

مطالعه‌ی آزمایشگاهی رفتار بیرون‌کششی ژئوگرید مدفون در خاک ماسه‌یی یکنواخت تحت اثر بارهای استاتیکی، تناوبی و پساتناوبی

علی ماهیگیر (دانشجوی دکتری)

علیرضا اردکانی* (استادیار)

محمود حسلوواد (دانشیار)

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

مهندسی عمران شریف، زمستان (۱۳۹۹)
دوری ۲ - ۳۶، شماره ۴/۲، ص. ۳۵-۴۶

به‌منظور بررسی عوامل تأثیرگذار بر رفتار بیرون‌کششی استاتیکی، تناوبی و پساتناوبی یک نوع ژئوگرید تک‌سویه‌ی تولید داخل ایران با نام تجاری $80^{\circ}/30^{\circ}$ GPGRID مدفون در خاک ماسه‌یی یکنواخت مطالعه‌ی آزمایشگاهی به وسیله‌ی دستگاه بیرون‌کشش بزرگ‌مقیاس انجام گرفت. آزمایش‌های بیرون‌کششی سرعت ثابت و چندمرحله‌یی به ترتیب برای بررسی رفتار استاتیکی، تناوبی و پساتناوبی ژئوگرید مدفون در خاک ماسه‌یی ترتیب داده شد و تأثیر عوامل مختلفی نظیر تنش مؤثر قائم، دامنه‌ی بار تناوبی، بسامد و تعداد چرخه‌ی بارگذاری تناوبی بر روی مقاومت بیرون‌کششی ژئوگرید دیده شد. مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های بیرون‌کشش چندمرحله‌یی انجام شده با نتایج آزمایش‌های بیرون‌کشش جابه‌جایی با سرعت ثابت در تنش مؤثر قائم 60 kPa نشان داد که اعمال بار تناوبی تأثیر زیادی بر مقاومت بیرون‌کشش پساتناوبی نسبت به مقاومت بیرون‌کشش استاتیکی ژئوگرید مدفون در خاک ماسه‌یی ندارد؛ اما در تنش مؤثر قائم 20 kPa و 40 kPa کاهش مقاومت بیرون‌کشش پساتناوبی بیشینه نسبت به مقاومت بیرون‌کشش استاتیکی بیشینه مشهودتر است.

واژگان کلیدی: دستگاه بیرون‌کشش، مقاومت بیرون‌کشش پساتناوبی، ژئوگرید، آزمایش بیرون‌کشش چندمرحله‌یی، ضریب اصطکاک ظاهری بیشینه.

ali.mahigir@edu.ikiu.ac.ir
a.ardakani@eng.ikiu.ac.ir
hassanlou@eng.ikiu.ac.ir

۱. مقدمه و پیشینه‌ی تحقیقات

مورد ژئوگریدها مناسب است.^[۱۳] مقاومت بیرون‌کششی ژئوسینتتیک که یک پارامتر طراحی بسیار مهم برای پایداری داخلی سازه‌های خاکی مسلح شده است را می‌توان توسط آزمایش بیرون‌کشش تعیین کرد که امکان اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها را در طول نمونه‌ی ژئوسینتتیک در حین انجام آزمایش فراهم می‌کند.

ژئوگرید یکی از انواع ژئوسینتتیک است که به‌طور عمده برای تسلیح سازه‌های خاکی استفاده می‌شود. مقاومت بیرون‌کششی ژئوگرید، که بارکششی مورد نیاز برای لغزش رو به بیرون ژئوگرید از بین توده خاک است، به‌طور کلی از دو مؤلفه‌ی مقاومت اصطکاک‌ی و مقاومت مقاوم^۳ تشکیل می‌شود.^[۲] جول و همکاران (۱۹۸۴) رابطه‌ی نظری ۱ را برای محاسبه‌ی مقاومت بیرون‌کششی مسلح‌کننده در واحد عرض بیان کردند:^[۱۴]

$$P_m = 2 L_R \sigma'_v f_b \tan \varphi' = 2 L_R \sigma'_v \mu_{S/GSY} \quad (1)$$

که در آن P_m مقاومت بیرون‌کشش (در واحد عرض)، L_R طول مسلح‌کننده در ناحیه‌ی مهاربندی، σ'_v تنش مؤثر اعمال شده بر روی نمونه، ϕ' زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک، f_b ضریب اندرکشش بیرون‌کشش بین خاک و مسلح‌کننده و $\mu_{S/GSY}$

استفاده از ژئوسینتتیک‌ها به‌عنوان مسلح‌کننده برای افزایش پایداری سازه‌های خاکی مانند شبروانی‌ها، خاک‌ریزها، سازه‌های نگهدارنده دیوارهای حائل و پایه‌های پل به‌دلیل مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی مورد استقبال جهانی قرار گرفته است. پایداری سازه‌های خاکی مسلح شده با ژئوسینتتیک‌ها به اندازه‌ی زیادی به اندرکشش بین خاک و ژئوسینتتیک در سطح تماس بستگی دارد. از این رو اندرکشش بین خاک و ژئوسینتتیک دارای اهمیت فراوانی در طراحی سازه‌های نگهدارنده و این اندرکشش با توجه به تأثیرپذیری از خصوصیات مکانیکی و هندسی و ساختاری ژئوسینتتیک، شرایط مرزی و نحوه‌ی اعمال بار می‌تواند بسیار پیچیده باشد.^[۴-۱]

در دهه‌های اخیر، روش‌های آزمایشگاهی مختلفی برای بررسی اندرکشش خاک و ژئوسینتتیک، از جمله آزمایش برش مستقیم و آزمایش بیرون‌کشش، آزمایش صفحه‌ی مورب^۱ و آزمایش کشش در خاک^۲ شکل گرفته است.^[۱۲-۵] آزمایش بیرون‌کشش برای مطالعه‌ی مقاومت ناحیه‌ی مهاربندی شده مسلح‌کننده، به‌ویژه در

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۷/۱۵، اصلاحیه ۱۳۹۸/۹/۲۳، پذیرش ۱۳۹۸/۱۲/۱۴

DOI:10.24200/J30.2020.54486.2644

ضریب اصطکاک ظاهری سطح تماس خاک - ژئوسینتتیک است. ضریب اندرکنش بیرون کشش بین خاک و مسلح کننده را می توان با استفاده از معادلات نظری^[۱۳] یا محاسبه ی بازگشتی از نتایج آزمایش های بیرون کشش از طریق رابطه ی ۲ به دست آورد:

$$\mu_{S/GSY} = f_b \cdot \tan \varphi' = \frac{P_m}{2 \cdot L_{R \cdot \sigma'_v}} \quad (2)$$

در غیاب یک منبع موثق برای انتخاب زاویه ی اصطکاک داخلی خاک برای تعیین مقدار f_b و برای اجتناب از تحلیل های عددی فرضی، مقاومت بیرون کشش در واحد عرض مسلح کننده می تواند به صورت تابعی از ضریب اصطکاک ظاهری سطح تماس خاک - ژئوسینتتیک ($\mu_{S/GSY}$) بیان شود.^[۹]

لا به های تسلیح در حین بهره برداری گاهی تحت اثر بارهای تناوبی ناشی از عبور ترافیک و قطار، ارتعاش ماشین آلات صنعتی، ضربه ی ناشی از پهلوگیری شناورها، اثر موج بر شیروانی های حفاظت شده، یا لرزش های ناشی از زلزله قرار می گیرند. در واقع برای بررسی پایداری داخلی سازه های خاکی مسلح شده با ژئوسینتتیک ها که در معرض بارهای تناوبی قرار گرفته اند، لازم است تا مقاومت بیرون کشش و ضریب اصطکاک ظاهری سطح تماس مشترک خاک و ژئوسینتتیک در ناحیه ی مهاربندی تحت چنین شرایط بارگذاری تعیین گردد.

پژوهش های متعددی در زمینه ی تأثیر عوامل مختلف نظیر اثر سربار وارده، طول و عرض نمونه ی ژئوگرید، دیواره های جانبی، مقاومت کششی ژئوگرید و ساختار ژئوگرید بر روی مقاومت بیرون کشش ژئوگرید مدفون در خاک دانه بی تحت اثر بارهای استاتیکی انجام گرفته است.^[۶، ۸، ۹، ۱۸-۱۵] اگرچه به دلیل فقدان روش های پیش بینی کلی و دقیق و گستره ی وسیع ژئوسینتتیک ها، به ویژه در مورد ژئوگریدها، اهمیت آزمایش های بیرون کشش با کیفیت بالا و دقیق برای برآورد و بررسی اندرکنش بین ژئوسینتتیک و خاک بیشتر شده است.^[۱۳]

حال آن که مطالعات نسبتاً کمی درباره ی اندرکنش سطح تماس خاک - ژئوسینتتیک تحت اثر بار بیرون کشش تناوبی و بار کششی پساتناوبی^۴ در پژوهش های فنی پیشین وجود دارد.^[۷، ۱۹-۲۲]

راجو و فنین (۱۹۹۷) آزمایش های تناوبی و استاتیکی بر روی سه نوع ژئوگرید تک سویه ی مختلف مدفون در ماسه ی سیلیکاتی یکنواخت انجام دادند. نمونه ها به روش بارش ماسه در درصد تراکم ۸۵٪ تا ۹۰٪ آماده شدند. آنها ضریب اندرکنش بین خاک و ژئوگرید را در شرایط دینامیکی معادل ۸۰٪ حالت استاتیکی پیشنهاد کردند. همچنین نویسندگان تأکید کردند که مقاومت بیرون کشش تحت تأثیر بسامد بار کششی متناوب نیست.^[۲۰]

موراچی و کاردیل (۲۰۰۹) یک آزمایش بیرون کشش چندمرحله یی برای تخمین رفتار بیرون کششی تحت اثر بار تناوبی و پساتناوبی در سه مرحله ی بارگذاری پیشنهاد کردند. مقایسه ی بین منحنی های بیرون کشش در حالت استاتیکی و چندمرحله یی حاکی از آن است که بارهای تناوبی بیرون کششی موجب کاهش مقاومت پساتناوبی می شوند. به ویژه، کاهش مقاومت بیرون کشش پساتناوبی عمدتاً به دامنه ی بار تناوبی بیرون کششی اعمالی و تنش همه جانبه ی عمودی بستگی دارد. نتایج مشابه برای ضریب اصطکاک ظاهری پساتناوبی بیشینه به دست آمد.^[۱۹]

رزازان و همکاران (۲۰۱۸) تعدادی آزمایش استاتیکی و چندمرحله یی تناوبی بر روی تسمه های بسیاری انجام دادند. نویسندگان عوامل مختلفی شامل دامنه ی بارگذاری، بسامد بار تناوبی کششی، تعداد چرخه ی بارگذاری تناوبی و تنش عمودی مؤثر را بر روی ضریب اصطکاک ظاهری بیشینه ی سطح تماس خاک - تسمه ی بسیاری و مقاومت بیرون کششی تسمه های بسیاری مدفون در خاک ماسه ی خشک

بررسی کردند. ضریب اصطکاک ظاهری بیشینه ی سطح تماس خاک - تسمه ی بسیاری تحت اثر بار استاتیکی و تناوبی با افزایش تنش های عمودی مؤثر کاهش می یابد.^[۲۵]

