق نوعی مسلح‌کننده‌ی ابداعی است [۲]، که از اتصال تعدادی مهار (انگر) به ژئوگرید معمولی نتلون ساخته شده است. مهارهای گفته‌شده شامل تعدادی المان مکعب شکل از جنس پلاستیک فشرده هستند که هر یک به کمک بست کمربندی، از جنس نوعی پلیمر با مقاومت کششی مناسب، در فواصل ۱۵ cm و ۳۰ cm از ابتدای ژئوگرید، مطابق شکل (۳)، به ژئوگرید متصل شده‌اند.

بست‌های مورد استفاده قادر به اتصال المان‌ها تحت هر زاویه‌ای هستند که در این تحقیق با زاویه‌ی ۴۵ درجه نسبت به راستای افق به ژئوگرید متصل شده‌اند. ژئوگرید CE131 دارای فضاهای خالی شش‌وجهی است و بست‌های گفته‌شده دقیقاً در دو سوی محل اتصال اعضای طولی و عرضی در هر حفره قرار می‌گیرند که این عمل پایداری بهتر مهار حین اعمال بار را موجب می‌شود. ویژگی‌های مهار - شبکه در جدول (۲) آورده شده است.



شکل (۲): ژئوگرید معمولی



شکل (۳): مهار - شبکه

جدول (۱): مشخصات ژئوگرید معمولی

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

تنش سرباری که بر خاک وارد می‌شود می‌باید دقیقاً معادل با تنش سربار ۵ kPa باشد که در آزمایشگاه بر خاک وارد شده است. برای مدل‌سازی این تنش سربار از یک خاک با ارتفاع ۵ cm و وزن مخصوص 1000 kN/m^3 ، بر روی این صفحه، در مدل نرم‌افزاری استفاده شده است. به علاوه، کلیه‌ی سطوح در تماس با خاک می‌باید دارای سطح مشترک^۷ باشند، از جمله کلیه‌ی صفحات، ژئوگرید و غیره.

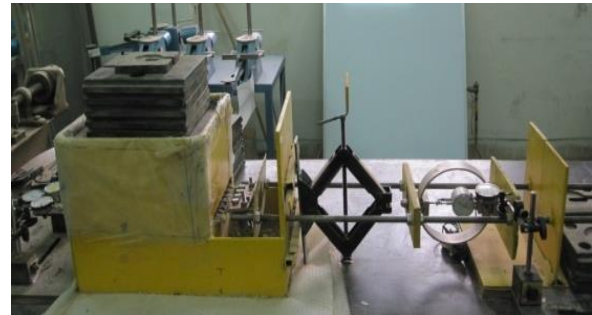
برای مدل کردن مهار- شبکه از ژئوگرید و برای مدل کردن مهارها از ابزار "node to node anchor" استفاده شده است. در فواصل ۱۵ cm و ۳۰ cm از ابتدای ژئوگرید این مهارها با زاویه‌ی ۴۵ درجه نسبت به راستای افق قرار داده شده‌اند. به منظور مدل‌سازی المان‌های مکعب شکلی که به مهارها متصل‌اند از یک هندسه‌ی مکعب شکل استفاده شده که حرکت محیط آن با کمک ابزار Total Fixities مقید شده است. به منظور مدل- سازی جنس پلاستیک فشرده مانند این المان‌ها، داخل محیط مقیدشده‌ی آنها، در نرم‌افزار، با خاکی که مدول الاستیسیته‌ی زیادی دارد پر شده است. نحوه‌ی شبکه‌بندی به صورت درشت^۸ انجام شده است.

از آنجا که در این تحقیق رفتار ژئوگرید و مهار- شبکه حین بیرون کشیدگی مد نظر است، بنابراین به منظور مدل‌سازی هر چه بهتر رفتار این مسلح‌کننده‌ها از Load system A برای مدل‌سازی نیروی بیرون کشش 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، بطور خلاصه به شرح زیر است:

۱- المان‌های خاکی:

جدول (۳): پارامترهای خاک بکار رفته در تحلیل عددی

نوع خاک	خاک ریزدانه	خاک درشت‌دانه
γ_{sat} (kN/cm^3)	16×10^{-6}	20×10^{-6}
γ_{unsat} (kN/cm^3)	14×10^{-6}	17×10^{-6}
ψ (degree)	.	۱۳
ϕ (degree)	۲۸/۴۲	۴۳
C (kN/cm^2)	1×10^{-3}	1×10^{-6}
ν	۰/۳	۰/۱
E (kN/cm^2)	۰/۹	۱
$R_{interface}$	۰/۶	۰/۳



