

ارزیابی استاتیکی و چندمرحله‌ی مقاومت بیرون‌کشش ژئوسل‌ها در خاک‌های دانه‌ی

علی‌نمای کهل (دانشجوی دکتری)

علیرضا اردکانی* (دانشیار)

محمود حسلو راد (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۱ (دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۱۳۰-۱۳۱، پژوهشی)

به منظور بررسی رفتار بیرون‌کششی استاتیکی و چندمرحله‌ی ژئوسل‌ها در خاک‌های دانه‌ی، یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی به وسیله‌ی دستگاه بیرون‌کشش بزرگ‌مقیاس انجام شده است. آزمایش‌های بیرون‌کششی سرعت ثابت و چندمرحله‌ی به ترتیب برای بررسی رفتار استاتیکی، تناوبی و پساتناوبی ژئوسل مدفون در خاک‌های دانه‌ی ترتیب داده شده است. مقاومت بیرون‌کشش نهایی به دست آمده از آزمایش بیرون‌کشش، شامل: مؤلفه‌های متفاوتی است که هر یک از آن‌ها توسط یک روش تئوری محاسبه شده است. در نهایت مشاهده شد که رفتار بار بیرون‌کشش - جابه‌جایی ژئوسل‌ها به صورت سخت‌شونده بوده است که مقدار آن وابسته به مؤلفه‌ی مقاومت پاسیو و اصطکاکی بسیج شده است. همچنین مقاومت بیرون‌کشش نهایی پساویکی به دلیل شکسته یا ضعیف شدن برخی از قفل و بست‌ها بین دانه‌های مصالح پُرکننده و خاک اطراف در هنگام حرکت رفت و برگشتی فاز سیکیلی، کمتر از مقاومت نهایی استاتیکی بوده است.

واژگان کلیدی: ژئوسل، مقاومت بیرون‌کشش، خاک دانه‌ی، آزمایش استاتیکی، آزمایش چندمرحله‌ی.

۱. مقدمه

روش‌های مختلفی برای بهسازی مسائل ژئوتکنیکی ارائه می‌شود که شامل: استفاده از پی‌های عمیق، جایگزین خاک، پیش‌بارگذاری و زهکشی قائم، ستون‌های سنگی، اصلاح شیمیایی، تسلیح خاک و غیره می‌شود. در میان روش‌های مذکور، تسلیح خاک یکی از روش‌های مرسوم به حساب می‌آید. در مطالعات اولیه، از مفهوم مسلح کردن خاک توسط المان‌های فازی استفاده شده است. مسلح‌سازی توسط ژئوسل، یک المان سه‌بعدی، پلیمری و لانه‌زنبوری است که در چند دهه‌ی گذشته گسترش یافته است. ژئوسل‌ها به عنوان یک روش اقتصادی با نحوه‌ی اجرای ساده محسوب می‌شوند که توانایی به کارگیری در هر نوع شرایط آب و هوایی برای بهسازی پی‌ها، خاکریزها، جاده‌ها و دیوارهای حائل را دارند.^[۱-۳]

مکانیزم تسلیح ژئوسل‌ها به سه مؤلفه تقسیم می‌شود: الف) اثر برشی: اصطکاک بین دیواره‌ی سلول‌های ژئوسل و دانه‌های خاک مصالح پُرکننده که یک تنش برشی قائم در جدار سلول تشکیل می‌دهد و در مقابل بار قائم مقاومت می‌کند؛ ب) اثر مقاومت جانبی: اندرکنش مصالح پُرکننده‌ی ژئوسل با خاک بستر و جلوگیری از تغییرمکان جانبی ژئوسل توسط مقاومت پاسیو ایجاد شده در هر سلول، ج) توزیع بار در سطحی گسترده‌تر: این المان‌ها بار سطحی وارد شده را در عمق قرارگیری

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۲۰، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۲/۲۱، پذیرش ۱۴۰۰/۱۲/۲۴.

DOI:10.24200/J30.2022.59660.3065

namaeiali@yahoo.com
a.ardakani@eng.ikiu.ac.ir
hassanlou@eng.ikiu.ac.ir

خود در سطح بیشتری توزیع می‌کنند و به دلیل صلبیت بالا، بخشی از تغییرشکل خمیری را تحمل می‌کنند.^[۴] این مکانیزم باعث می‌شود تا با کاهش تدریجی بار وارده، تغییرشکل دائمی کمتری در سطح تماس خاک و ژئوسل ایجاد شود و در نتیجه، ظرفیت باربری خاک زیرالمان افزایش یابد. مانجو و لاتا^[۱ (۲۰۱۳)]، با استفاده از یک سری آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس اصلاح شده، مقاومت برشی بین ژئوسل با مصالح پُرکننده‌ی ماسه‌ی را بررسی کردند و دریافتند که در حضور ژئوسل، مقاومت برشی خاک بستر با مصالح پُرکننده‌ی ژئوسل در اثر محصورشدگی ناشی از وجود ژئوسل افزایش می‌یابد که افزایش مقاومت برشی مذکور، خود را به صورت یک چسبندگی ظاهری در پوش‌های گسیختگی نشان داده است.^[۵] توکلی و مترجمی^[۶ (۲۰۱۸)]، رفتار اندرکنشی ماسه و شن مسلح شده با ژئوسل را توسط آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس بررسی و پیشنهاد کردند تا از ژئوسل در تنش‌های قائم کم و با مصالح درشت‌دانه استفاده شود. ایشان نشان دادند که با افزایش اندازه‌ی ذرات، مقاومت سطح مشترک مصالح پُرکننده‌ی ژئوسل با مصالح پُرکننده بیشتر می‌شود، که این اثر افزایشده به طور قابل توجهی از اثر افزایشده‌ی افزایش تراکم خاک در مقاومت برشی سطح مشترک بیشتر بوده است. در نهایت، آن‌ها پیشنهاد کردند که نسبت بعد سلول ژئوسل به اندازه‌ی متوسط دانه‌ها در حدود عدد ۴ باشد که این عدد بیشترین مقاومت برشی را ارائه داده است. همچنین ایشان یک چسبندگی ظاهری در پوش‌های گسیختگی مشاهده کردند که آن را ناشی از

استفاده شده است، تا سهم هر یک از مؤلفه‌های اخیر در مقاومت نهایی بیرون‌کشش ژئوسل در نظر گرفته شود.

۲. روش آزمایش

۲.۱. دستگاه آزمایش

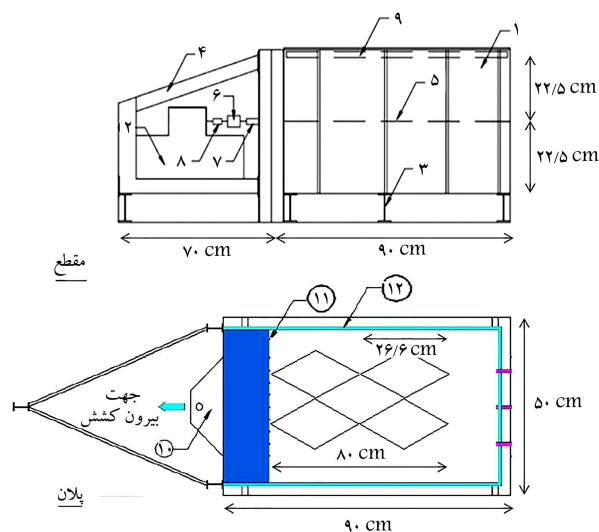
برای مطالعه‌ی آزمایشگاهی حاضر از دستگاه بیرون‌کششی موجود در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (فروزین) استفاده شده است. جعبه‌ی دستگاه، ابعادی برابر $90 \times 50 \times 50$ سانتی‌متر داشته و ضخامت ورق‌های تشکیل‌دهنده‌ی جداره‌ها برابر ۱۵ میلی‌متر بوده است. عملکرد کنترل در دستگاه مذکور از نوع حلقه‌ی بسته بوده است. با استفاده از عملگر الکترومکانیکی و سیستم‌های کنترل خودکار، نیروی موردنظر به مسلح‌کننده، که به‌طور کششی وارد شده است، با ظرفیت $2/5$ تن و با دقت $1/0 \pm$ محاسبه شده است. همچنین مقادیر تغییرمکان نمونه توسط جابه‌جایی سنج موجود بر روی عملگر با ظرفیت ۷۵ میلی‌متر و با دقت $1/0 \pm$ گزارش شده است. عملگر الکترومکانیکی مذکور، هم قابلیت اعمال بار به صورت کنترل تنش و هم به صورت کنترل کرنش را دارد. عملگر دستگاه نیز توسط یک گیربکس، امکان اعمال نیروی رفت و برگشتی را به صورت سینوسی و کنترل تنش تا بسامد 10^0 هرتز فراهم می‌سازد. نیروی قائم را نیز می‌توان توسط یک کیسه‌ی هوا موجود در بالای نمونه تا بیشینه‌ی ۷۵ کیلوپاسکال به نمونه‌ها اعمال کرد (شکل‌های ۱ و ۲).