مقاومت بیرون کشش ژئوگرید تابع عوامل متعددی از جمله ساختار هندسی، مقاومت نهایی کششی، سختی کششی ژئوگرید، طول و عرض نمونه ی ژئوگرید، نسبت ابعاد چشمه ی ژئوگرید به اندازه ی قطر متوسط دانه های خاک، نوع خاک، شرایط بارگذاری و شرایط مرزی و ... دارد. موراچی و کاردیل (۲۰۰۹) و همچنین راجو و فنین (۱۹۹۸) به روشنی بیان کردند که تغییر در هر یک از این عوامل می تواند منجر به نتایج متفاوت شود.^[۱۹، ۷] در این مطالعه به بررسی رفتار بیرون کششی استاتیکی و پساتناوبی یک نمونه ژئوگرید تک سویه ی تولید ایران با نام تجاری ۳۰/۸۰ GPGRIDA مدفون در خاک ماسه یی یکنواخت پرداخته شد که به لحاظ ساختار هندسی، مقاومت کششی، سختی کششی و همچنین طول و عرض نمونه و نسبت ابعاد چشمه ی ژئوگرید به قطر متوسط دانه های خاک و همچنین پارامترهای مورد بررسی بر مقاومت بیرون کشش پساتناوبی با آنچه در مطالعات قبلی انجام شده، متفاوت است. تأثیر عواملی مانند تنش مؤثر قائم بر مقاومت بیرون کششی استاتیکی به وسیله ی آزمایش های بیرون کششی جابه جایی با سرعت ثابت و تنش مؤثر قائم، دامنه، بسامد و تعداد چرخه ی بار تناوبی کششی بر مقاومت بیرون کشش پساتناوبی ژئوگرید به وسیله ی آزمایش های چندمرحله یی تناوبی بررسی شد و در نهایت بین مقاومت حاصل از آزمایش های بیرون کشش استاتیکی و چندمرحله یی تناوبی مقایسه صورت گرفت.

۲. مصالح مورد استفاده

۱.۲. خاک

به منظور انجام تحقیق حاضر، از ماسه ی سیلیسی ۱۳۱ فیروزکوه استفاده شد. این ماسه دارای رنگ زرد متمایل به طلایی است و دانه بندی یکنواختی دارد. ماسه از شرکت صنایع ریخته گری در کسبه های ۵۰ کیلوگرمی تهیه شد. به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماسه، آزمایش های آزمایشگاهی شامل دانه بندی مطابق استاندارد^[۲۶] ASTM D۶۹۱۳، تراکم استاندارد برای تعیین بیشینه ی چگالی خشک و رطوبت بهینه طبق استاندارد^[۲۷] ASTM D۶۹۸ انجام گرفت. آزمایش برش مستقیم برای تعیین زاویه ی اصطکاک بیشینه و چسبندگی مطابق با استاندارد^[۲۸] ASTM D۳۰۸۰ و در تراکم ۹۰ درصد وزن مخصوص بیشینه ی خاک ماسه و در سه تنش مؤثر قائم ۲۰ kPa، ۴۰ kPa و ۶۰ kPa انجام شد. با توجه به توزیع دانه بندی و بر اساس سیستم طبقه بندی متحد (USCS)، ماسه در رده SP قرار می گیرد. شکل ۱ توزیع دانه بندی و تصویر میکروسکوپ الکترونی ماسه ی مورد نظر و جدول ۱ مشخصات فیزیکی ماسه را نشان می دهد.

۲.۲. ژئوگرید

ژئوگرید مورد استفاده در این تحقیق از نوع ژئوگرید تک سویه با نام تجاری ۳۰/۸۰ GPGRIDA است. در نام این ژئوگرید، اعداد اول و دوم از چپ به ترتیب نشان دهنده ی مقاومت کششی در جهت طولی و عرضی برحسب کیلونیوتن بر متر است. در جدول ۲ مشخصات هندسی و مکانیکی این نوع ژئوگرید آورده شده است. همچنین در شکل ۲ تصویر ژئوگرید استفاده شده در این مطالعه نشان داده شده است. جول و همکاران (۱۹۸۴) برای اجتناب از اثر مقیاس پیشنهاد کردند



شکل ۲. تصویر ژئوگرید ۸۰/۳۰ GP GRID مورد استفاده در آزمایش‌ها.



شکل ۳. تصویر کلی از دستگاه بیرون‌کشی موجود در آزمایشگاه.

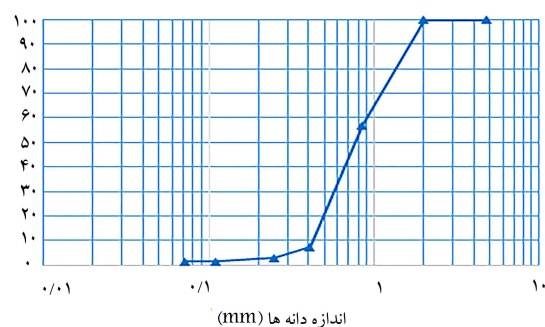
که نسبت اندازه‌ی چشمه‌های ژئوگرید به نسبت متوسط دانه‌های خاک باید بزرگ‌تر از ۳ باشد که در این مطالعه مقدار نسبت مذکور با توجه به اندازه‌ی کمیته‌ی چشمه ژئوگرید برابر با ۲۵ mm و اندازه‌ی متوسط دانه‌های خاک برابر با ۳۲/۵، ۵/۷۷ mm است.^[۱۴] همچنین با توجه به نسبت اندازه‌ی طولی چشمه‌های ژئوگرید به ضخامت اعضای عرضی برابر با ۱۶/۵، اثر تداخل بین اعضای عرضی طبق مطالعات قبلی بسیار کم است.^[۱۳، ۱۴]

۳. فرایند انجام آزمایش

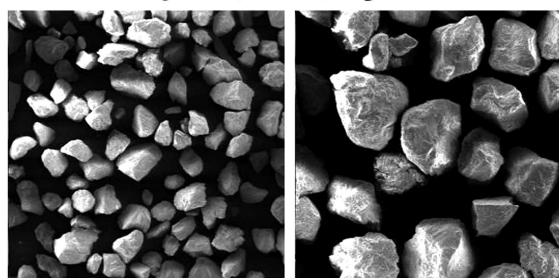
۱.۳. دستگاه بیرون‌کشی

برای انجام آزمایش‌های بیرون‌کشی از دستگاه بیرون‌کشی بزرگ‌مقیاس (شکل ۳) استفاده شد. جعبه‌ی دستگاه دارای طولی برابر ۹۰ cm، عرض ۵۰ cm و ارتفاع ۵۰ cm است که تمام الزامات و ابعاد حداقلی آیین‌نامه‌ی ۱ - ۶۷۰۶ ASTM D^[۳۰] در آن برآورده شده است. ضخامت ورق‌های تشکیل‌دهنده‌ی جداره‌ها برابر ۱۵ mm است. سیستم مکانیکی و کنترلی دستگاه شامل جک بارگذاری، موتور، پیش‌ران و سایر حسگرها نیز با استفاده از پروفیل‌های قوطی شکل به جعبه‌ی دستگاه متصل شده و همگی روی یک شاسی سوارند. برای کمیته‌سازی اثر اصطکاک دیواره‌ی جلویی دستگاه، از یک غلاف به طول ۱۵ cm در داخل جعبه‌ی دستگاه استفاده شده است. همچنین برای جلوگیری از اثر اصطکاک دیواره‌های کناری دستگاه بر نتایج آزمایش، پلاستیک شیشه مانند^۵ در جبهه داخلی جداره‌های کناری دستگاه نصب شده است. از یک گیره‌ی فلزی به منظور اتصال نمونه‌ی ژئوگرید به جک بارگذاری استفاده شده است.

برای اعمال سربار قائم در این دستگاه از کیسه‌ی هوا استفاده شده است. پس از



الف) منحنی دانه بندی ماسه مورد آزمایش؛



ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی ماسه.

شکل ۱. منحنی دانه بندی و تصویر میکروسکوپ الکترونی ماسه مورد آزمایش.

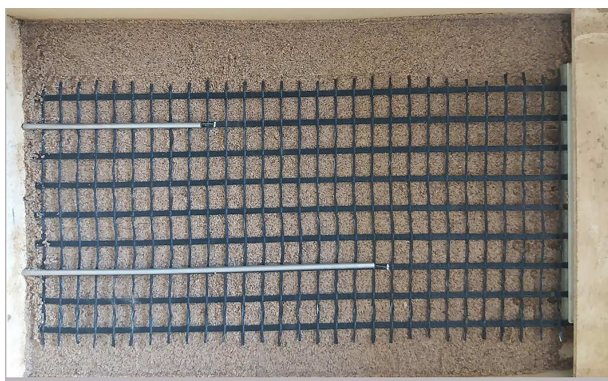
جدول ۱. مشخصات فیزیکی ماسه‌ی مورد آزمایش.

پارامترها	مقادیر
D_{10} (mm)	۰/۴۲
D_{30} (mm)	۰/۵۸
D_{50} (mm)	۰/۷۷
D_{60} (mm)	۰/۹۰
C_U	۲/۱۴
C_C	۰/۸۹
G_s	۲/۶۵
γ_{dmax} (ton/m ^۳)	۱/۶۲
γ_{dmin} (ton/m ^۳)	۱/۳۷
ω_{opt} (%)	۱۰/۱
ϕ_p (degree)	۳۹/۲
c (kPa)	۵/۵۷

جدول ۲. ویژگی‌های ژئوگرید مدل ۸۰/۳۰ GP GRID.

پارامترها	مقادیر
PET	مواد اولیه
^{۱۰} PVC	پوشش
۸۰ (kN/m)	مقاومت کششی نهایی در جهت طولی
۳۰ (kN/m)	مقاومت کششی نهایی در جهت عرضی
۱۲(%)	کرنش در مقاومت کششی اسمی در جهت طولی
۳۳ (mm)	اندازه‌ی چشمه‌ی ژئوگرید در جهت طولی
۲۵ (mm)	اندازه‌ی چشمه ژئوگرید در جهت عرضی
۲ (mm)	ضخامت

^{۱۰} poly vinyl chloride



شکل ۴. نحوه‌ی قرارگیری نمونه‌ی ژئوگرید در تراز میانی و چگونگی اتصال سیم‌ها به آن.



شکل ۵. آزمایش چگالی در محل در برای لایه‌ی بالایی نمونه‌ی ماسه.

می‌دهد. شکل ۵ آزمایش چگالی در محل که بر روی لایه بالایی نمونه خاک متراکم شده انجام گرفت را نشان می‌دهد.

۳.۳. روند انجام آزمایش‌های بیرون‌کششی جابه‌جایی با سرعت ثابت (CRD)^۹ و چند مرحله‌ی تناوبی (MS)^{۱۰}

برای مطالعه‌ی رفتار ژئوگرید در شرایط جابه‌جایی با سرعت ثابت (CRD) و بیرون‌کششی تناوبی دو فرایند مجزا استفاده می‌شود. آزمایش‌های جابه‌جایی با سرعت ثابت (CRD) به لحاظ ابعاد نمونه، شرایط مرزی و تنش عمودی اعمالی در شرایط مشابه با آزمایش‌های چندمرحله‌ی (MS) انجام شده است.