ب

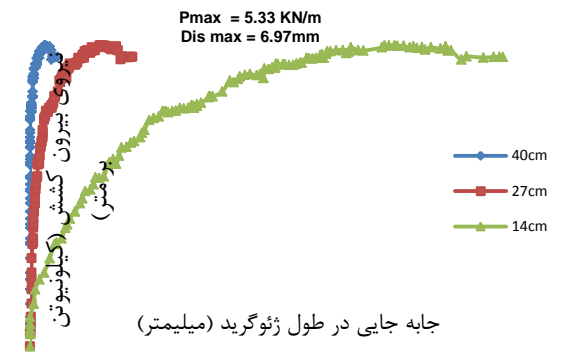
شکل (۴): دستگاه آزمایش بیرون کشش

۴- روش انجام آزمایش

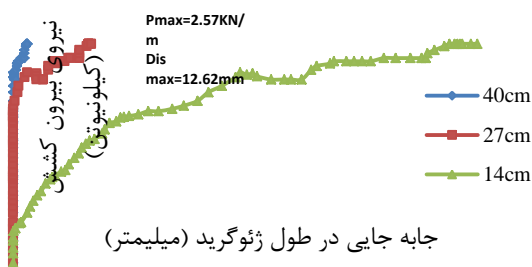
در این تحقیق حدود ۳۰ آزمایش انجام شده است که از این بین تعدادی بر روی ژئوگرید معمولی و تعدادی نیز بر روی مهار- شبکه‌ی محصور شده در ضخامت‌های متفاوتی از خاک ماسه‌ای با مشخصات مذکور، انجام شده است، بطوریکه مابقی جعبه‌ی آزمایش را خاک ریزدانه از نوع CL تشکیل می‌دهد. لایه‌های ۵ cm خاک با اعمال ۳۶ ضربه توسط یک چکش چوبی به میزان کافی متراکم شدند «تراکم خاک در این تحقیق مورد بررسی قرار نمی‌گیرد». بار قائمی که به نمونه اعمال می‌شود ۵ kPa است «این نوع ژئوگرید برای تنش‌های سربار دیگر نیز آزمایش شده و در تنش سربار بزرگتر از ۵ kPa، در این دستگاه، بیشتر دچار انبساط طولی می‌شود تا جابه‌جا شدن». برای بارگذاری افقی نیز از یک جک فوری استفاده شده که سرعت اعمال بار افقی توسط این جک 1 mm/min تنظیم شده است. بار افقی توسط یک گیج رینگی اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری کلیه‌ی جابه‌جایی‌ها از گیج‌هایی با دقت صدم و هزارم میلی‌متر استفاده شده است.

۵- نحوه‌ی مدل‌سازی با نرم‌افزار پلکسیز تری- دی تونل

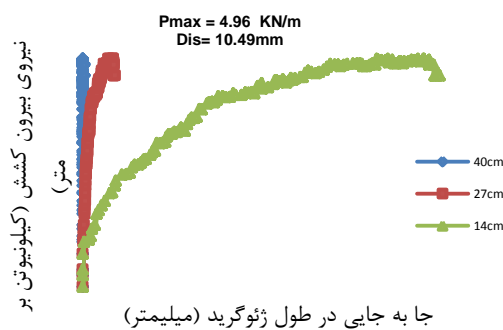
برای مدل‌سازی آزمایش بیرون کشش ابتدا باید شرایط مرزی را مطابق مدل واقعی مدل‌سازی کرد. به همین منظور ابتدا جعبه‌ی آزمایش که در صفحه‌ی XY دارای ابعاد ۳۵×۳۵ cm است، در فضای نرم‌افزار که دارای محور X و Y است رسم شده است. شرایط مرزی که باید در این نرم‌افزار در نظر گرفته شود تا مدل نرم‌افزاری با مدل واقعی مطابقت نزدیکی داشته باشد، عبارت است از: صفحاتی^۶ به ضخامت ۵ cm 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) و یک صفحه به ضخامت ۵ cm و با صلبیت بالا که بر روی خاک قرار می‌گیرد.