۲.۲. مصالح خاکی و ژئوسل

جهت انجام مطالعه‌ی حاضر، از ماسه‌ی سیلیسی که در صنعت ریخته‌گری و سند بلاست استفاده می‌شود، استفاده شده است. ماسه از شرکت صنایع ریخته‌گری در کیسه‌های 50 کیلوگرمی تهیه شده است. همچنین از دو نوع شن شکسته‌ی سیلیسی با ابعاد دانه‌های متفاوت برای بررسی رفتار بیرون‌کششی در شن‌ها استفاده شده است. به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، آزمایش‌های آزمایشگاهی،

محصورکنندگی ژئوسل دانستند. در کنار مطالعات اخیر برش مستقیم، مطالعاتی هم توسط آزمایش بیرون‌کشش جهت بررسی مقاومت بیرون‌کشش و مکانیزم تسلیح ژئوسل‌ها انجام داده‌اند.^[۶] بیابانی و همکاران (۲۰۱۶)، مقاومت بیرون‌کشش بالاست خطوط ریلی مسلح شده با ژئوسل را توسط یک دستگاه ابداعی بررسی کردند و نشان دادند که رفتار المان ژئوسل وابسته به مکانیزم بارگذاری، ضریب اصطکاک و سختی ژئوسل است. همچنین نشان دادند که مقاومت پاسیو بسیج شده در سلول‌های ژئوسل، زمانی که تحت بار بیرون‌کشش قرار می‌گیرند، بیشتر از مقاومت پاسیو بسیج شده در آزمایش برش مستقیم است، که به دلیل فعال شدن مکانیزم‌های متفاوت تسلیح ژئوسل در هر کدام از آزمایش‌های مذکور است.^[۷] ایسیک و گورباز (۲۰۲۰)، رفتار بیرون‌کشش ژئوسل‌ها را در یک ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده توسط دستگاه بیرون‌کشش اصلاح شده بررسی کردند. هدف مطالعه‌ی ایشان تعیین تأثیر ابعاد، تعداد سلول‌ها، آرایش سلول‌ها و سختی ژئوسل در مقاومت بیرون‌کشش ژئوسل بوده است. همچنین در نهایت یک روش تحلیلی برای محاسبه‌ی اثر محصورشدگی ارائه کردند و دریافتند که با افزایش طول ژئوسل و سختی آن، مقاومت بیرون‌کشش ژئوسل افزایش می‌یابد. هر چند افزایش سختی به شدت وابسته به ضخامت، عرض و تنش قائم وارد شده است. همچنین مشاهده کردند که فقط با افزایش تعداد سلول‌ها به ۳ عدد در طول ژئوسل، افزایش مقاومت بیرون‌کشش افزایش می‌یابد.^[۸]

فخاریان و پیلان (۲۰۲۱)، نیز مقاومت بیرون‌کشش ژئوسل‌های معمولی و تقویت‌شده را در یک خاک ماسه‌ی ارزیابی کردند و دریافتند که هر دو مقاومت بیرون‌کشش نهایی و سختی ژئوسل‌های تقویت شده به مقدار قابل توجهی بیشتر از نمونه‌های معمولی بوده است. علاوه بر این، آن‌ها سه مدل فیزیکی برای بررسی ظرفیت باربری پی مستقر بر روی خاک مسلح شده با ژئوسل معمولی و تقویت شده طراحی کردند. نتایج بار - نشست مدل‌های فیزیکی مذکور حاکی از برتری ژئوسل‌های تقویت‌شده در بهسازی ظرفیت باربری پی‌ها در قیاس با ژئوسل‌های معمولی بود.^[۹] جمع‌بندی مطالعات اخیر نشان داد که در سال‌های گذشته، رفتار استاتیکی ژئوسل‌ها به‌صورت محدود مطالعه شده است، ولی همچنان اثر پارامترها در مقاومت بیرون‌کشش استاتیکی ژئوسل مشاهده نشده است. یکی از پارامترهای مذکور، اندازه‌ی ذرات دانه‌های خاک است، که می‌تواند در مکانیزم‌های تسلیح ژئوسل مثل مقاومت جانبی و اثر برشی تأثیر بسزایی داشته باشد. از طرفی دیگر، تمام مطالعات اخیر، مقاومت بیرون‌کشش و رفتار اندرکنشی ژئوسل‌ها را تحت بارهای استاتیکی ارزیابی کرده‌اند؛ ولی از آنجا که یک سازه می‌تواند در طول عمر خود تحت تأثیر بارهای چندمرحله‌ی قرار گیرد، رفتار بیرون‌کشش سیکلی و پساسیکلی ژئوسل‌ها همچنان باید مورد بحث قرار گیرد. با توجه به اینکه مقاومت بیرون‌کشش ژئوسل‌ها در طراحی و استفاده از آن‌ها در پروژه‌های خاک مسلح، اهمیت ویژه‌ی دارد، مطالعه‌ی حاضر می‌تواند کمک شایانی در این زمینه کند. بنابراین جنبه‌ی نوآوری مطالعه‌ی حاضر به این صورت خلاصه شده است: (۱) بررسی رفتار استاتیکی بیرون‌کششی ژئوسل‌های ساخت داخل کشور در خاک‌های دانه‌ی با در نظر گرفتن اثر اندازه‌ی دانه‌ها توسط دستگاه بیرون‌کششی، (۲) بررسی رفتار سیکلی و پساسیکلی بیرون‌کشش ژئوسل‌های مذکور. برای دستیابی به اهداف اشاره شده در مطالعه‌ی حاضر: (۱) هجده آزمایش استاتیکی بیرون‌کشش ژئوسل‌های موجود در بازار ایران با ابعاد استفاده‌شده در پروژه‌ی عملی با در نظر گرفتن اثر اندازه‌ی ذرات سه خاک ماسه‌ی و شنی انجام شده است، (۲) شش آزمایش چند مرحله‌ی بیرون‌کشش بر روی ژئوسل‌ها در خاک‌های ذکر شده انجام شد تا رفتار سیکلی و پساسیکلی بیرون‌کشش ژئوسل‌ها بررسی شود. (۳) همچنین از یک روش تئوری برای محاسبه‌ی هر کدام از مؤلفه‌های تسلیح ژئوسل



شکل ۱. شکل شماتیک دستگاه شامل: (۱) دستگاه بیرون‌کشش؛ (۲) عملگر؛ (۳) بستر دستگاه؛ (۴) قاب عکس‌العمل؛ (۵) ژئوسل، (۶) نیروسنج؛ (۷) گیره؛ (۸) جابه‌جایی سنج؛ (۹) کیسه‌ی هوا؛ (۱۰) گیره؛ (۱۱) غلاف فلزی؛ (۱۲) صفحات شیشه‌ی.

جدول ۲. مشخصات ژئوسل استفاده شده.

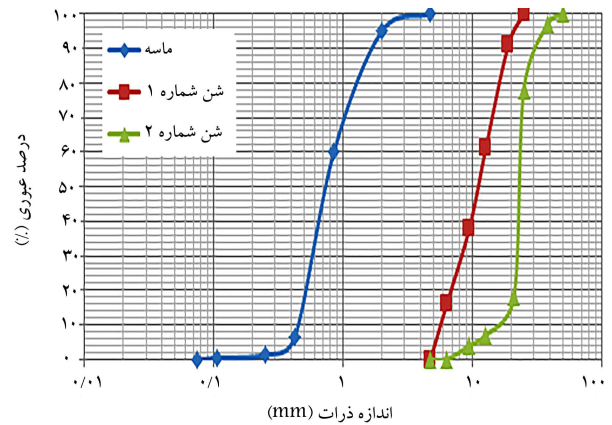
پارامتر	مقدار
ابعاد هر سلول (mm × mm)	۲۶۰ × ۲۱۰
ارتفاع (mm)	۱۰۰،۵۰
مقاومت کششی نهایی در جهت طولی برای ژئوسل با دو ارتفاع مختلف (kN/m)	۶/۴، ۳/۴
مقاومت کششی نهایی در جهت عرضی برای ژئوسل با دو ارتفاع مختلف (kN/m)	۲/۶، ۱/۵
مقاومت برشی در محل گره (kN)	۳/۱۶، ۱/۸۲
کرنش گسیختگی (%)	۱۰۰



شکل ۲. دستگاه بیرون کشش استفاده شدهی مصالح خاکی و ژئوسل.

جدول ۱. مشخصات مصالح خاکی آزمایش شده.

پارامتر	GP۲	GP۱	SP
G_s	۲/۷	۲/۸۶	۲/۶۵
D_r (%)	۷۰	۷۰	۷۰
$\gamma_{dm\ max}$ (ton/m ^۳)	۲/۲۴	۲/۱۴	۱/۲۶
γ_{dmin} (ton/m ^۳)	۲/۰۶	۱/۹۲	۱/۳۷
γ_d (ton/m ^۳)	۱/۵۴	۲/۰۸	۲/۱۸
Φ (درجه)	۴۵/۶	۴۲/۲	۳۷/۸



شکل ۳. دانه بندی مصالح خاکی.