در آزمایش‌های جابه‌جایی با سرعت ثابت نیروی بیرون‌کششی به صورت جابه‌جایی کنترل و با سرعت ثابت ۱ mm/min مطابق با ۰۱ – ۰۶ ASTM D۶۷۰۶^[۳۰] به وسیله‌ی سیستم کنترل حلقه بسته به نمونه اعمال می‌شود. آزمایش زمانی پایان می‌یابد که یا پدیده‌ی بیرون‌کششی رخ دهد یا نمونه‌ی ژئوگرید گسیخته شود یا جابه‌جایی جلوبی^{۱۱} نمونه به مقدار ۷۵ میلی‌متر برسد.

رفتار بیرون‌کششی تناوبی و پساتناوبی با استفاده از آزمایش بیرون‌کششی چندمرحله‌ی بررسی شد. آزمایش‌های چندمرحله‌ی در حالت‌های مختلف بر روی نمونه‌ی ژئوگرید صورت می‌پذیرد. در مرحله‌ی اول آزمایش، آزمایش بیرون‌کششی تحت شرایط جابه‌جایی با سرعت ثابت انجام می‌شود. هنگامی که نیروی بیرون‌کششی به مقدار مشخص P_{Fi} رسید، یک نیروی بیرون‌کششی تناوبی سینوسی با بسامد و دامنه‌ی (A) بار مشخص، در حالت کنترل بار و به ازای تعداد چرخه‌ی مشخص

بستن درب دستگاه، کیسه‌ی هوا بین صفحه‌ی درب و خاک پایین آن قرار گرفته است و به این ترتیب با اعمال فشار هوا داخل کیسه، نیروی قائم معادل سربار مورد نظر در آزمایش‌ها به خاک زیرین اعمال می‌شود. این کیسه‌ی هوا به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر نسبت به صفحه‌ی فلزی، موجب اعمال بار یکنواخت‌تری می‌شود. کیسه‌ی حاضر در فضایی به ارتفاع حدود ۴ سانتی‌متر بالای جعبه قرار می‌گیرد و امکان بارگذاری تا ۷۵ kPa را دارد. در دستگاه بیرون‌کششی موجود، اعمال و کنترل بارهای وارده و همچنین ثبت اطلاعات توسط یک سیستم کاملاً هوشمند انجام می‌پذیرد. عملکرد سیستم کنترل در این دستگاه از نوع حلقه‌بسته^۶ است. با استفاده از عملکرد الکترومکانیکی و سیستم‌های کنترل خودکار، نیروی مورد نظر به مسلح‌کننده به طور کششی وارد می‌شود و مقادیر نیرو و تغییر مکان نمونه قرائت و گزارش می‌شود. همچنین برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها در طول نمونه از سه عدد سیم غیرقابل انعطاف که به سه عدد جابه‌جایی‌سنج^۷ (LVDT) متصل هستند، استفاده شد.

۲.۳. آماده‌سازی نمونه

مراحل آماده‌سازی نمونه‌ی خاک ماسه‌ی مسلح شده با ژئوگرید قبل از انجام آزمایش‌های بیرون‌کششی به شرح زیر است:

الف) خاک ماسه‌ی در ۵ لایه‌ی حدوداً ۴/۵ سانتی‌متری و تا ارتفاع حدوداً ۲۲/۵ سانتی‌متری در قسمت پایینی جعبه‌ی دستگاه بیرون‌کششی ریخته شد. هر لایه تا رسیدن به وزن مخصوص خشک برابر با ۹۰ درصد وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی ماسه و در درصد رطوبت بهینه‌ی ماسه متراکم شده است. به منظور حصول اطمینان از رسیدن به تراکم متناظر با ۹۰ درصد وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی ماسه و همچنین توزیع یکنواخت انرژی تراکمی روی سطح نمونه از یک چکش که به این منظور ساخته شده استفاده شده است. تعداد ضربات برای رسیدن به درجه‌ی تراکم متناظر با ۹۰ درصد وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی ماسه، طی آزمایش‌های مقدماتی و به صورت سعی و خطا تعیین شده است؛

ب) پس از رسیدن ارتفاع خاک به تراز میانی محفظه‌ی بیرون‌کششی در مرحله بعد، نمونه‌ی ژئوگرید متصل به گیره با نسبت طول به عرض حداقل برابر ۲، به طول ۷۲ cm و عرض ۳۳ cm بر روی خاک به صورت کاملاً افقی قرار داده شد؛ به نحوی که فاصله‌ی انتها و کناره‌های نمونه‌ی ژئوگرید تا بدنه‌ی محفظه‌ی دستگاه بیرون‌کششی حدود ۷/۵ cm به دست آید. سپس قسمت جلویی نمونه پس از عبور از میان غلاف دستگاه به گیره متصل شده است. جابه‌جایی نسبی قطعات عرضی نمونه‌ی ژئوگرید به وسیله‌ی سه عدد سیم غیرقابل کشش متصل شده به آن‌ها اندازه‌گیری شده است. این سیم‌ها به وسیله‌ی قلاب‌های مخصوص و در فواصل یکسان نسبت به هم به نمونه متصل شده‌اند، به طوری که نمونه‌ی ژئوگرید به سه قسمت برابر تقسیم شده است. سیم‌ها با عبور از حفاظ فلزی انتهایی دستگاه به سیستم LVDT متصل شده است؛

پ) نیمه‌ی بالای محفظه‌ی بیرون‌کششی نیز مانند نیمه‌ی پایینی از خاک ماسه‌ی در درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک مدنظر، در ۵ لایه‌ی حدوداً ۴/۵ سانتی‌متری و تا رسیدن به ارتفاع ۴۵ سانتی‌متری پر و متراکم شده است. سپس بالشتک هوا برای اعمال تنش‌های عمودی بر روی نمونه‌ی خاک قرار داده شده و در پوش بالایی بسته شده است. بالشتک هوا تا رسیدن به تنش قائم موردنظر تحت فشار قرار می‌گیرد. شکل ۴ نحوه‌ی قرارگیری نمونه‌ی ژئوگرید بر سطح لایه‌ی میانی و چگونگی اتصال سیم‌های غیرقابل کشش به نمونه‌ی ژئوگرید را نشان

جابه‌جایی با سرعت ثابت متناظر (P_{rm}) و با دامنه‌ی بار به ترتیب برابر با ۳۰٪، ۴۰٪ و ۵۰٪ مقاومت بیرون‌کشش آزمایش جابه‌جایی با سرعت ثابت متناظر (P_{rm}) و در بسامد ۸ Hz انجام شد. به‌منظور بررسی تأثیر بسامد بر نتایج آزمایش بیرون‌کششی چندمرحله‌یی تعداد سه آزمایش در بسامدهای ۵ Hz، ۷ Hz و ۸ Hz و در تنش مؤثر قائم ۴۰ kPa انجام شد. تأثیر تعداد چرخه‌ی بار تناوبی بر نتایج مقاومت بیرون‌کششی پساتناوبی نیز با انجام دو آزمایش در تعداد چرخه‌ی ۳۰ و ۱۰۰ و در تنش مؤثر قائم ۴۰ kPa بررسی شد.

۵. روش تحلیل نتایج

در این مطالعه، P_{rm} مقاومت بیرون‌کشش ژئوگرید، به‌صورت نیرو در واحد عرض در طی آزمایش بیرون‌کشش تعریف می‌شود. برای ژئوگرید نیروی بیرون‌کشش که در طی آزمایش بر هر واحد عرض ژئوگرید اعمال می‌شود، از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید: [۳۰]

$$P_{rm} = \frac{F_p \times n_g}{N_g} \quad (3)$$

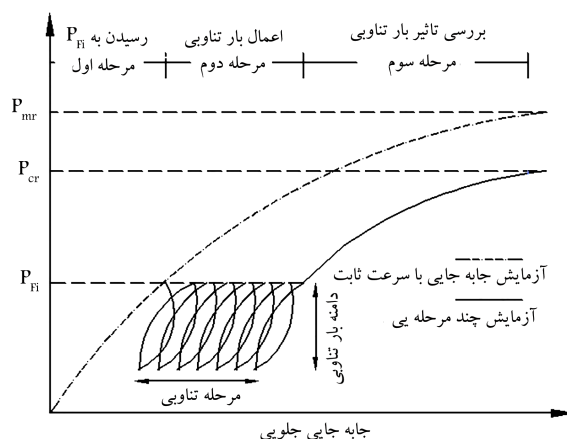
که در این رابطه F_p نیروی بیرون‌کششی اعمال شده به نمونه‌ی ژئوگرید، n_g تعداد نوارهای طولی در هر یک متر از عرض ژئوگرید در جهت نیروی بیرون‌کشش، و N_g تعداد نوارهای طولی در عرض نمونه‌ی ژئوگرید مورد آزمایش در جهت نیروی بیرون‌کشش است. ضریب اصطکاک ظاهری سطح تماس خاک - ژئوگرید ($\mu S/GSY$) یک پارامتر مهم برای طراحی سازه‌های خاکی مسلح شده با ژئوگرید است که از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید که در این رابطه L_R طول ژئوگرید در نیروی بیرون‌کشش بیشینه است. حاصل تفریق مقدار جابه‌جایی جلویی نمونه‌ی ژئوگرید از مقدار جابه‌جایی آخرین نوار عرضی آن در انتهای آزاد در نیروی بیرون‌کشش بیشینه، برابر با تغییر طول نمونه ژئوگرید در نیروی بیرون‌کشش بیشینه است که باید به طول اولیه‌ی نمونه اضافه شود و در محاسبات ضریب اصطکاک ظاهری بیشینه در نظر گرفته شود.

۶. نتایج و بحث

به‌منظور بررسی تکرارپذیری نتایج آزمایش بیرون‌کشش، هر سه آزمایش بیرون‌کشش جابه‌جایی با سرعت ثابت سه مرتبه انجام گرفت. شکل‌های ۷ و ۸ نتایج آزمایش‌ها و تکرارپذیری آنها را به‌ترتیب در تنش مؤثر قائم ۲۰ kPa و ۴۰ kPa نشان می‌دهند که اختلاف مقاومت بیشینه‌ی بیرون‌کشش و در هر سه آزمایش انجام شده با یکدیگر در دو تنش سربار مذکور، کمتر از ۵ درصد بوده و بیان‌گر تکرارپذیری قابل قبول نتایج است.

شکل ۹ تغییرات نیروی بیرون‌کشش در برابر جابه‌جایی جلویی نمونه‌ی ژئوگرید مدفون در خاک ماسه‌یی (اندازه‌گیری شده در لبه‌ی چسبیده به گیره) را در سه تنش مؤثر قائم مختلف ۲۰ kPa، ۴۰ kPa و ۶۰ kPa نشان می‌دهد. در شکل ۹ مشخص است که در قسمت ابتدایی نمودار و تا جابه‌جایی حدوداً ۷ میلیمتری، منحنی نیروی بیرون‌کشش در برابر جابه‌جایی دارای شیب بیشتری است که نشان‌دهنده‌ی بسیج سریع‌تر نیروی بیرون‌کشش در این محدوده از جابه‌جایی است.

همچنین تا جابه‌جایی حدوداً ۷ mm هر سه نمودار مقدار نیروی بیرون‌کشش یکسانی را نشان می‌دهند که بیان‌گر عدم تأثیرگذاری تنش‌های مؤثر قائم در جابه‌جایی‌های کوچک بر مقدار مقاومت بیرون‌کشش ژئوگرید است.