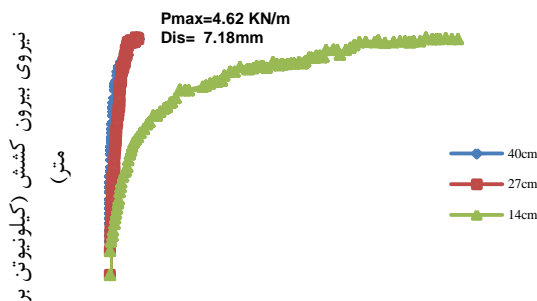
شکل (۷): نتایج آزمایش بیرون کشش ژئوگرید/کاملاً درشت دانه



شکل (۸): نتایج آزمایش بیرون کشش ژئوگرید/کاملاً ریزدانه



شکل (۹): نتایج آزمایش بیرون کشش ژئوگرید (۵ cm پایین و ۵ cm بالا)



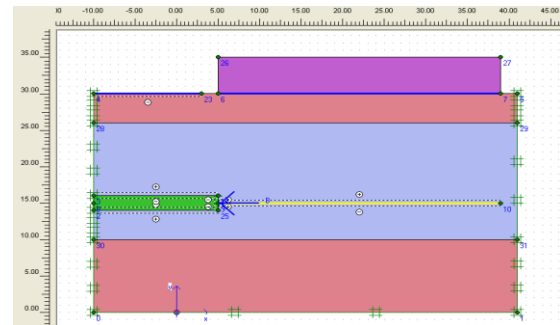
شکل (۱۰): نتایج آزمایش بیرون کشش ژئوگرید (۵ cm پایین و ۷ cm بالا)

مدل به کار رفته برای خاک، از نوع مور-کولمب است.

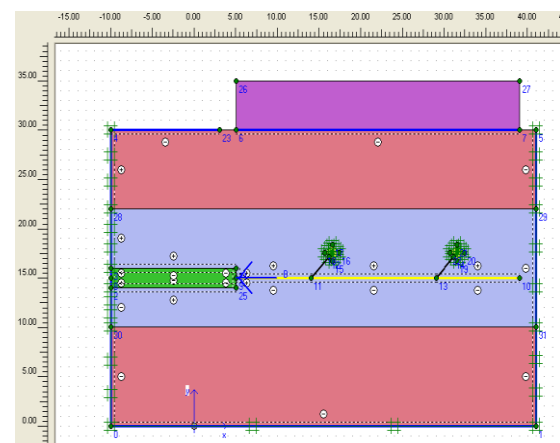
۲- ژئوگرید: $EA = 0.117 \text{ kN/cm}$

۳- مهارها: $EA = 0.18 \text{ kN}$

در شکل (۵) و شکل (۶) نمونه‌ای از مدل ساخته شده در این نرم افزار نشان داده شده است.



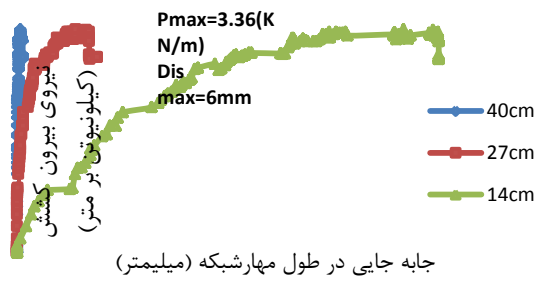
شکل (۵): مدل ژئوگرید محصور در ۱۱ cm خاک بالا و ۵ cm خاک پایین آن



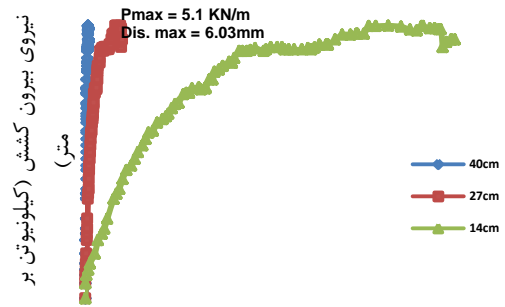
شکل (۶): مدل مهار- شبکه محصور در ۷ cm خاک بالا و ۵ cm خاک پایین آن