مصالح ماسه‌یی با نام SP، شن با اندازه‌ی ذرات ریز با نام GP۱ و شن با اندازه‌ی ذرات درشت‌تر با نام GP۲ استفاده شده است. ژئوسنتتیک‌های استفاده شده در پژوهش حاضر از نوع ژئوسل هستند که توسط شرکت انرژی عناصر آینده‌ی ژئوساخت در بازار عرضه می‌شوند. ژئوسل‌های مذکور از نورهای پلی اتیلن با ضخامت ۱/۵۲ میلی‌متر، که در محل گره توسط جوش حرارتی به یکدیگر متصل شده‌اند، ساخته شده‌اند. مشخصات مکانیکی و هندسی ژئوسل استفاده شده که توسط سازنده بررسی شده است، در جدول ۲ ارائه شده است. در مطالعه‌ی حاضر، از ژئوسل‌های موجود در بازار ایران استفاده شده است. ابعاد سلول‌های ژئوسل مطابق پروژه‌های انجام شده در کشور انتخاب شده است، تا بتوان از نتایج مطالعه‌ی حاضر در پروژه‌های عملی نیز استفاده کرد.

۳.۲. نمونه سازی

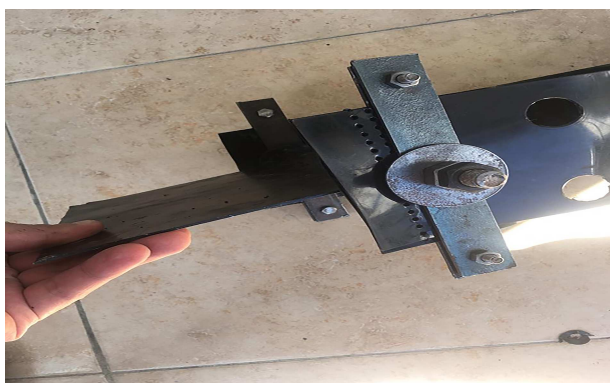
ابتدا وزن‌های مخصوص بیشینه و کمینه‌ی سه خاک بدانه بندی شده توسط ارتعاش و استانداردهای ASTM D۴۲۵۳ و ASTM D۴۲۵۴ محاسبه شده است. [۱۳،۱۲] برای رسیدن به چگالی نسبی ۷۰٪ برای هر کدام از مصالح خاکی، مقدار وزن موردنیاز برای رسیدن به چگالی نسبی موردنظر براساس وزن مخصوص‌های بیشینه و کمینه‌ی هر کدام از خاک‌ها محاسبه و در سطل‌های ۲۰ کیلوگرمی به صورت بارش خشک ریخته شده است. همچنین براساس نتایج آزمایش‌های اخیر مشخص شد که برای رسیدن به چگالی نسبی ۷۰٪، باید ارتفاع هر لایه از SP، GP۱ و GP۲ به ترتیب برابر ۳، ۲/۵ و ۲ سانتی‌متر باشد. بر این اساس، مصالح خاکی هر سطل درون دستگاه ریخته و توسط ویبراتور متراکم شدند تا به ارتفاع محاسبه شده برای یک لایه‌ی ۲۰ کیلوگرمی برسند. برای اطمینان از چگالی نسبی هر لایه‌ی ماسه، یک آزمایش مخروط ماسه‌یی صورت پذیرفته است. در لایه‌های شنی نیز با تکرار روند

شامل: دانه بندی و برش مستقیم انجام شده است. با توجه به دانه بندی و بر اساس طبقه بندی متحد، شن و ماسه‌ها به ترتیب در رده‌های GP و SP طبقه بندی می‌شوند. خاک‌های مذکور در بسیاری از مطالعات پیشین نیز برای مدل سازی فیزیکی دیوار حائل مسلح شده با ژئوسل و یا ارزیابی آزمایش بیرون کشش ژئوسل استفاده شده است. [۱۰،۱۱] همچنین دانه بندی خاک‌های اشاره شده براساس استاندارد NCMA به گونه‌یی تعیین می‌شوند که برای خاکریز خاک مسلح، مناسب باشند. در جدول ۱، مشخصات مصالح خاکی آزمایش شده ارائه شده‌اند.

مقادیر اخیر با استفاده از یک سری آزمون‌های پایه، شامل: برش مستقیم کوچک مقیاس برای محاسبه‌ی زاویه‌ی اصطکاک، آزمایش‌های بیشینه و کمینه‌ی وزن مخصوص و آزمایش توده‌ی ویژه به دست آمده‌اند. در شکل ۳، نیز دانه بندی مصالح خاکی آزمایش شده مشاهده می‌شود. در مطالعه‌ی حاضر، برای سهولت نمادها،



شکل ۵. گیره‌ی طراحی شده و متصل شده به ژئوسل.



شکل ۶. محل اتصال گیره و ژئوسل.



شکل ۷. اتصال گیره به جک هیدرولیک.



شکل ۸. ژئوسل پر شده از مصالح دانه‌یی.

آخر کیسه‌ی هوا بر روی نمونه جهت اعمال سربار قرار گرفت و درب دستگاه قبل از اعمال فشار توسط ۶ پیچ فولادی بسته شد.

برای مطالعه‌ی رفتار بیرون‌کشش استاتیکی ژئوسل از شرایط جابه‌جایی با سرعت ثابت استفاده شده است. در شرایط مذکور، نیروی بیرون‌کشش به شکل جابه‌جایی



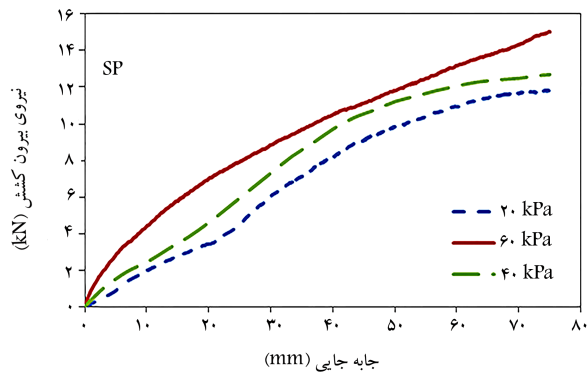
شکل ۴. قرارگیری ژئوسل روی نیمه‌ی پایینی مصالح خاکی.

و بیره و اطمینان از رسیدن به ارتفاع موردنظر برای هر لایه، از چگالی نسبی 70% کنترل صورت گرفته است. در نهایت آزمایش به این ترتیب تکمیل شده است:

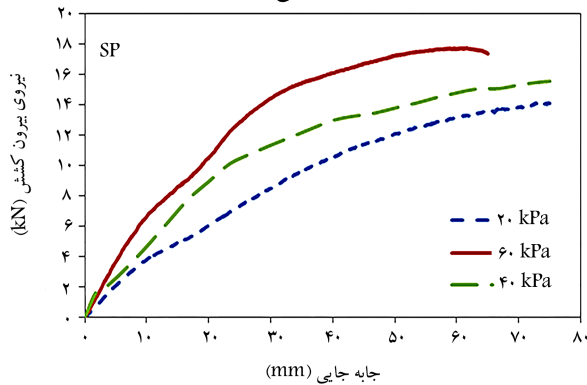
- ابتدا نیمه‌ی پایین دستگاه از ۷ لایه SP، ۹ لایه GP۱ و ۱۰ لایه GP۲ پر شد. سپس با رسیدن به ارتفاع نیمه‌ی دستگاه، یک لایه ژئوسل با طول 80° و عرض 40° سانتی‌متر بر روی مصالح خاکی به صورت افقی قرار گرفت (شکل ۴). ابعاد ذکر شده طبق استاندارد ASTM D۶۷۰۶ که دست‌کم نسبت طول به عرض ژئوسنتتیک را مساوی ۲ توصیه می‌کند، انتخاب شده است. [۱۴] همچنین برای کاهش آثار مرزی، از یک فاصله‌ی ۷۵ میلی‌متری از کناره‌های ژئوسل تا دیواره‌های دستگاه استفاده شده است.

- از آنجایی که ژئوسل‌ها، یک هندسه‌ی سه‌بُعدی دارند، از گیره‌های ژئوسنتتیک‌های دو بُعدی جهت اتصال به جک هیدرولیکی برای این آزمایش نمی‌توان استفاده کرد. بنابراین یک گیره‌ی جدید طراحی شد تا ژئوسل را به جک هیدرولیکی دستگاه متصل کند. گیره‌ی جدید در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، که شامل یک ورق آهنی با ضخامت $2/5$ میلی‌متری است که به یک لوله‌ی ۱۲ میلی‌متری جوش داده شده است. هر دو بال ژئوسل در قسمت جلویی به گیره‌ی اشاره شده توسط یک پیچ 10° میلی‌متری متصل شده است. برای جلوگیری از پارگی ژئوسل در قسمت اتصال در هنگام آزمایش به علت تمرکز تنش، دو صفحه‌ی فولادی به ضخامت ۳ میلی‌متر هر دو طرف هر بال را ثابت کرده است. در نهایت مشابه شکل ۷، قسمت جلویی گیره‌ی مذکور سوراخ شد تا به جک هیدرولیکی متصل شود. برای آنکه ژئوسل از فاصله‌ی بین دو غلاف فولادی دستگاه عبور کند و به صورت آزادانه بتواند در آن قسمت جابه‌جا شود، ارتفاع ژئوسل‌ها در 10° سانتی‌متر جلویی آن‌ها به ۴ سانتی‌متر کاهش داده شد. همچنین دو سیم غیرکشسان به نیمه‌ی سلول‌های ردیف اول و آخر ژئوسل و همچنین انتهای ژئوسل متصل شده است. سیم‌های مذکور با عبور از دیواره‌ی پشتی دستگاه به وزنه‌های جابه‌جایی سنج متصل شده‌اند.