شکل ۶. نمایش الگوی بارگذاری آزمایش جابه‌جایی با سرعت ثابت و چندمرحله‌یی.

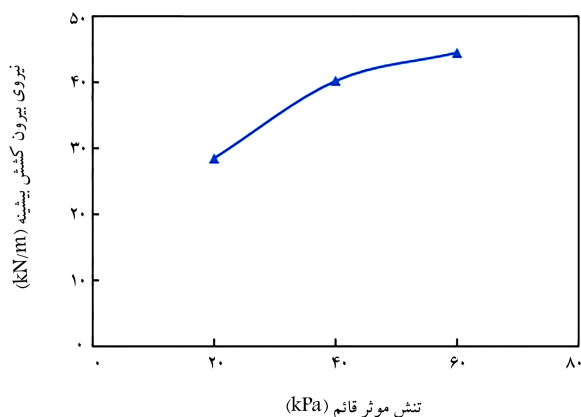
بر نمونه اعمال خواهد شد. نیروی P_{Fi} و دامنه‌ی بار درصدی از مقاومت نهایی بیرون‌کششی نمونه در حالت جابه‌جایی با سرعت ثابت خواهند بود. پس از این مرحله آزمایش مجدداً تحت شرایط جابه‌جایی با سرعت ثابت و مشابه مرحله‌ی اول ادامه خواهد یافت تا این‌که نمونه‌ی ژئوگرید به جابه‌جایی جلویی ۷۵ میلی‌متر، گسیختگی بیرون‌کششی یا گسیختگی کششی برسد.

مرحله‌ی اول و دوم آزمایش چندمرحله‌یی بیرون‌کشش به‌ترتیب شرایطی را شبیه‌سازی می‌کند که ژئوگرید درون سازه مسلح‌شده‌ی خاکی تحت اثر نیروی بیرون‌کششی استاتیکی ناشی از وزن توده‌ی خاک قرار می‌گیرد و سپس نیروهای لرزه‌یی موجب افزایش نیروی‌های کششی می‌گردند. در مرحله‌ی آخر آزمایش، بین نتایج آزمایش با مقادیر آزمایش‌های استاتیکی مرسوم با سرعت ثابت مقایسه‌یی انجام خواهد گرفت تا این‌که تغییرات مقاومت بیرون‌کششی در اثر بارهای کششی تناوبی بررسی شود. شکل ۶ مراحل بارگذاری در آزمایش جابه‌جایی با سرعت ثابت و چندمرحله‌یی را نشان می‌دهد.

۴. برنامه‌ی آزمایش

برای بررسی عوامل مؤثر بر مقاومت استاتیکی و پساتناوبی ژئوگرید مدفون در خاک ماسه‌یی یک برنامه‌ی آزمایشگاهی ترتیب داده شد. همچنین اثر تنش مؤثر قائم در مورد مقاومت بیرون‌کشش استاتیکی ژئوگرید و تأثیر بسامد، تعداد چرخه، دامنه‌ی بار کششی تناوبی و تنش مؤثر قائم بر مقاومت پساتناوبی ژئوگرید بررسی شد.

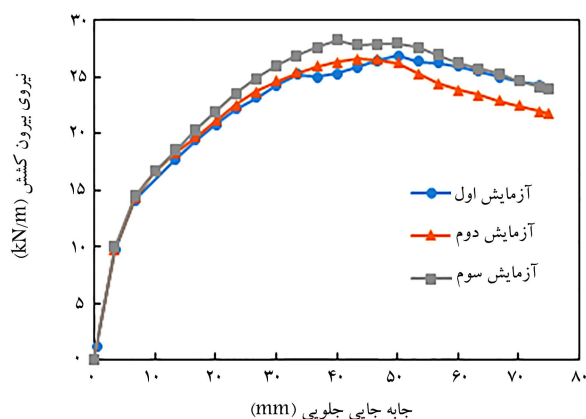
در ابتدا تعداد سه آزمایش بیرون‌کشش استاتیکی برای سه سربار قائم ۲۰ kPa، ۴۰ kPa و ۶۰ kPa انجام گرفت. سپس در هر سربار قائم تعداد ۳ آزمایش بیرون‌کشش چندمرحله‌یی و در مجموع تعداد ۹ آزمایش بیرون‌کشش چندمرحله‌یی برای تحقیق درباره‌ی اثر دامنه بار تناوبی بر مقاومت بیرون‌کشش پساتناوبی ژئوگرید صورت پذیرفت. مرحله تناوبی تمامی آزمایش‌های چندمرحله‌یی از یک مقدار نیروی مشخص برابر با ۳۵٪ مقاومت بیرون‌کشش آزمایش جابه‌جایی با سرعت ثابت متناظر (P_{mr}) شروع شد. همچنین بار تناوبی با اعمال تعداد ۳۰ چرخه بار کششی افقی و با دامنه بار به ترتیب برابر با ۳۰٪، ۴۰٪ و ۵۰٪ مقاومت بیرون‌کشش آزمایش جابه‌جایی با سرعت ثابت (P_{mr}) و در بسامد ۸ Hz بر ژئوگرید اعمال شد. تمام آزمایش‌های بیرون‌کشش چندمرحله‌یی با اعمال تعداد ۳۰ چرخه بار کششی افقی از یک مقدار نیروی مشخص برابر با ۳۵٪ مقاومت بیرون‌کشش آزمایش



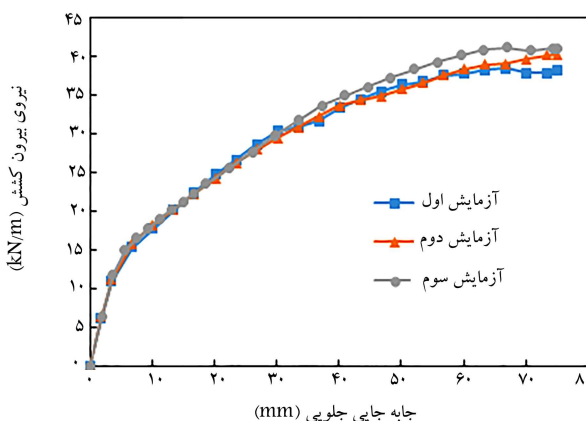
شکل ۱۰. مقاومت پیشینه‌ی بیرون‌کششی ژئوگرید به‌ازای مقادیر مختلف تنش مؤثر قائم.

مؤثر قائم 40 kPa و 60 kPa مقاومت بیرون‌کششی با افزایش جابه‌جایی رفتار سخت‌شوندگی کرنشی از خود نشان می‌دهد. مطالعات قبلی^[۱۹] در زمینه‌ی تأثیر تنش مؤثر قائم بر روی مقاومت بیرون‌کششی ژئوگرید دارای ساختارهای هندسی و مکانیکی مختلف مدفون در خاک ماسه‌یی متراکم نیز این روند را نشان دادند. نمونه‌ی ژئوگرید تحت تنش مؤثر قائم بزرگتر قابلیت کشش بیشتری از خود نشان داده است و موجب شکل‌گیری سازوکار اندرکششی پیش‌رونده و در نتیجه منجر به افزایش مداوم مقاومت بیرون‌کششی با افزایش جابه‌جایی می‌شود. به عبارت دیگر رفتار ژئوگرید در تنش‌های سربار کم به صورت لغزشی است در حالی‌که در تنش‌های سربار زیادتر رفتار ژئوگرید به صورت ازدیاد طول است. در تنش مؤثر قائم 20 kPa نمونه‌ی ژئوگرید کرنش‌های طولی کمتری از خود نشان داده است و سازوکار اندرکششی بین خاک ماسه‌یی و ژئوگرید به صورت هم‌زمان و سریع‌تر در طول نمونه‌ی ژئوگرید رخ می‌دهد و پس از این‌که مقاومت بیرون‌کششی ژئوگرید به مقدار مشخصی رسید، به دلیل فرایند لغزشی بین ژئوگرید و خاک ماسه‌یی مقاومت با افزایش جابه‌جایی کاهش می‌یابد. در حالی‌که در تنش‌های مؤثر 40 kPa و 60 kPa ، محدودتر شدن فرایند انتقال تنش‌های برشی در طول نمونه منجر به بسیج شدن بیشتر تنش برشی سطح تماس خاک و ژئوگرید به‌ویژه در قسمت نزدیک به محل اعمال بار شده و در نتیجه مقاومت بیرون‌کششی ژئوگرید به صورت پیش‌رونده با افزایش جابه‌جایی افزایش می‌یابد. موراچی و ریکالکاتی (۲۰۰۶) با مطالعه بر روی رفتار بیرون‌کششی استاتیکی یک نوع ژئوگرید تک‌سویه HDPE^{۱۲} نشان دادند که رفتار بیرون‌کششی ژئوگرید در تنش‌های مؤثر قائم کم (10 kPa و 25 kPa) به صورت نرم‌شوندگی کرنشی و در تنش‌های مؤثر قائم بالاتر (50 kPa و 100 kPa) به صورت سخت‌شوندگی کرنشی است. همچنین آنها نشان دادند افزایش تنش مؤثر قائم منجر به افزایش مقاومت بیرون‌کششی نهایی ژئوگرید می‌شود.^[۹] تغییرات مقاومت بیرون‌کششی پیشینه‌ی ژئوگرید در برابر تنش سربار اعمالی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مقاومت بیرون‌کششی پیشینه‌ی ژئوگرید با افزایش تنش مؤثر قائم افزایش می‌یابد به‌طوری‌که مقدار نیروی بیرون‌کششی پیشینه‌ی ژئوگرید به‌ازای تنش مؤثر قائم 20 kPa ، 40 kPa و 60 kPa به ترتیب مقادیر $24/40 \text{ kN/m}$ ، $52/28 \text{ kN/m}$ و $53/44 \text{ kN/m}$ می‌باشد.

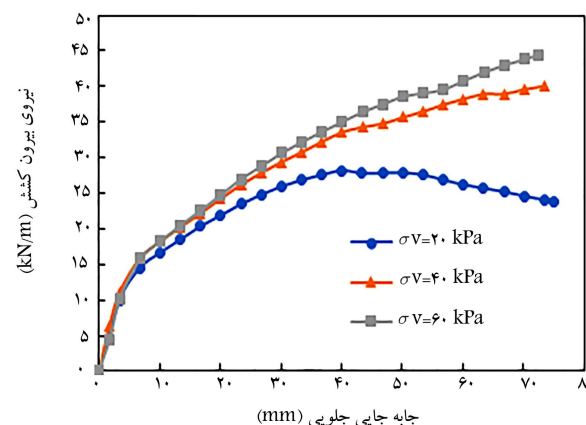
از آن‌جا که طبق تحقیقات قبلی^[۱۷،۲۱] مقاومت شکل گرفته‌ی خاک در جلوی نوارهای عرضی ژئوگرید سهم عمده‌یی در مقاومت کلی بیرون‌کششی ژئوگرید دارد و بین ۷۵ تا ۹۰ درصد مقاومت بیرون‌کششی ژئوگرید از مؤلفه‌ی مقاومت شکل



شکل ۷. نتایج آزمایش‌های تکرارپذیری مقاومت بیرون‌کششی در برابر جابه‌جایی جلویی در تنش مؤثر قائم 20 kPa .