۶- نتایج به دست آمده از تحلیل آزمایشگاهی

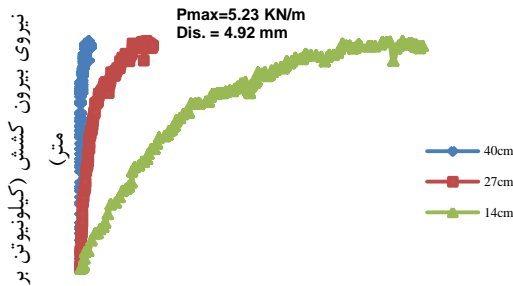
در شکل‌های (۷) تا (۱۸) نتایج آزمایش بیرون کشش در حالات قرارگیری ژئوگرید و مهار شبکه، در ضخامت‌های مختلف انتخابی از خاک درشت‌دانه، ارائه شده است. این نتایج برای مسلح‌کننده‌ی ژئوگرید در شکل‌های (۷)، (۸)، (۹)، (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) و برای مسلح‌کننده‌ی مهار- شبکه در شکل‌های (۱۳)، (۱۴)، (۱۵)، (۱۶)، (۱۷) و (۱۸) نشان داده شده است.



شکل (۱۴): نتایج آزمایش بیرون کشش مهار- شبکه / کاملاً ریزدانه



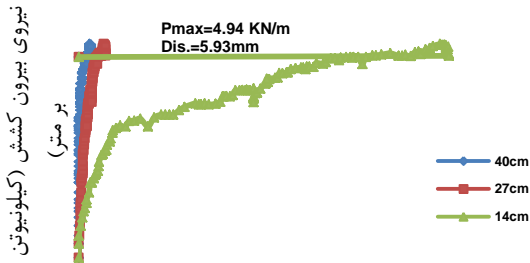
شکل (۱۱): نتایج آزمایش بیرون کشش ژئوگرید (۵ cm پایین و ۹ cm بالا)



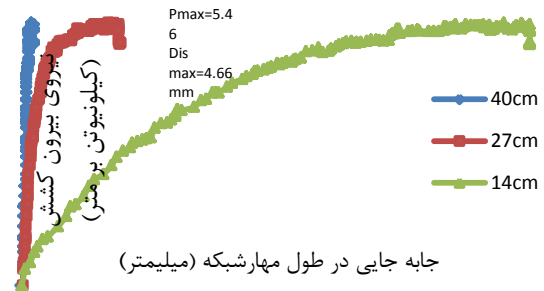
شکل (۱۵): نتایج آزمایش بیرون کشش مهار- شبکه (۵ cm پایین و ۵ cm بالا)



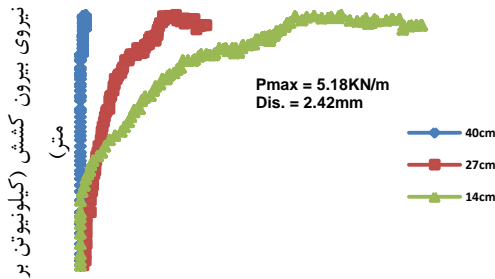
شکل (۱۲): نتایج آزمایش بیرون کشش ژئوگرید (۵ cm پایین و ۱۱ cm بالا)



شکل (۱۶): نتایج آزمایش بیرون کشش مهار- شبکه (۵ cm پایین و ۷ cm بالا)



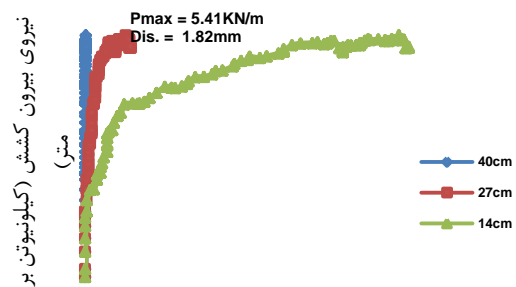
شکل (۱۳): نتایج آزمایش بیرون کشش مهار- شبکه / کاملاً درشت‌دانه



شکل (۱۷): نتایج آزمایش بیرون کشش مهار- شبکه (۵ cm پایین و ۹ cm بالا)



شکل (۱۹): ژئوگرید «در حالت کاملاً درشت‌دانه»
جابه جایی در طول ژئوگرید (میلیمتر)



شکل (۱۸): نتایج آزمایش بیرون کشش مه‌ار- شبکه
جابه جایی در طول مه‌ار- شبکه (میلیمتر)
(۵ cm پایین و ۱۱ cm بالا)