- پس از قرار دادن ژئوسل، حجم هر سلول محاسبه شده است (به ترتیب 360° و 1800° سانتی‌مترمکعب در ژئوسل‌هایی با ارتفاع 10° و 5° سانتی‌متر) و در وزن مخصوص در چگالی نسبی 70% ضرب شد تا وزن مصالح خاکی موردنیاز در هر سلول محاسبه شود. سپس وزن محاسبه شده‌ی مذکور برای مصالح ماسه‌یی و شنی درون هر سلول ریخته و سپس و بیره شد تا این میزان مصالح خاکی، کاملاً یک سلول را پر کند (شکل ۸). سپس نیمه‌ی بالایی دستگاه مشابه نیمه‌ی پایین در ۷ لایه از SP، ۹ لایه از GP۱ و ۱۰ لایه از GP۲ پر شده است. در



الف) ژئوسل با ارتفاع ۵ cm



ب) ژئوسل با ارتفاع ۱۰ cm

شکل ۹. رفتار نیروی بیرون کشش - جابه جایی ژئوسل در ماسه.

رفتار سخت شونده با رفتار بار بیرون کشش - جابه جایی ژئوستنتیک های دو بعدی که به یک مقدار بیشینه مشخص می رسند و سپس نیروی بیرون کشش به دلیل از دست دادن مقاومت اندرکنشی بین خاک و ژئوستنتیک کاهش می یابد، در تضاد است. در ژئوستنتیک های دو بعدی مذکور، نقطه ی بیشینه بیانگر مقاومت بیرون کشش است. [۱۶-۱۸] بنا براین برخلاف ژئوستنتیک های دو بعدی مثل ژئوگرید که مکانیزم اصطکاکی مقاومت بیرون کشش را کنترل می کند، در ژئوسل ها مقدار مقاومت پاسیو فعال شده در هر سلول ژئوسل، تعیین کننده ی مقاومت بیرون کشش نهایی است که همین امر باعث می شود تا به نقطه ی بیشینه در رفتار بار - جابه جایی خود نرسند.

در نمودارهای شکل ۹ می توان مشاهده کرد که مقدار مقاومت نهایی بیرون کشش وابسته به نیروی پاسیو فعال شده در هر سلول ژئوسل است و با افزایش ارتفاع ژئوسل، مقاومت نهایی بیرون کشش افزایش یافته است. برای مثال، ژئوسل با ارتفاع ۵ سانتی متر به ترتیب به مقاومت نهایی ۱۱/۸ و ۱۲/۶ کیلو نیوتن تحت سر بارهای ۲۰ و ۴۰ کیلو پاسکال رسیده است. در حالی که تحت سر بار ثابت، در ژئوسل با ارتفاع ۱۰ سانتی متر، نیروی بیرون کشش نهایی حدود ۲۰٪ افزایش یافته و به مقادیر ۱۴ و ۱۵/۵ کیلو نیوتن رسیده است. در ژئوسل با ارتفاع ۵ سانتی متر تحت سر بار ۶۰ کیلو پاسکال، می توان مشاهده کرد که یک مقدار ثابت تا جابه جایی ۷۵ میلی متر به دست نیامده است. لذا می توان عنوان کرد که تمام مقاومت بیرون کشش ژئوسل بسیج نشده و جابه جایی بیشتری لازم است تا تمام مقاومت فعال شود و به شرایط پایدار دست یابد. در ژئوسل ها با ارتفاع ۱۰ سانتی متر تحت فشار ۶۰ کیلو پاسکال نیز یک پارگی در جابه جایی ۶۵ میلی متر در اتصال بین ژئوسل و گیره رخ داده است که نشان می دهد مقاومت بیرون کشش ژئوسل از مقاومت کششی نوارهای ژئوسل در محل

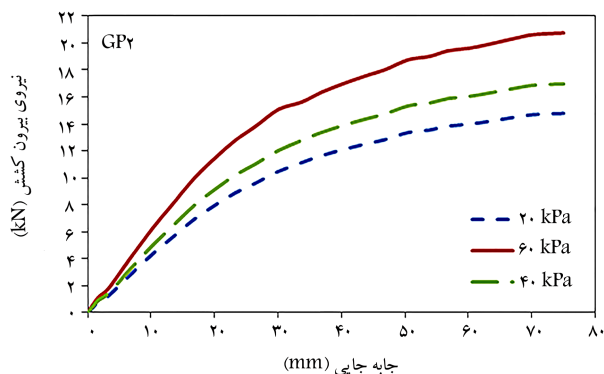
کنترل توسط سیستم کنترل حلقه ی بسته به نمونه اعمال شده است. طبق استاندارد آزمایش، ژئوسل می بایست با سرعت ۱ میلی متر بر دقیقه بیرون کشیده شود تا گسیخته شود و یا جابه جایی جلویی نمونه به ۷۵ میلی متر برسد. در مطالعه ی حاضر، از سر بارهای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ کیلو پاسکال برای بررسی رفتار استاتیکی بیرون کشش ژئوسل ها استفاده شده است. همچنین رفتار چندمرحله یی ژئوسل ها با استفاده از آزمایش بیرون کشش چندمرحله یی بررسی شده است. [۱۴] در مرحله ی اول، ژئوسل با سرعت ثابت ۱ میلی متر بر دقیقه و تا رسیدن به نیروی بیرون کشش تحت تنش سر بارهای ۲۰ و ۶۰ کیلو پاسکال مورد نظر جابه جا می شود. موراچی و کاردیه (۲۰۰۹)، نشان دادند که در ژئوستنتیک های دو بعدی، فاز سیکلی بین ۰/۲ تا ۰/۴ بیشینه ی نیروی بیرون کشش به دست آمده از آزمایش با نرخ ثابت آغاز می شود و پس از مقدار مذکور، فاز پسا سیکلی کاملاً تشکیل نخواهد شد. [۱۵] بنابراین در مطالعه ی حاضر، نیروی برابر ۳/۰ بیشینه ی نیروی بیرون کشش به دست آمده از آزمایش با نرخ ثابت انتخاب شد تا فاز سیکلی آغاز شود. پس از رسیدن به نیروی بیرون کشش مشخص شده، یک نیروی کششی چندمرحله یی با بسامدهای ۱/۰، ۲/۰ و ۳/۰ تحت دامنه های تنش ۰/۴، بیشینه ی نیروی بیرون کشش به دست آمده از آزمایش با نرخ ثابت در حالت کنترل بار به ازاء ۱۰ سیکل بر نمونه اعمال شد. پس از این مرحله، آزمایش مجدداً تحت شرایط جابه جایی با سرعت ثابت ۱ میلی متر بر دقیقه و مشابه مرحله ی اول ادامه یافت، تا اینکه نمونه ی ژئوسل به جابه جایی جلویی ۷۵ میلی متر رسید، و گسیختگی بیرون کششی و یا گسیختگی کششی رخ داد.

۳. نتایج و بحث

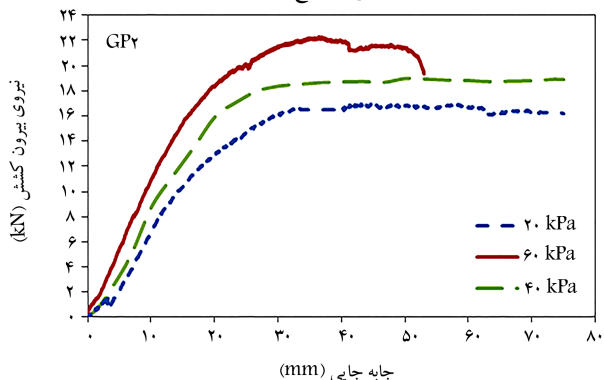
۳.۱. رفتار استاتیکی

در شکل ۹، رفتار نیروی بیرون کشش - جابه جایی ژئوسل ها در خاک ماسه یی تحت سر بارهای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ کیلو پاسکال برای دو ژئوسل با ارتفاع ۵ و ۱۰ سانتی متر مشاهده می شود؛ که مطابق آن، نمونه هایی که تحت فشار سر بارهای ۲۰ و ۴۰ کیلو پاسکال قرار گرفته اند، یک رفتار سخت شونده دارند. نیروی بیرون کشش در نمونه های مذکور تا زمانی که به یک مقدار بیشینه برسد، افزایش یافته و سپس به سمت یک مقدار ثابت با همان نیرو ادامه داده است، تا به جابه جایی ۷۵ میلی متر برسد. به طور کلی، می توان گفت گسیختگی بیرون کشش در ژئوسل ها زمانی رخ می دهد که تمام مقاومت پاسیو در هر سلول ژئوسل بسیج شده باشد و در مقابل نیروی بیرون کشش مشارکت کند. این مشارکت در جابه جایی های اولیه، وقتی ردیف های اولیه ی سلول های ژئوسل فعال می شوند، باعث می شود تا نیروی بیرون کشش به صورت ناگهانی افزایش یابد.