شکل ۸. نتایج آزمایش‌های تکرارپذیری مقاومت بیرون‌کششی در برابر جابه‌جایی جلویی در تنش مؤثر قائم 40 kPa .



شکل ۹. مقاومت بیرون‌کششی ژئوگرید در برابر جابه‌جایی به ازای مقادیر مختلف تنش مؤثر قائم.

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، الگوی رفتاری نمودارهای بیرون‌کششی با تغییر تنش مؤثر قائم تغییر می‌کند. با توجه به شکل نمودارها، در تنش مؤثر قائم پایین (20 kPa) با افزایش جابه‌جایی، مقاومت بیرون‌کششی ژئوگرید ابتدا سخت‌شوندگی کرنشی و پس از رسیدن به پیشینه‌ی مقاومت در برابر بیرون کشیده شدن، رفتار نرم‌شوندگی کرنشی را از خود نشان می‌دهد. در حالی‌که در تنش‌های

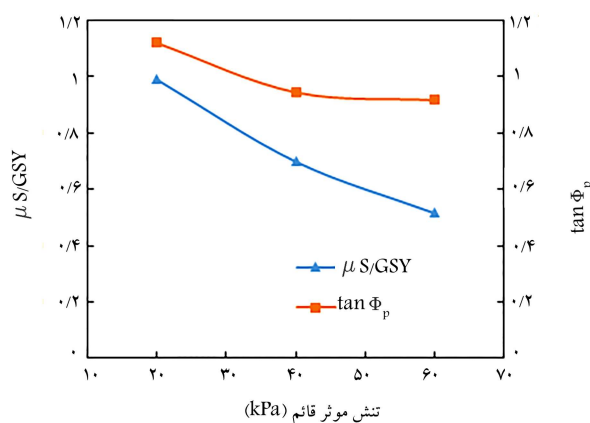


الف) تحت تنش مؤثر قائم ۴۰ kPa



ب) تحت تنش مؤثر قائم ۶۰ kPa

شکل ۱۱. تصویر نمونه‌ی ژئوگرید پس از انجام آزمایش بیرون کشش.



شکل ۱۲. نمودار تغییرات ضریب اصطکاک ظاهری سطح تماس بیشینه $\tan \phi_p$ در برابر تنش مؤثر قائم.

ماسه‌ی یکنواخت که توسط موراجی و کاردیل (۲۰۰۹) انجام گرفت نشان داد که تغییر بسامد بار چرخه از ۰/۵ Hz به ۰/۱ Hz موجب تغییر بسیار ناچیز در مقاومت پساتناوبی ژئوگرید می‌شود که قابل چشم‌پوشی است.^[۱۹] همچنین رزازان و همکاران (۲۰۱۸) با انجام یک‌سری آزمایش‌های بیرون‌کشش چندمرحله‌ای بر روی تسمه‌های بسیاری مدفون در خاک ماسه‌یی متراکم نشان دادند که تغییر بسامد از ۰/۱ Hz تا ۰/۵ Hz تأثیری بر مقاومت بیرون‌کشش این نوع مسلح‌کننده ندارد.^[۲۵]

شکل ۱۶ تأثیر تعداد چرخه‌ی بارکششی در مرحله‌ی دوم آزمایش بیرون‌کشش چندمرحله‌ای را بر مقاومت بیرون‌کشش پساتناوبی ژئوگرید به ترتیب در ۳۰ و ۱۰۰ چرخه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش تعداد چرخه تأثیر

گرفته‌ی خاک در جلوی اجزای عرضی به دست می‌آید، از این رو با افزایش سربار وارده نیروهای بین دانه‌یی در ماسه و به تبع آن مقاومت ماسه در منافذ ژئوگرید بیشتر شده و در نتیجه مقاومت بیرون‌کششی بیشینه‌ی ژئوگرید نیز بالاتر می‌رود.

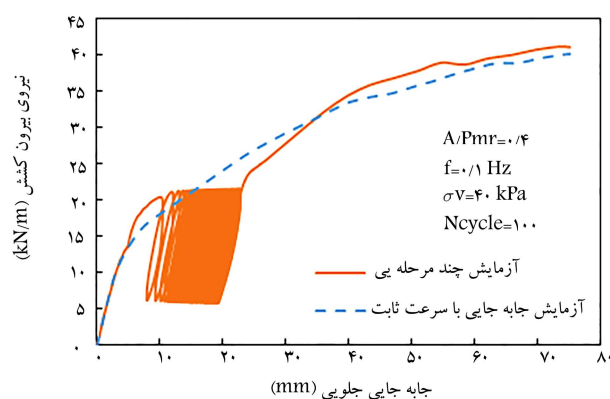
شکل ۱۱ تصویر نمونه‌های ژئوگرید را در انتهای آزمایش بیرون‌کشش با تنش‌های مؤثر قائم ۴۰ kPa و ۶۰ kPa نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش تنش سربار میزان پارگی نوارهای عرضی ژئوگرید افزایش یافته است. با افزایش تنش مؤثر قائم، نیروهای قفل و بست بین دانه‌های ماسه در چشمه‌های ژئوگرید افزایش و در اثر آن مقاومت مقاوم خاک جلوی اجزای عرضی افزایش پیدا می‌کند و موجب گسیختگی اجزای عرضی ژئوگرید می‌شود.

روند تغییرات ضریب اصطکاک ظاهری بیشینه‌ی سطح تماس ماسه و ژئوگرید $(\mu S/GSY)$ در برابر تنش مؤثر قائم در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تنش مؤثر قائم عمودی، ضریب اصطکاک سطح تماس بیشینه کاهش می‌یابد. مهم‌ترین عامل در ایجاد این پدیده می‌تواند اتساع خاک در تنش‌های مؤثر قائم کم باشد.

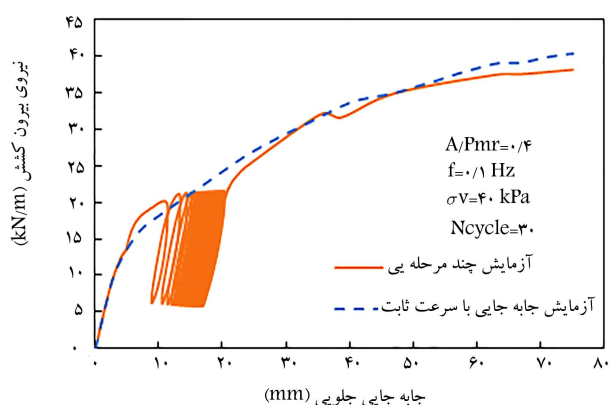
پدیده‌ی اتساع با شکل‌گیری سطوح گسیختگی مقاوم که در مقابل نقاط گره‌یی و نوارهای عرضی شکل می‌گیرند، مرتبط است. قابلیت کشش ژئوگرید در تنش‌های سربار بالاتر را، که موجب تعدیل توزیع تنش‌های برشی و در نتیجه نیروی بیرون‌کشش می‌گردد، نیز می‌توان در توجیه این پدیده بیان کرد. همچنین به‌منظور مقایسه‌ی ضریب اصطکاک ظاهری بیشینه‌ی سطح تماس خاک با ژئوگرید و ضریب اصطکاک خاک، نمودار $\tan \phi_p$ در برابر تنش عمودی نیز رسم شد. مقایسه‌ی بین دو نمودار شکل ۱۲ نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک بیشینه‌ی سطح تماس خاک ماسه‌یی و ژئوگرید همواره از $\tan \phi_p$ کمتر است و این اختلاف با افزایش تنش مؤثر قائم افزایش می‌یابد.

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ تغییرات جابه‌جایی نمونه‌ی ژئوگرید در طول آن را به ترتیب در انتهای آزمایش بیرون‌کشش و در نیروی بیرون‌کشش بیشینه به‌ازای تنش‌های مؤثر قائم مختلف نشان می‌دهند. همان‌طور که از شکل‌ها مشخص است، جابه‌جایی‌های ثبت شده به‌وسیله‌ی جابه‌جایی‌سنج‌ها (LVDT) در طول نمونه حاکی از توزیع غیرخطی تغییر شکل و تنش برشی در طول نمونه‌ی ژئوگرید است. به‌ازای تمام تنش‌های مؤثر قائم، مقدار جابه‌جایی‌های نقاط در طول نمونه در بخش ابتدایی بیشتر است و با افزایش فاصله از نقطه‌ی اعمال جابه‌جایی، از مقدار جابه‌جایی‌های نقاط در طول نمونه کاسته می‌شود. قابلیت کشش ژئوگرید و شکل‌گیری سازوکار خرابی پیش‌رونده در طول نمونه‌ی ژئوگرید، نقش بسزایی در کاهش مقدار جابه‌جایی نقاط در طول نمونه با افزایش فاصله از نقطه‌ی اعمال بار دارد. همچنین با افزایش تنش مؤثر قائم به دلیل تغییر رفتار ژئوگرید از حالت لغزش به حالت ازدیاد طول، شیب خط واصل بین نقاطی که در آن جابه‌جایی ثبت شد، افزایش می‌یابد.

برای بررسی تأثیر بسامد در مرحله‌ی دوم آزمایش‌های بیرون‌کشش چندمرحله‌ای بر مقاومت بیرون‌کششی پساتناوبی تعداد سه آزمایش در بسامدهای ۰/۵ Hz، ۰/۱ Hz و ۰/۵ Hz، در تنش مؤثر قائم ۴۰ kPa و تعداد ۳۰ چرخه‌ی بارکششی تناوبی صورت گرفت. شکل ۱۵ نمودار مقاومت بیرون‌کشش پساتناوبی بیشینه‌ی حاصل از آزمایش بیرون‌کشش چندمرحله‌ای را در برابر بسامد متناظر آن نشان می‌دهد. افزایش بسامد از ۰/۵ Hz به ۰/۱ Hz موجب کاهش ۶ درصدی و از ۰/۱ Hz به ۰/۵ Hz موجب کاهش ۵ درصدی مقاومت بیرون‌کشش پساتناوبی بیشینه شده است. با این حال نتایج حاکی از تأثیر کم تغییرات بسامد بر مقاومت بیرون‌کشش پساتناوبی بیشینه دارد. مطالعات پیشین در زمینه‌ی بررسی تأثیر بسامد بر روی مقاومت پساتناوبی ژئوگرید تک‌سویه‌ی HDPE مدفون در خاک



الف) چرخه ۱۰۰



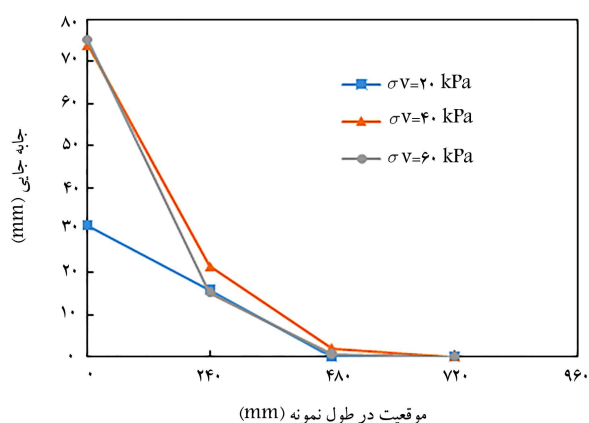
ب) چرخه ۳۰

شکل ۱۶. تأثیر تعداد چرخه‌ی بارکششی تناوبی بر مقاومت بیرون‌کششی پساتناوبی در تنش مؤثر قائم ۴۰ kPa و بسامد ۰/۱ Hz.