۸- بحث و مقایسه‌ی نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی

نتایج چند آزمایش بیرون کشش که بر روی ژئوگرید معمولی و مه‌ار- شبکه انجام شده است به صورت نمودارهای مقاومت بیرون کشش در برابر جابه‌جایی نقاط مختلف ژئوگرید، ترسیم شده است. به منظور اندازه‌گیری جابه‌جایی ژئوگرید، سه نقطه‌ی جابه‌جایی این سه نقطه با اتصال آنها توسط سیم‌های پوشیده شده در غلاف محکم پلاستیکی به سه عدد گیج با دقت صدم میلی‌متر، ثبت شده است. این سه جابه‌جایی برای هر آزمایش ژئوگرید بر روی یک نمودار رسم شده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود، بر روی نمودارها مقدار بیشینه‌ی نیروی بیرون کشش آن آزمایش، که ژئوگرید مربوط به آن آزمایش قادر به تحمل آن «بدون گسیختگی» بوده است، درج شده است. نتایج کلی که از تحلیل عددی و آزمایشگاهی این مسلح‌کننده‌ها به دست آمده، عبارت است از:

- استفاده از مه‌ار- شبکه از این لحاظ که مقاومت بیرون کشش بیشتری در ازای جابه‌جایی کمتر در طول خود دارد، به صرفه‌تر است.

- استفاده از نرم افزار پلکسیز تری- دی تونل روش مناسبی برای بررسی روند نتایج آزمایشگاهی است، ولی نتایج آن به تنهایی قابل اطمینان نیست.

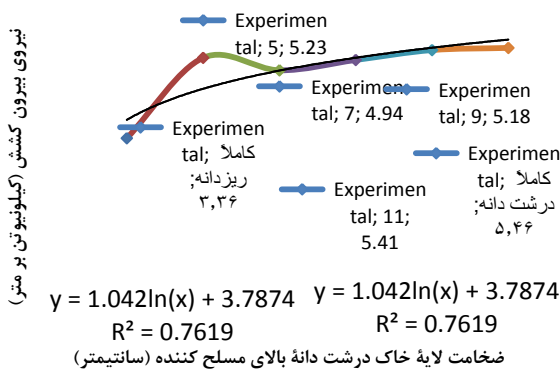
- روند تغییرات مقاومت بیرون کشش هر دو مسلح‌کننده با استفاده از تحلیل عددی، انطباق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی دارد، به جز مواردی که یا حاکی از محدودیت‌های این نرم افزار است و یا ناشی از خطاهای آزمایشگاهی است.

- بطور کلی می‌توان گفت که در هر آزمایش میزان جابه‌جایی ابتدای مسلح‌کننده نسبت به نقاط میانی و انتهای آن در خاک، بیشتر است. علت این مسأله آن است که با وارد آمدن نیروی بیرون کشش به مسلح‌کننده‌ی مدفون در خاک، در ابتدا نقاط ابتدایی آن که به گیره نزدیک‌ترند، نیرو می‌گیرند و این نیرو این نقاط را به حرکت درمی‌آورد و نهایتاً این نقاط پس از وارد آمدن نیرو، با ذرات خاک درگیر می‌شوند. با توجه به نمودارها، نقاط

۷- نتایج به دست آمده از تحلیل عددی

با انجام مطالعات عددی با استفاده از نرم‌افزار پلکسیز تری- دی تونل بر روی ژئوگرید معمولی و مه‌ار- شبکه‌ی ساخته شده با آن، نتایجی در قالب نمودارهای مقایسه‌ای با نتایج تجربی ارائه شده است. در شکل (۱۹) نمونه‌ای از رفتار کلی ژئوگرید و مه‌ار- شبکه در تحلیل عددی با استفاده از این نرم‌افزار نشان داده شده است. با توجه به این شکل، واضح است که رفتار این مسلح‌کننده‌ها با تقریب مناسبی به رفتار واقعی آنها که از نتایج آزمایش بیرون کشش بر روی آنها مشخص می‌شود، نزدیک است. تفاوت محسوسی که در این نمودارها دیده می‌شود سختی این نمودارها نسبت به نمودارهای نتایج حاصل از آزمایش بیرون کشش است.

با توجه به اینکه در این تحلیل قصد بر این است که با استفاده از تحلیل عددی مشخص شود که آیا مسلح‌کننده‌های مزبور در این نوع مدل‌سازی از داخل خاک بیرون کشیده می‌شوند یا خیر، رفتار کلی آنها از نتایج تحلیل عددی مد نظر است. البته در مواردی بسته به مقدار پارامترهایی که در قسمت ورودی این نرم‌افزار وارد شده است، این نمودارها دچار تغییرات مختلفی می‌شوند. مقدار پارامتر ضریب سطح مشترک خاک و ژئوگرید، که در ورودی این نرم‌افزار با R تعریف می‌شود، با استفاده از آزمایش تعیین نشده است و مقدار آن فرضی 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 نمود.