همان طور که پیش تر عنوان شد، مکانیزم تسلیح ژئوسل ها به سه مؤلفه ی: الف) اثر برشی، ب) اثر مقاومت جانبی و ج) توزیع بار در سطحی گسترده تر، تقسیم می شوند. [۴] زمانی که نیروی بیرون کشش به ژئوسل اعمال می شود، مؤلفه ی اول به دلیل ایجاد نیروی اصطکاکی در جداره های المان ژئوسل و خاک فعال می شود. همچنین، مؤلفه ی دوم نیز به دلیل ایجاد نیروی پاسیو توسط مصالح خاکی موجود در هر سلول ژئوسل فعال خواهد شد. نیروی بیرون کشش در ژئوسل ها که ترکیبی از مؤلفه ی دوم است، پس از آن به یک مقدار پایدار می رسد، در شرایطی که کل سلول های ژئوسل فعال شده اند و ژئوسل دیگر مقاومتی برای بسیج کردن در مقابل نیروی خارجی ندارد و گسیختگی بیرون کشش در ژئوسل ها رخ می دهد. این

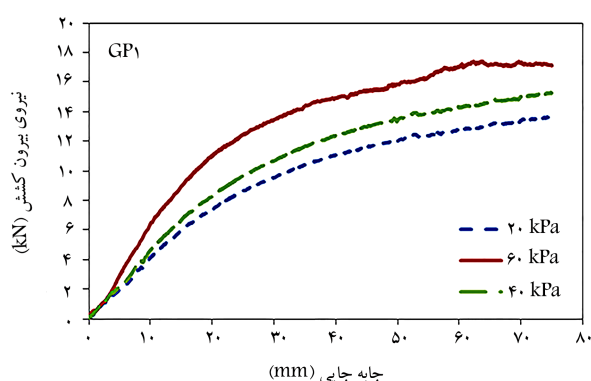


الف) ژئوسل با ارتفاع ۵ cm

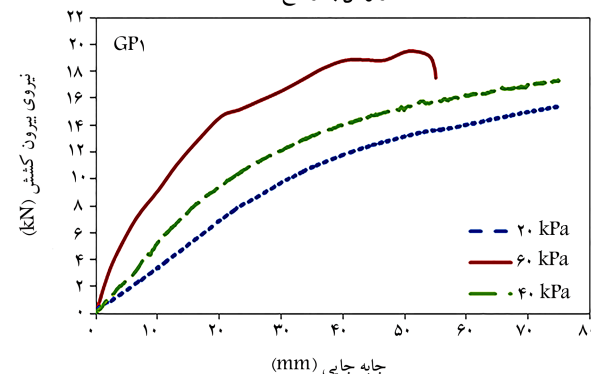


ب) ژئوسل با ارتفاع ۱۰ cm

شکل ۱۱. رفتار نیروی بیرون‌کشش - جابه‌جایی ژئوسل در GP2.

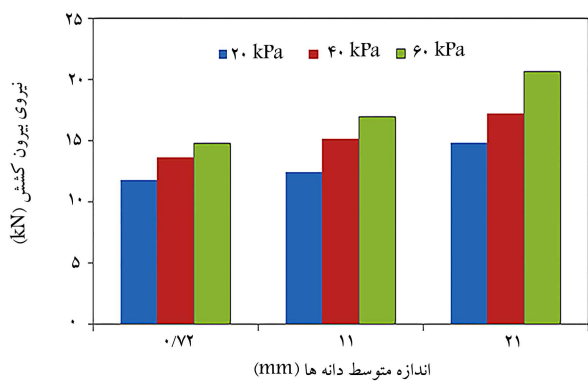


الف) ژئوسل با ارتفاع ۵ cm

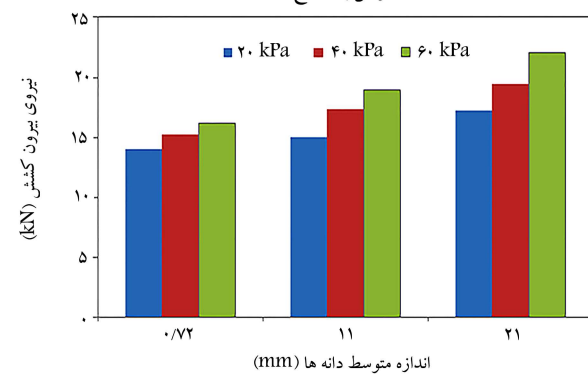


ب) ژئوسل با ارتفاع ۱۰ cm

شکل ۱۰. رفتار نیروی بیرون‌کشش - جابه‌جایی ژئوسل در GP1.



الف) ژئوسل با ارتفاع ۵ cm



ب) ژئوسل با ارتفاع ۱۰ cm

شکل ۱۲. نیروی بیرون‌کشش نهایی ژئوسل‌ها در برابر اندازه‌ی متوسط دانه‌ها.

اتصال بیشتر بوده و بار خارجی باعث ایجاد پارگی در آن ناحیه شده است. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، رفتار بیرون‌کشش ژئوسل‌ها در مصالح شنی مشاهده می‌شود، که ژئوسل‌ها یک رفتار سخت‌شونده مشابه رفتار در خاک ماسه‌یی از خود نشان داده‌اند. نیروی بیرون‌کشش افزایش یافته است، اما نرخ این رفتار تا زمانی که به جابه‌جایی ۷۵ میلی‌متر برسد، کاهش یافته است. مشابه خاک ماسه‌یی، در خاک‌های GP1 و GP2، یک پارگی در ژئوسل با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر تحت سربار ۶۰ کیلوپاسکال در جابه‌جایی‌های ۵۵ و ۵۰ میلی‌متر رخ داده است. می‌توان مشاهده کرد جابه‌جایی که در آن پارگی رخ داده است، در مقایسه با خاک ماسه‌یی کاهش یافته است. همچنین در GP2 می‌توان مشاهده کرد که در جابه‌جایی حدود ۴۰ میلی‌متر، نیروی بیرون‌کشش دچار یک افت شده است که آن نقطه را می‌توان لحظه‌ی شروع پارگی دانست که پس از آن بار با یک مقدار ثابت ادامه یافته است تا اینکه در جابه‌جایی ۵۰ میلی‌متر به طور کلی افت کرده و پارگی کامل رخ داده است. شایان ذکر است پارگی‌های مذکور در محل اتصال رخ داده است. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش اندازه‌ی ذرات، نیروی پاسیو بیشتری در هر سلول ژئوسل بسیج می‌شود. به طور کلی در مقیاس بین دانه‌یی و طبق اصول مکانیک خاک، با افزایش اندازه‌ی ذرات، وزن دانه‌ها بیشتر می‌شود و در تماس با یکدیگر، تنش بیشتری به یکدیگر وارد می‌کنند. از سوی دیگر، مقاومت کششی ژئوسل در محل اتصال ثابت باقی می‌ماند و با بیشتر شدن نیروی بیرون‌کشش از مقاومت کششی ژئوسل، پارگی در ژئوسل در محل اتصال رخ می‌دهد.

برای بررسی بهتر اثر اندازه‌ی ذرات، در شکل ۱۲، مقدار نهایی نیروی بیرون‌کشش در مقابل اندازه‌ی متوسط دانه‌ها مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، نیروی بیرون‌کشش برای ژئوسل با ارتفاع ۵ سانتی‌متر تحت سربار ۲۰ کیلوپاسکال GP1 و GP2 به

جدول ۳. مقادیر محاسبه شده هر کدام از مؤلفه‌های بیرون‌کشش استاتیکی ژئوسل.

خاک	ارتفاع ژئوسل (cm)	تنش قائم (kPa)	$\sum f_p (kN)$	$f_s (kN)$
ماسه	۵	۲۰	۸/۸۷	۲/۹۳
ماسه	۵	۴۰	۹/۲	۳/۳
ماسه	۵	۶۰		در این آزمایش چون رفتار بیرون کشش به سمت یک مقدار ثابت میل نکرده، محاسبه مؤلفه‌های بیرون کشش میسر نیست
ماسه	۱۰	۲۰	۹/۹۴	۴/۰۶
ماسه	۱۰	۴۰	۱۰/۵۶	۴/۰۴
ماسه	۱۰	۶۰	۱۲/۲	۵
GP۱	۵	۲۰	۹/۱	۴/۶
GP۱	۵	۴۰	۹/۵	۵/۷
GP۱	۵	۶۰	۱۱/۲	۶/۱
GP۱	۱۰	۲۰	۱۰/۴	۴/۹
GP۱	۱۰	۴۰	۱۱/۳	۶
GP۱	۱۰	۶۰	۱۳/۱	۶/۴
GP۲	۵	۲۰	۹/۶	۵/۲
GP۲	۵	۴۰	۱۰/۷	۶/۳
GP۲	۵	۶۰	۱۳/۶	۷/۱

ژئوسل برابر ۱، برای ردیف دوم برابر ۷/۰ و برای ردیف‌های بعدی برابر ۳/۰ است. مقاومت نهایی به دست آمده از هر آزمایش به دست آمده و مؤلفه‌ی پاسیو طبق رابطه‌ی ۲ محاسبه و مطابق رابطه‌ی ۱، مؤلفه‌ی اصطکاکی نیز بررسی شده است. نتایج محاسبات اخیر در جدول ۳ ارائه شده است.