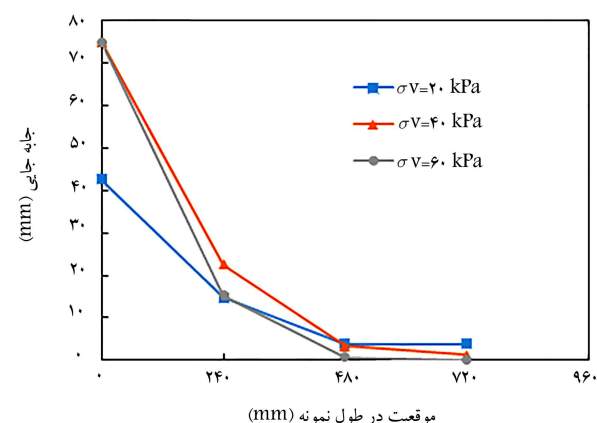
بین نتایج به دست آمده از آزمایش‌های جابه‌جایی با سرعت ثابت (نمودار خط‌چین) و آزمایش‌های چندمرحله‌ای تناوبی (نمودار خط پیوسته) در شرایط یکسان تنش مؤثر قائم و طول نمونه، مقایسه‌ی انجام شده که در شکل‌های ۱۷، ۱۸ و ۱۹ نشان داده شده است. در تمام آزمایش‌های چندمرحله‌ای تناوبی، مرحله‌ی دوم آزمایش که شامل اعمال نیروی بیرون‌کششی تناوبی در شرایط نیرو کنترل است، با بسامد ثابت ۰/۱ Hz و تعداد ۳۰ چرخه‌ی بار تناوبی انجام گرفت. برای بررسی تأثیر دامنه‌ی بار نیروی کششی تناوبی اعمالی در مرحله‌ی دوم، آزمایش‌های بیرون‌کششی چندمرحله‌ای در هر تنش مؤثر قائم به ازای سه مقدار متفاوت دامنه‌ی بار تناوبی کششی ۳۰٪، ۴۰٪ و ۵۰ درصد نیروی بیرون‌کششی بیشینه‌ی استاتیکی (به دست آمده از آزمایش‌های بیرون‌کششی جابه‌جایی با سرعت ثابت) انجام گرفت.

شکل ۱۷ تأثیر مقدار دامنه‌ی بارکششی تناوبی را بر مقاومت بیرون‌کششی پساتناوبی در تنش مؤثر قائم ۲۰ kPa و در مقادیر دامنه‌ی بار ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد مقاومت بیرون‌کششی بیشینه‌ی استاتیکی نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۷، مقاومت پساتناوبی بیشینه حاصل از آزمایش بیرون‌کششی چندمرحله‌ای در مقایسه با مقدار متناظر به دست آمده از آزمایش بیرون‌کششی جابه‌جایی با سرعت ثابت، کاهش یافته است.

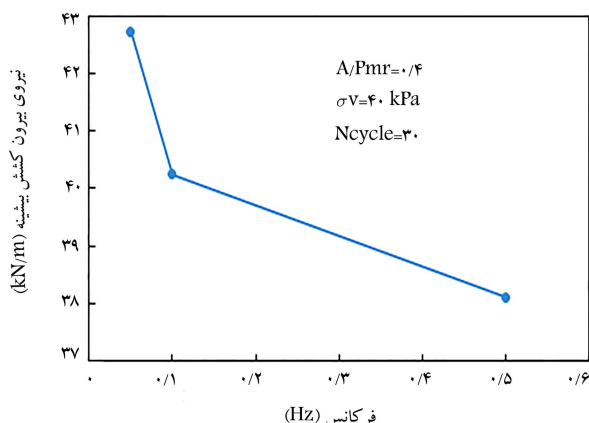
این میزان کاهش مقاومت بیرون‌کششی پساتناوبی بیشینه اگرچه ناچیز به نظر می‌رسد، اما با افزایش مقدار دامنه‌ی بارکششی افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که میزان کاهش مقاومت بیرون‌کششی پساتناوبی بیشینه در مقایسه با مقاومت بیرون‌کششی



شکل ۱۳. تغییرات جابه‌جایی در طول نمونه‌ی ژئوگرید در انتهای آزمایش.

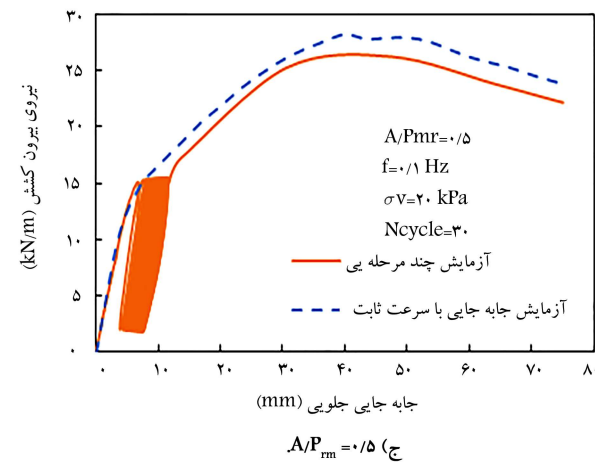
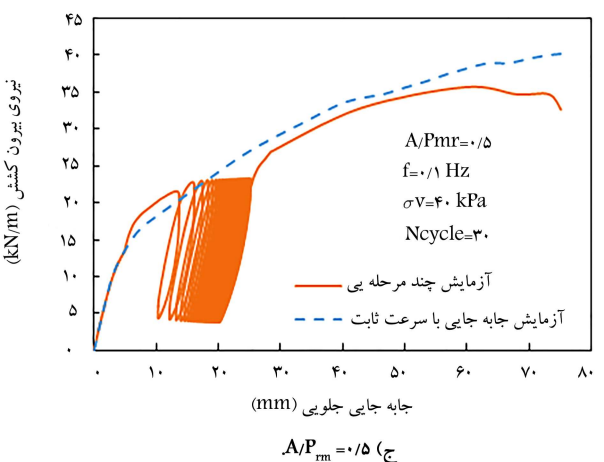
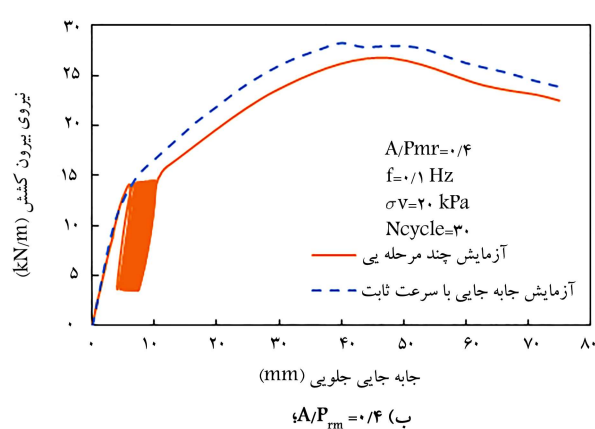
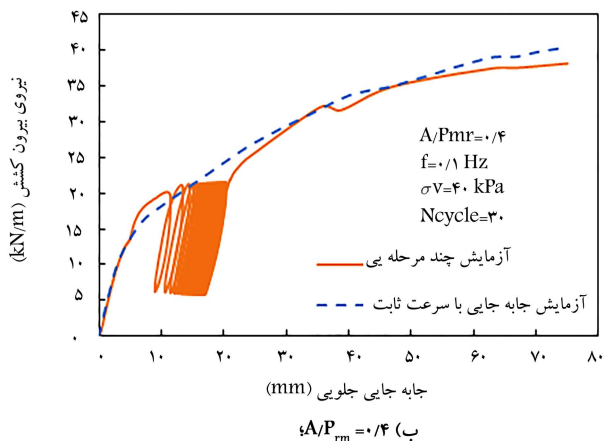
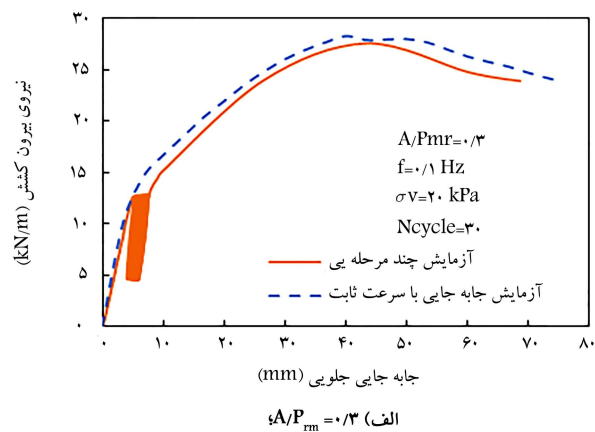
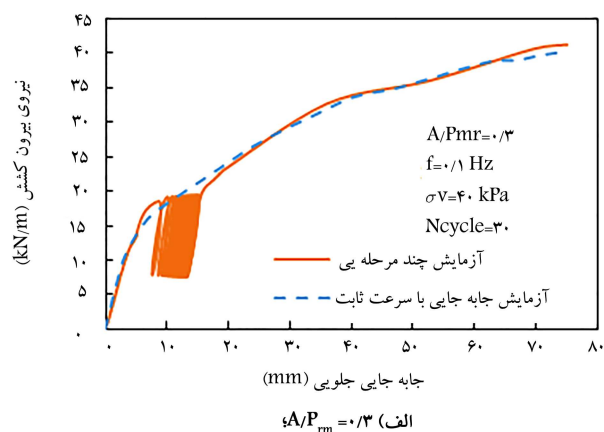


شکل ۱۴. تغییرات جابه‌جایی در طول نمونه‌ی ژئوگرید در نیروی بیرون‌کششی بیشینه.



شکل ۱۵. تأثیر بسامد بارکششی تناوبی بر مقاومت بیرون‌کششی پساتناوبی در تنش مؤثر قائم ۴۰ kPa و تعداد ۳۰ چرخه‌ی بارکششی تناوبی.

قابل توجهی بر مقاومت بیرون‌کششی پساتناوبی بیشینه نداشته است؛ اما مطابق انتظار جابه‌جایی‌های تجمعی در انتهای مرحله‌ی دوم آزمایش انجام شده در ۱۰۰ چرخه، نسبت به جابه‌جایی‌های تجمعی در انتهای مرحله‌ی دوم آزمایش با ۳۰ چرخه افزایش یافته است. رزازان و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از آزمایش‌های چندمرحله‌ای نشان دادند تغییر تعداد چرخه از ۳۰ به ۲۵۰ موجب تغییر قابل‌ملاحظه‌ی در مقاومت پساتناوبی تسمه‌های نسپاری مدفون در خاک ماسه‌ای متراکم نمی‌شود.^[۲۵]



شکل ۱۸. مقایسه‌ی بین آزمایش بیرون‌کششی جابه‌جایی با سرعت ثابت (CRD) و چند مرحله‌ی تناوبی (MS) تحت اثر تنش مؤثر قائم ۴۰ kPa و بسامد ۰/۱ Hz.