شکل (۲۱): نمودار نیرو- ضخامت درشت‌دانه‌ی بالای مهار- شبکه

- با مقایسه‌ی نمودارهای مربوط به ژئوگرید معمولی، می‌توان گفت که هر چقدر میزان ضخامت خاک درشت‌دانه‌ی اطراف ژئوگرید بیشتر شود، مقدار مقاومت بیرون‌کشش آن افزایش می‌یابد. البته این مقدار افزایش تابع ضخامت لایه‌ی خاک درشت‌دانه است. از طرفی، مقدار جابه‌جایی ثبت شده‌ی هر نقطه از ژئوگرید به ازای حداکثر مقاومت بیرون‌کشش آن نقطه، با افزایش ضخامت درشت‌دانه‌ی اطراف ژئوگرید، کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن است که با افزایش ضخامت درشت‌دانه، به علت افزایش تنش اصطکاکی بر روی صفحه‌ی ژئوگرید، مقدار جابه‌جایی کمتری از خود نشان می‌دهد.

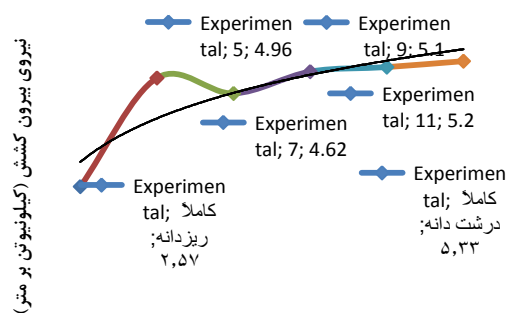
- با مقایسه‌ی نمودارهای مربوط به مهار- شبکه نیز می‌توان به نتایج مشابه فوق رسید. البته این تغییرات نیرو روند متعادلی دارد و از این نظر که تغییرات تا حد زیادی قابل ملاحظه نیستند می‌توان گفت که نیروهای جذب شده توسط کلیه‌ی ژئوگریدها تقریباً میزان ثابتی دارد و به طور میانگین برای ژئوگرید معمولی برابر $4/78 \text{ kPa}$ و برای مهار- شبکه برابر $5/09 \text{ kPa}$ است.

- در یک مقایسه‌ی کلی بین نمودارهای مهار- شبکه و ژئوگرید معمولی می‌توان گفت که میزان حداکثر نیروی بیرون‌کشش در مهار- شبکه نسبت به ژئوگرید معمولی افزایش یافته ولی میزان جابه‌جایی در راستای مسلح‌کننده به ازای این نیرو، در مهار- شبکه نسبت به ژئوگرید معمولی کاهش یافته است.

- در نمودارهای شکل‌های (۲۲) و (۲۳)، مقایسه‌ای بین رفتار مقاومتی این دو نوع مسلح‌کننده در برابر نیروی بیرون‌کشش، برای دو حالت تحلیل آزمایشگاهی و عددی، نشان داده شده است. این نمودارها برای حالتی ترسیم شده‌اند که ضخامت خاک درشت‌دانه‌ی اطراف مسلح‌کننده‌ها به صورت 5 cm پایین و 11 cm بالای صفحه‌ی مسلح‌کننده است.

انتهایی مسلح‌کننده پس از نقاط ابتدایی، نیرو کسب می‌کند و نیز میزان جابه‌جایی کمتری نسبت به نقاط ابتدایی دارد.

- با توجه به نمودارهای ترسیم شده، 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 می‌یابد. به این دلیل که مقدار اختلاف مقاومت در حالتی که ضخامت لایه‌ی خاک درشت‌دانه‌ی بالای مسلح‌کننده‌ها 5 cm است با حالتی که جعبه‌ی آزمایش کاملاً با خاک درشت‌دانه پر شده است، در مقایسه با اختلاف این مقاومت با حالتی که جعبه‌ی آزمایش کاملاً با خاک ریزدانه پر شده است، ناچیز است، به همین دلیل در این تحقیق ضخامت 5 cm برای محصور کردن لایه‌ی بالایی مسلح‌کننده‌ها، در شرایط گفته‌شده آزمایشگاهی، به عنوان ضخامت بهینه انتخاب شده است. البته می‌باید خاطر نشان کرد که مقاومت بیرون‌کشش مسلح‌کننده‌ها در سایر ضخامت‌ها تغییر چندانی نسبت به ضخامت 5 cm نداشته و این مسأله متأثر از عوامل مختلفی است که از آن جمله می‌توان به محصور شدن خاک توسط مرزها و نیز ابعاد متوسط دستگاه آزمایش اشاره نمود. اختلاف مقاومت بیرون‌کشش مسلح‌کننده‌ها با دو حالت کاملاً ریزدانه و کاملاً درشت‌دانه به طور مشخص در شکل‌های (۲۰) و (۲۱) نشان داده شده است.