در جدول ۳ مشاهده می‌شود که مطابق انتظار، مقاومت پاسیو بسیج شده، نقش مؤثری در مقاومت نهایی بیرون‌کشش ژئوسل‌ها در مقایسه با مؤلفه‌ی اصطکاکی ایجاد کرده است. مؤلفه‌ی اصطکاکی بین ۲۵ تا ۳۵ درصد از مقاومت نهایی بیرون‌کشش را در خاک‌های ماسه‌یی و شنی دارد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که با افزایش ارتفاع ژئوسل، مقاومت پاسیو بیشتری در سلول‌ها ایجاد شده است، که تأثیر آن از افزایش اندازه‌ی ذرات بیشتر بوده است. به طور مثال، مقاومت پاسیو در مصالح ماسه‌یی با افزایش ارتفاع، از ۸/۸۷ به ۱۰/۴۴ کیلونیوتن افزایش یافته است؛ در حالی که این مقدار با افزایش اندازه‌ی ذرات، از ۸/۸۷ به ۹/۱ کیلونیوتن رسیده است. شایان ذکر است که برخلاف مکانیک خاک پایه، که نیروی پاسیو با توان ۲ ارتفاع رابطه دارد و افزایش ارتفاع تأثیر بسزایی در افزایش نیروی پاسیو دارد، در روش ذکر شده، توری تغییر ارتفاع فقط در پارامتر A_p مؤثر است. بنابراین تأثیر آن کمتر از روش‌های محاسباتی مکانیک خاک پایه خواهد بود. علاوه بر آن مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع ژئوسل، مؤلفه‌ی اصطکاکی نیز افزایش یافته است. دلیل این امر را می‌توان افزایش اصطکاکی در دو طرف لایه‌ی ژئوسل دانست.

۲.۳. رفتار چندمرحله‌یی (استاتیکی، سیکیلی و پسا سیکیلی)

در شکل‌های ۱۳ و ۱۴، به ترتیب رفتار چندمرحله‌یی بیرون‌کشش ژئوسل‌ها در مصالح ماسه‌یی و شنی تحت سربارهای ۲۰ و ۶۰ کیلوپاسکال مشاهده می‌شود، که مطابق آن‌ها، ژئوسل‌ها در تمامی آزمایش‌ها به مقاومت نهایی کمتری نسبت به

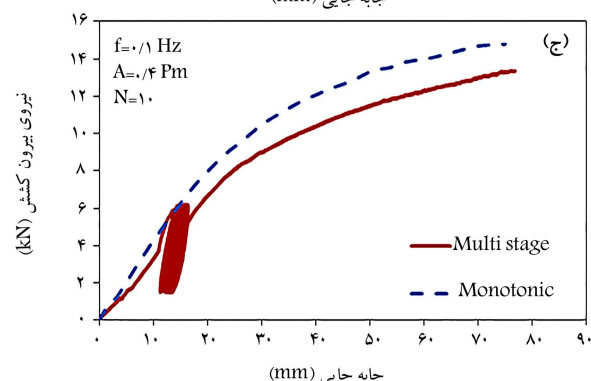
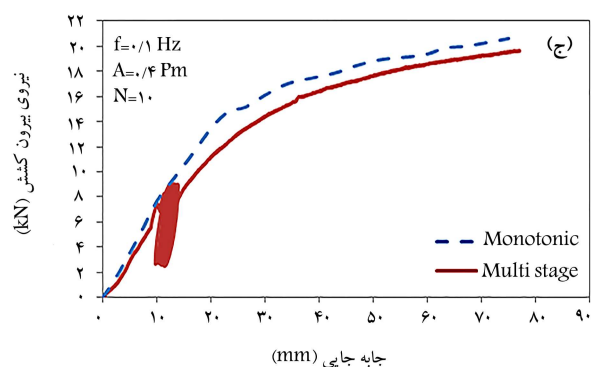
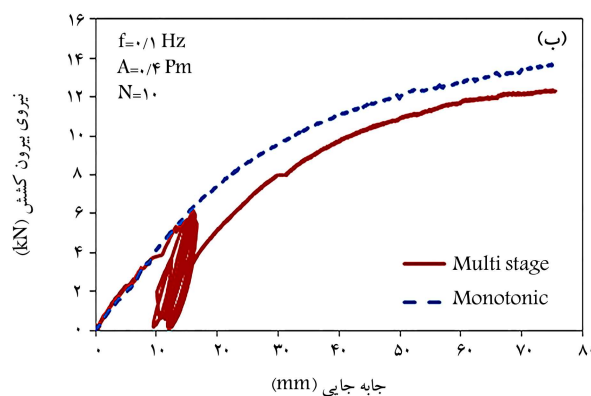
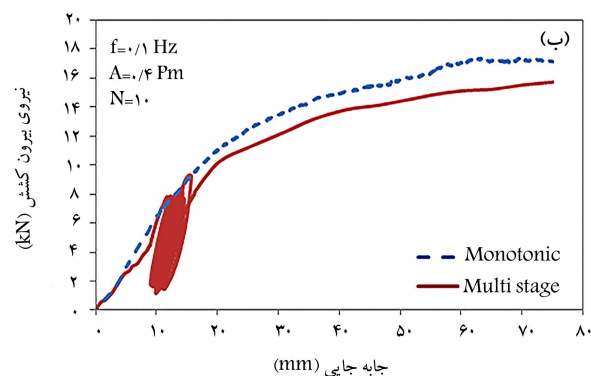
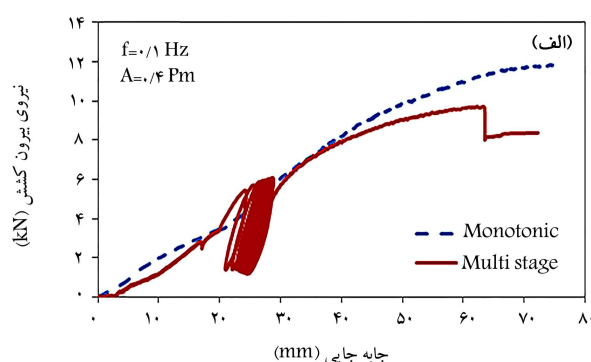
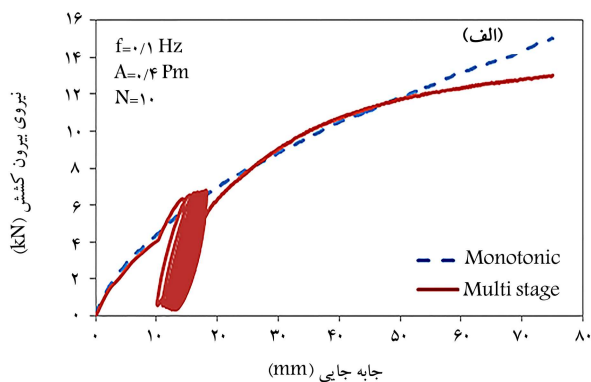
ترتیب برابر ۱۳/۷ و ۱۵/۳ کیلونیوتن بوده است که به نسبت آزمایش مشابه تحت سربار ۲۰ کیلوپاسکال در خاک ماسه‌یی به ترتیب ۱۵ و ۳۰ درصد بیشتر است. می‌توان نتیجه گرفت که افزایش اندازه‌ی ذرات و نیز افزایش وزن مخصوص در یک چگالی نسبی ثابت، باعث افزایش نیروی پاسیو بسیج شده‌ی بیشتری در هر سلول ژئوسل می‌شود. اگرچه باید توجه داشت که بخشی از مقاومت ذکر شده‌ی بیرون‌کشش نهایی ناشی از اصطکاکی دانه‌های خاکی مصالح پُرکننده با دیواره‌های ژئوسل است. همان‌طور که قبلاً بیان شد، اصطکاکی بین دانه‌های پُرکننده و خاک بالا و پایین لایه‌ی ژئوسل در مطالعات پیشین بررسی و نشان داده شده است که با بهبود اندرکنش بین مصالح پُرکننده و خاک اطراف، مؤلفه‌ی اصطکاکی افزایش می‌یابد. برای اندازه‌گیری سهم هر یک از مکانیزم‌های تسلیح ژئوسل از رابطه‌ی ۱ استفاده شده و مقاومت نهایی بیرون‌کشش (P) برابر مجموع مؤلفه‌ی افقی اصطکاکی بین ذرات (f_s) و مقاومت پاسیو بسیج شده در هر سلول ($\sum f_p$) است:

$$P = \sum f_s + \sum f_p \quad (1)$$

ایسیک و گورباز^۲ (۲۰۲۰)، یک روش توری برای محاسبه‌ی مقاومت پاسیو بسیج شده در هر سلول مطابق رابطه‌ی ۲ بیان کرده‌اند:

$$f_p = A_p \cdot K_P \cdot \sigma_v \cdot \alpha_p \cdot m_p \quad (2)$$

که در آن، σ_v تنش قائم، K_P ضریب فشار جانبی قائم، A_p مساحت مؤثر سلول که به صورت عرضی در مقابل مصالح پُرکننده قرار می‌گیرد و برابر ارتفاع ژئوسل ضرب در دو تا بعد ژئوسل (۲۶/۶ سانتی‌متر) است، α_p ضریب تصحیح مساحت مشارکت‌کننده در مقاومت پاسیو که مساوی ۳۳/۰ در تمام آزمایش‌ها فرض می‌شود و m_p ضریب بسیج‌کننده‌ی مقاومت پاسیو است که برای ردیف‌های اول سلول‌های



شکل ۱۴. نتایج آزمایش چندمرحله‌ای تحت سربار ۶۰ کیلوپاسکال.