شکل ۱۷. مقایسه‌ی بین آزمایش بیرون‌کششی جابه‌جایی با سرعت ثابت (CRD) و چند مرحله‌ی تناوبی (MS) تحت اثر تنش مؤثر قائم ۲۰ kPa و بسامد ۰/۱ Hz.

کاهش می‌یابد تا اینکه به مقدار متناظر در آزمایش جابه‌جایی با سرعت ثابت می‌رسد.

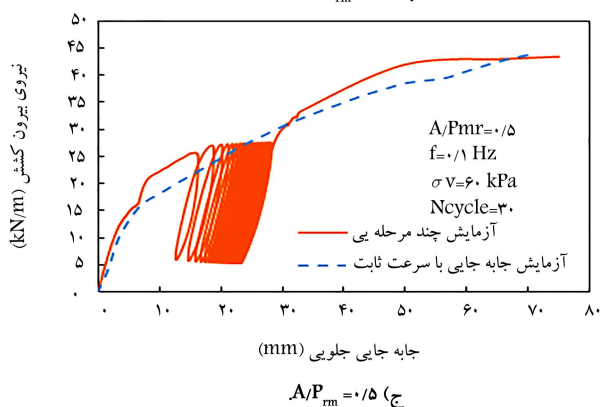
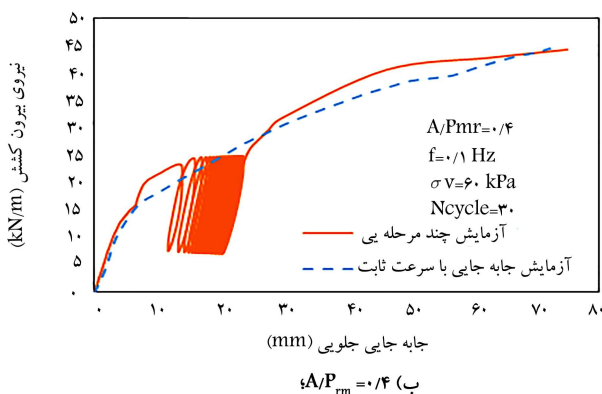
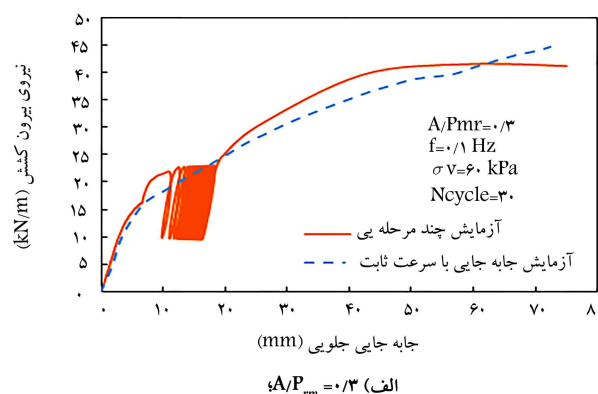
تأثیر مقدار دامنه‌ی بارکششی تناوبی بر مقاومت بیرون‌کششی پستانوبی در تنش مؤثر قائم ۴۰ kPa و به ترتیب به ازای مقادیر دامنه‌ی بار ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد مقاومت بیرون‌کششی پیشینه‌ی استاتیکی به ترتیب در شکل ۱۸ نشان داده شده است. در دامنه‌ی بار $A/P_{rm} = 0/4$ و $A/P_{rm} = 0/5$ مقاومت بیرون‌کششی پستانوبی نهایی ژئوگريد نسبت به مقاومت بیرون‌کششی متناظر حاصل از آزمایش بیرون‌کششی جابه‌جایی با سرعت ثابت، به ترتیب کاهش ۷ و ۱۸ درصدی داشته است؛

استاتیکی پیشینه به ازای $A/P_{rm} = 0/3$ ، $A/P_{rm} = 0/4$ و $A/P_{rm} = 0/5$ به ترتیب ۳/۴٪، ۶٪ و ۸٪ است. همچنین پایان مرحله‌ی دوم (مرحله‌ی اعمال بارهای بیرون‌کششی تناوبی) همراه با جابه‌جایی‌های تجمعی در نمونه‌ی ژئوگريد است، که این جابه‌جایی تجمعی با افزایش دامنه‌ی بارکششی افزایش می‌یابد. مقایسه‌ی بین سختی کششی بارگذاری - باربرداری در انتهای مرحله‌ی دوم (شیب منحنی مقاومت بیرون‌کششی - جابه‌جایی) و سختی کششی در ابتدای مرحله‌ی دوم نشان می‌دهد که اعمال بارگذاری تناوبی موجب افزایش سختی کششی می‌شود و در نهایت در مرحله‌ی سوم آزمایش با افزایش تدریجی جابه‌جایی، سختی کششی

دوم و اعمال جابه جایی به نمونه با سرعت ثابت در مرحله سوم، مقاومت بیرون کششی پستانوبی ژئوگرید نسبت به مقاومت بیرون کششی متناظر حاصل از آزمایش بیرون کششی جابه جایی با سرعت ثابت افزایش می یابد و با افزایش جابه جایی به تدریج کاهش پیدا می کند، تا این که در انتهای مرحله سوم مقاومت پستانوبی نمونه ژئوگرید با مقاومت متناظر در آزمایش بیرون کششی با جابه جایی ثابت برابر می شود.

به عبارت دیگر، اعمال بارگذاری تناوبی در مرحله دوم ذرات ماسه را در شرایط کسب مقاومت مجدد قرار می دهد. در مرحله سوم آزمایش چندمرحله ای، رفتار سخت شونده تا یک میزان مشخص از مقاومت بیرون کششی ادامه پیدا می کند و سپس از یک جابه جایی مشخص تا انتهای آزمایش، رفتار نرم شونده مشاهده می شود. همانند دو تنش سربار 20 kPa و 40 kPa ، جابه جایی های تجمعی در نمونه ژئوگرید در مرحله دوم با افزایش دامنه ای بار افزایش پیدا کرده است. با توجه به قابلیت کشش بالای ژئوگرید مورد استفاده، اعمال دامنه ای بار کششی بیشتر در مرحله دوم موجب افزایش جابه جایی های تجمعی در آن شده است. با مقایسه جابه جایی های تجمعی به وجود آمده در هر سه تنش قائم مؤثر، کاملاً مشهود است که افزایش تنش مؤثر قائم موجب افزایش مقدار این جابه جایی شده است. در تنش سربار 20 kPa با توجه به این که فرایند لغزشی حاکم می شود، جابه جایی های تجمعی کمتری در مرحله دوم در نمونه ایجاد می شود. از آنجا که در تنش های 40 kPa و 60 kPa فرایند بیرون کششی ژئوگرید به صورت ازدیاد طول است، با اعمال بار کششی تناوبی در مرحله دوم آزمایش چندمرحله ای، جابه جایی های بیشتری نسبت به تنش مؤثر قائم 20 kPa رخ می دهد.

مقایسه نتایج آزمایش های بیرون کششی چندمرحله ای انجام شده با نتایج آزمایش های بیرون کششی جابه جایی با سرعت ثابت در تنش مؤثر قائم 60 kPa نشان داد که اعمال بارگذاری تناوبی تأثیر چندانی در کاهش مقاومت بیرون کششی پستانوبی بیشینه نسبت به مقاومت بیرون کششی استاتیکی بیشینه مدفون در خاک ماسه ای ندارد؛ حال آنکه در تنش مؤثر قائم 20 kPa و 40 kPa کاهش مقاومت بیرون کششی پستانوبی بیشینه نسبت به مقاومت بیرون کششی استاتیکی بیشینه مشهودتر است. موراچی و کاردیل (۲۰۰۹) با بررسی رفتار بیرون کششی ژئوگرید تک سوپیه HDPE مدفون در ماسه یکنواخت متراکم نشان دادند که میزان کاهش مقاومت بیرون کششی پستانوبی ژئوگرید نسبت به مقاومت بیرون کششی استاتیکی متناظر آن در تنش های مؤثر قائم بالاتر (50 kPa) نسبت به تنش های مؤثر قائم کمتر 10 kPa و 25 kPa بیشتر است.^[۱۹] نیری و فخاریان (۲۰۰۹) با بررسی رفتار ژئوگرید HDPE در خاک ماسه متراکم به این نتیجه رسیدند که نسبت مقاومت پستانوبی ژئوگرید نسبت به مقاومت استاتیکی در شرایط یکسان و در تنش های مؤثر قائم کم 15 kPa و 25 kPa بزرگتر از یک و در تنش های مؤثر قائم بیشتر (50 kPa) کمتر از یک است.^[۱۹] مقایسه ای بین نتایج حاصل از این تحقیق و نتایج به دست آمده توسط موراچی و کاردیل (۲۰۰۹) و نیری و فخاریان (۲۰۰۹) حاکی از آن است که رفتار بیرون کششی پستانوبی ژئوگرید بسته به نوع، ساختار هندسی و مشخصات مکانیکی ژئوگرید می تواند متفاوت باشد. همان طور که از نتایج مشخص است، در تنش مؤثر قائم 20 kPa و 40 kPa یا به عبارتی اعماق سطحی یک دیوار حائل اعمال بار تناوبی منجر به کاهش مقاومت نهایی پستانوبی ژئوگرید نسبت به مقاومت استاتیکی متناظر آن شده است؛ حال آنکه در تنش مؤثر قائم 60 kPa یا اعماق بیشتر یک دیوار حائل اعمال بارگذاری تناوبی تأثیر چشم گیری بر مقاومت نهایی بیرون کششی پستانوبی نسبت به مقاومت بیرون کششی استاتیکی نداشته است. در تنش مؤثر قائم 60 kPa مقاومت پستانوبی



شکل ۱۹. مقایسه بین آزمایش بیرون کششی جابه جایی با سرعت ثابت (CRD) و چندمرحله ای تناوبی (MS) تحت اثر تنش مؤثر قائم 60 kPa و بسامد 0.1 Hz .