$$y = 1.3851\ln(x) + 3.1112 \quad R^2 = 0.7817$$

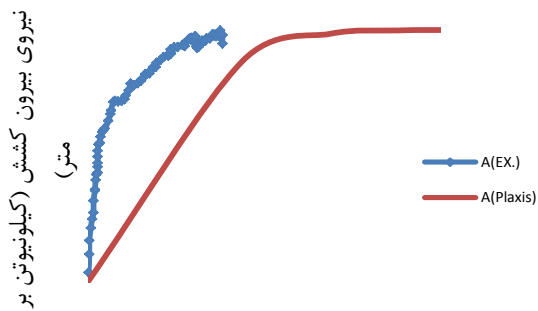
$$y = 1.3851\ln(x) + 3.1112 \quad R^2 = 0.7817$$

ضخامت لایه‌ی خاک درشت‌دانه‌ی بالای مسلح‌کننده (سانتیمتر)

$$y = 1.3851\ln(x) + 3.1112 \quad R^2 = 0.7817$$

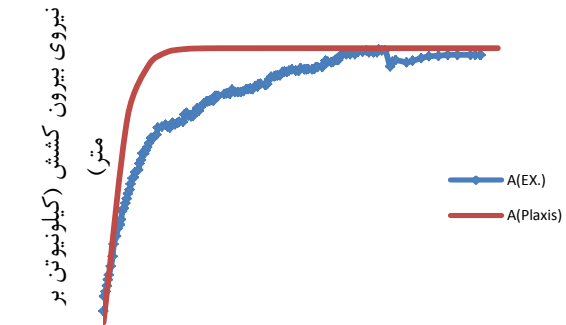
$$y = 1.3851\ln(x) + 3.1112 \quad R^2 = 0.7817$$

شکل (۲۰): نمودار نیرو- ضخامت درشت‌دانه‌ی بالای ژئوگرید



جابه جایی در طول مهار شبکه (میلی متر)

الف) نمودار مقایسه‌ای تحلیل عددی و تجربی مهار - شبکه برای نقطه‌ی ۱۴ cm از ابتدا



جابه جایی در طول ژئوگرید (میلی متر)

الف) نمودار مقایسه‌ای تحلیل عددی و تجربی ژئوگرید برای نقطه - ی ۱۴ cm از ابتدا



جابه جایی در طول مهار شبکه (میلی متر)

ب) نمودار مقایسه‌ای تحلیل عددی و تجربی مهار - شبکه برای نقطه‌ی ۲۷ cm از ابتدا



جابه جایی در طول ژئوگرید (میلی متر)

ب) نمودار مقایسه‌ای تحلیل عددی و تجربی ژئوگرید برای نقطه‌ی ۲۷ cm از ابتدا



جابه جایی در طول مهار شبکه (میلی متر)

پ) نمودار مقایسه‌ای تحلیل عددی و تجربی مهار - شبکه برای نقطه‌ی ۴۰ cm از ابتدا
شکل (۲۳): نتایج مقایسه‌ی تحلیل عددی و تجربی مهار - شبکه (۵ cm پایین و ۱۱ cm بالا)



جابه جایی در طول ژئوگرید (میلی متر)

پ) نمودار مقایسه‌ای تحلیل عددی و تجربی ژئوگرید برای نقطه‌ی ۴۰ cm از ابتدا
شکل (۲۲): نتایج مقایسه‌ی تحلیل عددی و تجربی ژئوگرید (۵ cm پایین و ۱۱ cm بالا)