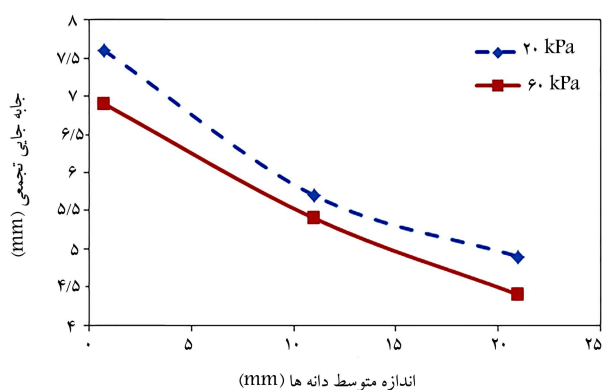
شکل ۱۳. نتایج آزمایش چند مرحله‌ای تحت سربار ۲۰ کیلوپاسکال.

نیروی بیرون‌کشش نمودارهای مذکور نشان می‌دهند که در آزمایش چندمرحله‌ای در ماسه، مقاومت نهایی بیرون‌کشش به دست آمده در آزمایش با نرخ ثابت تحت سربار ۲۰ کیلوپاسکال، ۱۵٪ کاهش یافته است. این میزان کاهش تحت فشار سربار ثابت، برای GP۱ و GP۲ به ترتیب برابر ۱۱ و ۹ درصد بوده است. به دلیل مقاومت برشی بیشتر، مصالح درشت‌دانه‌تر با مصالح پُرکننده‌ی ژئوسل با افزایش اندازه‌ی ذرات قفل و بست بین دانه‌ها در شرایط یکسان بارگذاری سیکلی سخت‌تر شکسته و ضعیف می‌شوند. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش فشار سربار، اختلاف بین مقاومت نهایی به دست آمده از آزمایش با نرخ ثابت و آزمایش چندمرحله‌ای، کاهش و مقاومت به دست آمده از آزمایش با نرخ ثابت تحت فشار ۶۰ کیلوپاسکال نیز به ترتیب ۱۳، ۱۰، و ۵ درصد در ماسه، GP۱ و GP۲ کاهش یافته است؛ که نشان می‌دهد با افزایش سربار در یک مصالح خاکی مشخص، اندرکنش بین ژئوسل و خاک اطراف، سخت‌تر و در فاز سیکلی قفل و بست بین ذرات، کمتر شکسته شده است. علاوه بر این می‌توان مشاهده کرد که در شکل ۱۴ الف، آزمایش با نرخ ثابت به سمت یک مقدار ثابت میل نکرده و کل نیروی بیرون‌کشش تا جابه‌جایی ۷۵ میلی‌متر بسنج

مقاومت نهایی به دست آمده از آزمایش با نرخ ثابت (استاتیکی) رسیده‌اند. که می‌تواند به دلیل حرکت رفت و برگشتی نیرو در هنگام فاز سیکلی باشد که باعث شکسته و یا تضعیف شدن برخی از قفل و بست‌های بین مصالح پُرکننده‌ی ژئوسل با لایه‌های خاکی بالا و پایین ژئوسل شود که در نتیجه‌ی این شکسته و یا تضعیف شدن قفل و بست بین دانه‌ها، ژئوسل‌ها به مقاومت نهایی کمتری در فاز پاساسیکلی نسبت به مقاومت نهایی به دست آمده از آزمایش نرخ ثابت رسیده‌اند. در شکل ۱۳ الف مشاهده می‌شود که بار بیرون‌کشش در جابه‌جایی ۶۳ میلی‌متر، دچار یک افت شده است. سپس بار بیرون‌کشش در ادامه تا رسیدن به جابه‌جایی ۷۵ میلی‌متر با نیروی حدود ۸ کیلو نیوتن ادامه یافته است. این نیروی ۸ کیلو نیوتنی تقریباً برابر مؤلفه‌ی پاسیو محاسبه شده در جدول ۳ است. دلیل این امر می‌تواند کاهش مقاومت اصطکاکی در سطح مشترک مصالح پُرکننده‌ی ژئوسل و لایه‌های بالا و پایین ژئوسل باشد که در اثر شکسته شدن قفل و بست مصالح دانه‌ای در سطح مشترک ژئوسل با لایه‌های بالا و پایینی خود ایجاد شده است. در نهایت پس از رسیدن به جابه‌جایی ۶۳ میلی‌متر، فقط مؤلفه‌ی پاسیو به طور مؤثر در برابر نیروی بیرون‌کشش مشارکت کرده است.

جدول ۴. مقادیر محاسبه شده‌ی هر کدام از مؤلفه‌های بیرون‌کشش ژئوسل در آزمایش چند مرحله‌یی.

خاک	ارتفاع ژئوسل (cm)	تنش قائم (kPa)	$\sum f_p (kN)$	$f_s (kN)$
ماسه	۵	۲۰	۸/۸۷	۰/۲۳
ماسه	۵	۶۰	۹/۲	۲/۸
GP۱	۵	۲۰	۹/۱	۳/۶
GP۱	۵	۶۰	۱۱/۲	۴/۵۳
GP۲	۵	۲۰	۹/۶	۳/۷۲
GP۲	۵	۶۰	۱۳/۶	۵/۹۵



شکل ۱۵. تأثیر اندازه‌ی دانه‌ها در جابه‌جایی تجمعی ایجاد شده.

است، جابه‌جایی دانه‌ها روی یکدیگر نیازمند نیروی بیرون‌کشش بیشتری است و در شرایط بارگذاری یکسان، جابه‌جایی تجمعی با افزایش اندازه‌ی دانه‌ها و فشار سربار کمتر می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر، رفتار استاتیکی و چندمرحله‌یی بیرون‌کشش ژئوسل با استفاده از یک سری آزمایش‌های بیرون‌کشش بررسی شده و رفتارهای استاتیکی، سیکلی و پساسیکلی بیرون‌کشش ژئوسل‌ها بررسی شده است. در مطالعه‌ی حاضر، از ژئوسل‌های موجود در بازار ایران استفاده شده است. ابعاد سلول‌های ژئوسل مطابق پروژه‌های انجام شده در کشور انتخاب شده است، تا بتوان از نتایج مطالعه‌ی حاضر در پروژه‌های عملی نیز استفاده کرد. با توجه به اینکه مقاومت بیرون‌کشش ژئوسل‌ها در طراحی و استفاده از آن‌ها در پروژه‌های خاک مسلح، اهمیت ویژه‌ی دارد؛ مطالعه‌ی حاضر می‌تواند کمک شایانی در این زمینه کند. اگرچه بررسی این موضوع با در نظر گرفتن همه‌ی آثار ممکن، مثل آثار مقیاس، نیازمند مطالعات بیشتری در این زمینه است. در نهایت بر طبق مطالعه‌ی حاضر، این نتایج به دست آمده است:

- ژئوسل‌ها دارای یک رفتار بیرون‌کشش سخت‌شونده هستند و مقاومت بیرون‌کشش در مراحل اولیه‌ی اعمال بار بیرون‌کشش با نرخ زیاد افزایش می‌یابد. دلیل این امر فعال شدن نیروی پاسیو درون سلول‌های ردیف اول ژئوسل است. به تدریج، نیروی بیرون‌کشش به سمت یک مقدار ثابت میل می‌کند که به دلیل فعال شدن نیروی پاسیو و مقاومت اصطکاکی بین مصالح پُرکننده‌ی ژئوسل با خاک اطراف در سلول‌های دیگر ژئوسل است. گسیختگی بیرون‌کشش ژئوسل‌ها را می‌توان در لحظه‌یی عنوان کرد که ژئوسل تمام مؤلفه‌های مقاوم خود را در برابر نیروی بیرون‌کشش فعال کرده و دیگر ظرفیتی برای بسیج کردن نداشته و نمودار بار - جابه‌جایی ژئوسل به یک مقدار ثابت رسیده است.
- مقاومت بیرون‌کشش ژئوسل‌ها با افزایش اندازه‌ی ذرات خاک به دلیل ایجاد نیروی پاسیو بیشتر و همین‌طور اصطکاک بیشتر با خاک اطراف، افزایش یافته است. روش تئوری نشان داد که سهم مقاومت پاسیو در مقاومت نهایی بیرون‌کشش بین ۶۵ تا ۷۵ درصد و مابقی آن، مربوط به مؤلفه‌ی اصطکاکی ایجاد شده بین مصالح پُرکننده‌ی ژئوسل و خاک اطراف است.

نشده است؛ در حالی که در آزمایش چندمرحله‌یی، نمودار به سمت شرایط پایدار میل کرده است. دلیل این امر را می‌توان کاهش مقاومت اصطکاکی در هنگام اعمال تنش سیکلی دانست، که باعث شده است ظرفیت بیرون‌کشش ژئوسل کاهش یابد و نمونه به شرایط پایدار برسد.

برای بررسی اثر نیروی چندمرحله‌یی در مؤلفه‌های تسلیح ژئوسل، مقادیر مؤلفه‌ی اصطکاکی و مقاومت پاسیو در انتهای هر آزمایش طبق روابط ۱ و ۲ محاسبه و در جدول ۴ ارائه شده است. با مقایسه‌ی جدول‌های ۴ و ۳ می‌توان مشاهده کرد که روش تئوری استفاده شده، مؤلفه‌ی پاسیو یکسانی برای هر دو آزمایش با نرخ ثابت و چندمرحله‌یی ارائه داده و فقط مؤلفه‌ی اصطکاکی تغییر کرده است. اگرچه اعمال نیروی چندمرحله‌یی می‌تواند تأثیر زیادی در کاهش مؤلفه‌ی اصطکاکی داشته باشد، ولی این نیرو در چگالی نسبی مصالح پُرکننده‌ی ژئوسل نیز تأثیرگذار است که می‌تواند موجب تغییر در مؤلفه‌ی پاسیو نیز بشود؛ که تغییر مذکور در روش تئوری استفاده شده ملاحظه نمی‌شود و مقادیر نیروی پاسیو یکسانی ارائه کرده است.

برای بررسی اثر نیروی چندمرحله‌یی در مؤلفه‌های تسلیح ژئوسل، مقادیر مؤلفه‌ی اصطکاکی و مقاومت پاسیو در انتهای هر آزمایش طبق روابط ۱ و ۲ محاسبه و در جدول ۴ ارائه شده است. با مقایسه‌ی جدول‌های ۴ و ۳ می‌توان مشاهده کرد که روش تئوری استفاده شده، مؤلفه‌ی پاسیو یکسانی برای هر دو آزمایش با نرخ ثابت و چندمرحله‌یی ارائه داده و فقط مؤلفه‌ی اصطکاکی تغییر کرده است. اگرچه اعمال نیروی چندمرحله‌یی می‌تواند تأثیر زیادی در کاهش مؤلفه‌ی اصطکاکی داشته باشد، ولی این نیرو در چگالی نسبی مصالح پُرکننده‌ی ژئوسل نیز تأثیرگذار است که می‌تواند موجب تغییر در مؤلفه‌ی پاسیو نیز بشود که تغییر مذکور در روش تئوری استفاده شده ملاحظه نمی‌شود و مقادیر نیروی پاسیو یکسانی ارائه کرده است.

همچنین اندازه‌ی ذرات، جابه‌جایی تجمعی در انتهای فاز سیکلی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند. در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که جابه‌جایی تجمعی در هنگام فاز سیکلی با افزایش اندازه‌ی ذرات و فشار سربار کاهش یافته است. جابه‌جایی تجمعی مذکور در ماسه‌ی تحت فشار سربار ۲۰ کیلوپاسکال و با دامنه‌ی ۴۰ درصد، ۷/۶ میلی‌متر بوده و با افزایش فشار سربار به ۶۰ کیلوپاسکال، به ۶/۹ میلی‌متر کاهش یافته است. در حالی که شرایط بارگذاری یکسان بوده است، جابه‌جایی تجمعی ۷/۶ میلی‌متری در ماسه‌ها به ۵/۷ و ۴/۹ میلی‌متر در GP۱ و GP۲ رسیده است؛ که نشان می‌دهد در هنگام فاز سیکلی، چون با افزایش اندازه‌ی دانه‌ها و فشار سربار، مقاومت برشی در سطح تماس مصالح پُرکننده‌ی ژئوسل و خاک اطراف بیشتر شده

- میزان کاهش مقاومت پساسیقلی وابسته به اندازه‌ی ذرات خاک است. هر چه اندازه‌ی ذرات افزایش یافته است، قفل و بست بین دانه‌های خاک، بیشتر شده و در نتیجه مقاومت کمتری در هنگام اعمال تنش سیکلی از بین رفته و نهایتاً مقاومت نهایی بیرون‌کشش در فاز پساسیقلی به مقاومت به دست آمده از آزمایش با نرخ ثابت نزدیک‌تر شده است. همچنین اندازه‌ی ذرات، جابه‌جایی تجمعی ایجاد شده در هنگام اعمال بار سیکلی را تحت تأثیر قرار داده و با از بین رفتن بیشتر اصطکاک بین ذرات، قابلیت جابه‌جا شدن ژئوسل را افزایش داده است.
- در آزمایش چندمرحله‌ای مشاهده شد که مقاومت نهایی پساسیقلی از مقاومت نهایی به دست آمده از آزمایش با نرخ ثابت کمتر است و نتیجه گرفته شد که حرکت رفت و برگشتی نیروی بیرون‌کشش در هنگام فاز سیکلی باعث می‌شود که برخی از قفل و بست‌های بین مصالح پُرکننده‌ی ژئوسل و خاک اطراف شکسته یا تضعیف شوند، که در نتیجه‌ی آن، مقاومت نهایی در فاز پساسیقلی کمتر خواهد شد. روش تئوری نشان داد که اگرچه اعمال نیروی چندمرحله‌ای می‌تواند در مؤلفه‌ی پاسیو مؤثر باشد، اما تأثیر آن در روش تئوریک اخیر مشاهده نمی‌شود.

پانویس‌ها

1. Latha Manju &
2. Isik & Gurbaz

منابع (References)

1. Sridharan, A. "Bearing capacity improvement", G.V. Rao and G.V.V.S. Raju Engineering with Geosynthetics, Tata McGraw-Hill, New Dehli, pp. 175-196 (1990).
2. Bush, D.I., Jenner, C.G. and Bassett, R.H. "The design and construction of geocell foundation mattress supporting embankments over soft ground", *Geotext and Geomembr*, **9**(1), pp. 83-98 (1990).
3. Shiekh, I.R. and Shah, M.Y. "Experimental study on geocell reinforced base over dredged soil using static plate load", *International Journal of Pavement Research and Technology*, **13**, pp. 286-295 (2020).
4. Zhao, M.H., Zhang, L., Zou, X.J. and et al. "Research progress in two-direction composite foundation formed by geocell reinforced mattress and gravel piles", *Chinese Journal of Highway and Transport*, **22**(1), pp. 1-10 (2009).
5. Manju, G.S. and Latha, M.G. "Interfacial friction properties of geocell reinforced sand", *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, **2**(1), pp. 25-31 (2013).
6. Tavakoli, G.T.M. and Motarjemi, F. "Interfacial properties of geocell reinforced granular soils", *Geotextiles and Geomembranes*, **46**(4), pp. 384-395 (2018).
7. Biabani, M.M., Indraratna, B. and Ngo, N.T. "Modeling of geocell reinforced sub ballast subjected to cyclic loading", *Geotextiles and Geomembranes*, **44**(4), pp. 489-503 (2016).
8. Isik, A. and Gurbaz, A. "Pullout behavior of geocell reinforcement in cohesionless soils", *Geotext. Geomembr*, **48**(1), pp. 71-81 (2020).
9. Fakharian, K. and Pilban, A. "Pullout tests on diagonally enhanced geocells embedded in sand to improve load-deformation response subjected to significant planar tensile loads", *Geotextiles and Geomembranes*, (Article In Press) (2021).
10. Chen, R.H. and Chiu, Y.M. "Model tests of geocell retaining structures", *Geotextiles and Geomembrane*, **26**(1), pp. 56-70 (2008).
11. Latha, M.G. and Manju, G.S. "Seismic response of geocell retaining walls through shaking table tests", *Int. J. of Geosynth. and Ground Eng*, **2**(7), pp. 1-15 (2016).
12. ASTM D4253., *Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibration Table*, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials (2016).
13. ASTM D4254., *Standard Test mMethods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soil and Calculation of Relative Density*, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials (2006).
14. ASTM D6706., "Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials (2001).
15. Moraci, N. and Cardile, G. "Influence of cyclic tensile loading on pullout resistance of geogrids embedded in a compacted granular soil", *Geotextiles and Geomembranes*, **27**, pp. 475-487 (2009).
16. Moraci, N. and Recalcati, P. "Factors affecting the pullout behaviour of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil", *Geotextiles and Geomembranes*, **24**(4), pp. 220-242 (2006).
17. Razzazan, S., Keshavarz, A. and Mosallanezhad, M. "Pullout behavior of polymeric strip in compacted dry granular soil under cyclic tensile load conditions", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **10**(5), pp. 968-976 (2018).
18. Mahigir, A., Ardakani, A. and Hassanlourad, M. "Comparison between monotonic, cyclic and post cyclic pullout behavior of a PET geogrid embedded in clean sand and clayey sand", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, **7**(10), pp. 1-15 (2021).