- [۹] Bergado, D.T., Chai, J. C., Abiera, H. O. Alfaro, M. C. and Balasubramaniam, A. S., "Interaction between Cohesive- Frictional Soil and Various Grid Reinforcements", *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, Vol.12: pp. 327 – 349, 1993.
- [۱۰] Bergado, D.T., Bukkanasuta, A. and Balasubramaniam, A. S., "Laboratory Pull-Out Tests Using Bamboo and Polymer Geogrids Including a Case Study", *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 5: pp. 153– 189, 1987.
- [۱۱] Palmeira, E. M., Milligan, G. E., "Large Scale Direct Shear Tests on Reinforced Soil", *Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 29 (1): pp. 18- 30, 1989.
- [۱۲] Farrag, Kh. and Acar, Y. B. ,Juran, I., "Pull-Out Resistance of Geogrid Reinforcements", *Geotextile and Geomembrane*,12: pp. 133-159, 1991.
- [۱۳] 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, Alexandria, Egypt*: pp. 909- 912, October, 2009.
- [۱۴] Feng X., Yang Q., Li S., "Pullout Behavior of Geogrid in Red Clay and the Prediction of Ultimate Resistance", *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Volume 13, Bundle J*: pp. 1- 17, 2008.
- [۱۵] Arjomand, M. A. and Abdi, M. R. and Sadrnejad, S. A., "Clay Reinforcement Using Geogrid Embedded In Thin Layers of Sand", *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 7, No. 4: pp. 224- 235, 2009.
- با توجه به این نمودارها دیده می‌شود که نتایج تحلیل عددی و تجربی انطباق قابل قبولی با یکدیگر دارند. در این تحقیق سعی شده است تا آنجا که امکان دارد شرایط مدلسازی به واقعیت نزدیک باشد. اختلافاتی که در نتایج این دو نوع تحلیل وجود دارد به دلیل خطاهای آزمایشگاهی و قطعی نبودن روند نتایج تحلیل عددی با نرم‌افزار مورد استفاده است.
- ### ۹- مراجع
- [۱] عبدی، محمود رضا، و ارجمند، محمد علی، "ارزیابی بهبود مقاومت برشی خاک رس مسلح شده در سیستم ساندیویچی"، هشتمین کنگره‌ی بین‌المللی مهندسی عمران، ایران: دانشگاه شیراز، ۱۳۸۸.
- [۲] مصلی نژاد، منصور، "بررسی نحوه‌ی افزایش ظرفیت باربری سطحی خاک‌های دانه‌ای با استفاده از مهار شبکه (گرید انکر)"، پایان‌نامه‌ی دکترا در رشته‌ی مهندسی عمران (مکانیک خاک و پی)، دانشگاه شیراز، شیراز، ۱۳۸۷.
- [۳] صدر، عبدالله، "بررسی مقاومت بیرون کشیدگی (Pull- out) مهار- شبکه (Grid- Anchor) در خاک‌های ماسه‌ای"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد در رشته‌ی مهندسی عمران (مکانیک خاک و پی)، دانشگاه شیراز، شیراز، ۱۳۸۶.
- [۴] عبدی، محمود رضا، و ارجمند، محمد علی، "ارزیابی بهبود مقاومت برشی خاک رس مسلح شده در سیستم ساندیویچی"، هشتمین کنگره‌ی بین‌المللی مهندسی عمران، ایران: دانشگاه شیراز، ۱۳۸۸.
- [۵] مصلی نژاد، منصور، "بررسی نحوه‌ی افزایش ظرفیت باربری سطحی خاک‌های دانه‌ای با استفاده از مهار شبکه (گرید انکر)"، پایان‌نامه‌ی دکترا در رشته‌ی مهندسی عمران (مکانیک خاک و پی)، دانشگاه شیراز، شیراز، ۱۳۸۷.
- [۶] Pull- out, Grid- Anchor, ASTM D 4439- 04, "Standard Terminology for Geosynthetics".
- [۷] Saran, Swami; "Reinforced soil and its Engineering Applications", I.K. International Pvt. Ltd., New Delhi, 2005.
- [۸] Sieira, A.C.C.F., Gerscovich, D.M.S. and Sayão, A.F.S.J, "Displacement and load transfer mechanisms of geogrids under pullout condition", *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, Vol.27: pp. 241 – 253, 2009.

۱۰- زیرنویس ها

-
- ^۱ Pull- Out
 - ^۲ Grid- Anchor
 - ^۳ Plaxis 3D Tunnel
 - ^۴ LVDT
 - ^۵ Clamp
 - ^۶ Plates
 - ^۷ Interface
 - ^۸ Coarse