حال آنکه در دامنه ای بار $A/P_{rm} = 0.3$ مقاومت بیرون کششی پستانوبی نهایی ژئوگرید تغییر محسوسی نسبت به مقاومت متناظر حاصل از آزمایش بیرون کششی جابه جایی با سرعت ثابت نداشته است. شکل ۱۸ نشان می دهد که در تنش مؤثر قائم 40 kPa ، افزایش دامنه ای بار کششی تناوبی در مرحله دوم موجب افزایش جابه جایی های تجمعی در نمونه ژئوگرید شده است. سختی کششی بارگذاری - باربرداری در انتهای مرحله دوم نسبت به مقدار آن در ابتدای این مرحله از آزمایش افزایش داشته است که بیانگر این موضوع است که در مرحله دوم اعمال بار تناوبی کششی موجب افزایش تراکم خاک ماسه اطراف ژئوگرید و افزایش شیب نمودار می شود. شکل ۱۹ مقایسه ای بین مقاومت بیرون کششی پستانوبی ژئوگرید مدفون در خاک ماسه ای و مقاومت بیرون کششی استاتیکی در تنش مؤثر قائم 60 kPa را نشان می دهد. آنچه که از شکل واضح است، پس از اتمام مرحله

بودن ضریب اصطکاک ظاهری بیشینه‌ی خاک نسبت به $(\tan\phi)$ در همه‌ی تنش‌های مؤثر قائم وارده بود؛

- نمودار تغییرات جابه‌جایی در طول نمونه در مقاومت بیرون‌کشش بررسی شد و مقادیر جابه‌جایی‌های ثبت شده به وسیله‌ی جابه‌جایی‌سنج‌ها (LVDT) در طول نمونه توزیع غیرخطی تنش برشی در طول نمونه‌ی ژئوگرید را نشان می‌دهند. همچنین به دلیل قابلیت کشش ژئوگرید و شکل‌گیری سازوکار خرابی پیش‌رونده در طول نمونه‌ی ژئوگرید از شیب نمودار جابه‌جایی نقاط در طول نمونه با افزایش فاصله از نقطه‌ی اعمال جابه‌جایی کاسته می‌شود؛
- نتایج آزمایش‌های بیرون‌کشش چندمرحله‌ی نشان داد که تأثیر بسامد و تعداد چرخه‌ی بارکششی بر مقاومت پساتناوبی ژئوگرید، برای مقادیر در نظر گرفته شده در این مطالعه ناچیز به نظر می‌رسد؛
- مقایسه نتایج آزمایش‌های بیرون‌کشش چندمرحله‌ی انجام شده با نتایج آزمایش‌های بیرون‌کشش جابه‌جایی با سرعت ثابت در تنش‌های مؤثر قائم 20 kPa و 40 kPa نشان داد که اعمال بارگذاری تناوبی موجب کاهش مقاومت بیرون‌کشش پساتناوبی در مقایسه با مقاومت بیرون‌کشش متناظر حاصل از آزمایش بیرون‌کشش جابه‌جایی با سرعت ثابت در شرایط یکسان می‌شود. با افزایش تنش مؤثر قائم به 60 kPa کاهش مقاومت بیرون‌کشش پساتناوبی نسبت به مقاومت متناظر آزمایش بیرون‌کشش جابه‌جایی با سرعت ثابت کم‌رنگ‌تر شد. اعمال بارگذاری تناوبی در مرحله‌ی دوم در تنش مؤثر قائم 60 kPa ذرات ماسه را در شرایط کسب مقاومت مجدد قرار می‌دهد؛
- جابه‌جایی‌های تجمعی شکل گرفته در مرحله‌ی دوم آزمایش چندمرحله‌ی تناوبی با افزایش تنش مؤثر قائم و افزایش دامنه‌ی بار تناوبی بیشتر شده است. همچنین در انتهای مرحله‌ی دوم آزمایش بیرون‌کشش تناوبی سختی کششی نمونه‌ی ژئوگرید افزایش یافت و سپس با شروع مرحله‌ی سوم با افزایش تدریجی جابه‌جایی کاهش یافت و به مقدار متناظر در آزمایش بیرون‌کششی جابه‌جایی با سرعت ثابت رسید.

تقدیر و تشکر

در پایان از شرکت ژئوشبکه پارسیان به دلیل تولید و در اختیار گذاشتن ژئوگرید مورد استفاده در آزمایش‌های این تحقیق، تشکر و قدردانی می‌شود.

پانویس‌ها

1. inclined plane test
2. in-soil tensile test
3. passive resistance
4. post-cyclic
5. plexiglas
6. closed loop
7. linear variable differential transformer
9. constant rate displacement (CRD)
10. multi-stage test
11. frontal displacement
12. high-density polyethylene
13. displacement stability analysis

بلافاصله پس از اعمال بارگذاری تناوبی افزایش و سپس با افزایش جابه‌جایی کاهش می‌یابد. اما در بحث تحلیل پایداری جابه‌جایی^{۱۳} با توجه به این‌که نیروی بیرون‌کشش متناظر با یک جابه‌جایی مشخص مدنظر طراحی قرار می‌گیرد و از آن‌جا که اعمال بار تناوبی کششی موجب افزایش جابه‌جایی دیوار می‌شود، این موضوع باید در طراحی دیوار مربوطه با توجه به نمودار مقاومت ژئوگرید در برابر جابه‌جایی آن قرار گیرد.

۷. نتیجه‌گیری

در این مطالعه با انجام تعدادی آزمایش بیرون‌کشش جابه‌جایی با سرعت ثابت و چند مرحله‌ی تناوبی و با استفاده از یک دستگاه آزمایش بیرون‌کشش بزرگ مقیاس، به بررسی رفتار بیرون‌کششی استاتیکی، تناوبی و پساتناوبی یک نوع ژئوگرید تک‌سویه با نام تجاری $80/30 \text{ GPGRID}$ مدفون در خاک ماسه‌ی یک‌نواخت پرداخته شد. در آزمایش بیرون‌کشش جابه‌جایی با سرعت ثابت از میان عوامل مؤثر، اثر تنش مؤثر قائم بر مقاومت بیرون‌کشش، ضریب اصطکاک ظاهری بیشینه‌ی سطح تماس ژئوگرید و خاک و تغییر شکل‌ها در طول نمونه‌ی ژئوگرید و در آزمایش بیرون‌کشش چندمرحله‌ی اثر تنش مؤثر قائم، دامنه‌ی بارکششی، بسامد و تعداد چرخه‌ی بار تناوبی بر مقاومت بیرون‌کشش پساتناوبی بررسی و نتایج زیر حاصل شد:

- با افزایش تنش مؤثر قائم مقاومت نهایی در برابر بیرون‌کشش ژئوگرید افزایش می‌یابد. هر چند که این افزایش در جابه‌جایی‌های کوچک دیده نشد، اما تفاوت در مقاومت نهایی و به‌ازای جابه‌جایی‌های بزرگ مشهود است. همچنین افزایش تنش مؤثر قائم باعث تغییر حالت گسیختگی از حالت لغزشی به حالت ازدیاد طول می‌شود؛
- تغییرات ضریب اصطکاک ظاهری بیشینه سطح تماس با تنش مؤثر قائم ارزیابی شد و مشاهده گردید که با افزایش تنش سربار ضریب اصطکاک ظاهری بیشینه‌ی سطح تماس ژئوگرید و خاک کاهش می‌یابد. همچنین بین ضریب اصطکاک ظاهری بیشینه‌ی سطح تماس خاک و ژئوگرید و ضریب اصطکاک بیشینه‌ی سطح تماس خاک $(\tan\phi)$ مقایسه صورت گرفت که نتایج حاکی از کمتر

منابع (References)

1. Moraci, N. and Montanelli, F. "Analise di prove di sfilamento di geogriglie estruse installate in terreno granulare compattato", *Rivista Italiana di Deotecnica*, **4**, pp. 5-21 (2000).
2. Moraci, N. and Giofrè, D. "A simple method to evaluate the pullout resistance of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil", *Geotextiles and Geomembranes*, **24**(2) pp. 116-128 (2006).
3. Cazzuffi, D., Moraci, N., Calvarano, L.S. and et al. "The influence of vertical effective stress and of geogrid length on interface behaviour under pullout conditions",

- Geosynthetics*, **32**(2), pp. 40-50 (2014).
4. Moraci, N., Cardile, G., Giofrè, D. and et al. "Soil geosynthetic interaction: design parameters from experimental and theoretical analysis", *Transportation Infrastructure Geotechnology*, **1**(2), pp. 165-227 (2014).
 5. Chang, J.C., Hannon, J.B. and Forsyth, R.A. "Pull resistance and interaction of earthwork reinforcement and soil", **640** (1977).
 6. Raju, D., Lo, S.-C., Fannin, R. and et al. "Design and interpretation of large scale laboratory pullout tests", *7th Australia New Zealand Conference on Geomechanics: Geomechanics in a Changing World: Conference Proceedings*, Institution of Engineers, Australia, pp. 151 (1996).
 7. Raju, D. and Fannin, R. "Load-strain-displacement response of geosynthetics in monotonic and cyclic pull-out", *Canadian Geotechnical Journal*, **35**(2), pp. 183-193 (1998).
 8. Sugimoto, M., Alagiyawanna, A. and Kadoguchi, K. "Influence of rigid and flexible face on geogrid pullout tests", *Geotextiles and Geomembranes*, **19**(5), pp. 257-277 (2001).
 9. Moraci, N. and Recalcati, P. "Factors affecting the pull-out behaviour of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil", *Geotextiles and Geomembranes*, **24**(4), pp. 220-242 (2006).
 10. Nayeri, A. and Fakharian, K. "Study on pullout behavior of uniaxial HDPE geogrids under monotonic and cyclic loads", *International Journal of Civil Engineering*, **7**(4), pp. 211-223 (2009).
 11. Vieira, C.S., Lopes, M.D.L. and Caldeira, L. "Sand-geotextile interface characterisation through monotonic and cyclic direct shear tests", *Geosynthetics International*, **20**(1), pp. 26-38 (2013).
 12. Bathurst, R. and Ezzein, F. "Geogrid pullout load-strain behaviour and modelling using a transparent granular soil", *Geosynthetics International*, **23**(4), pp. 271-286 (2016).
 13. Palmeira, E.M. "Soil-geosynthetic interaction: modelling and analysis", *Geotextiles and Geomembranes*, **27**(5), pp. 368-390 (2009).
 14. Jewell, R., Milligan, G. and Dubois, D. "Interaction between soil and geogrids, in: polymer grid reinforcement", *Thomas Telford Publishing*, pp. 18-30 (1984).
 15. Ferreira, N., Vieira, C., Lopes, M. and et al. "Experimental investigation on the pullout behaviour of geosynthetics embedded in a granite residual soil", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **20**(9), pp. 1147-1180 (2016).
 16. Lopes, M.-L., Ferreira, F., Carneiro, J.R. and et al. "Soil-geosynthetic inclined plane shear behavior: influence of soil moisture content and geosynthetic type", *International Journal of Geotechnical Engineering*, **8**(3), pp. 335-342 (2014).
 17. Zhou, J., Chen, J.-F., Xue, J.-F. and et al. "Micro-mechanism of the interaction between sand and geogrid transverse ribs", *Geosynthetics International*, **19**(6), pp. 426-437 (2012).
 18. Ezzein, F.M. and Bathurst, R.J. "A new approach to evaluate soil-geosynthetic interaction using a novel pull-out test apparatus and transparent granular soil", *Geotextiles and Geomembranes*, **42**(3), pp. 246-255 (2014).
 19. 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**(6), pp. 475-487 (2009).
 20. Raju, D. and Fannin, R. "Monotonic and cyclic pull-out resistance of geogrids", *Geotechnique*, **47**(2), pp. 331-337 (1997).
 21. Min, Y., Leshchinsky, D., Ling, H.I. and et al. "Effects of sustained and repeated tensile loads on geogrid embedded in sand", *Geotechnical Testing Journal*, **18**(2), pp. 204-225 (1995).
 22. Meyer, N., Nernheim, A. and Köhler, U. "Geosynthetic-soil interaction under cyclic loading", *3rd European Geosynthetics Conference*, Munich, Germany, pp. 635-639 (2004).
 23. Nernheim, A. and Meyer, N. "Cyclic pull-out test on geogrids", *International Conference on Geotechnical Engineering*, October, pp. 3-6 (2004).
 24. Koshy, N. and Unnikrishnan, N. "Geosynthetics under cyclic pullout and post-cyclic monotonic loading", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, **2**(2), 13 (2016).
 25. 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).
 26. ASTM D6913 / D6913M-17. "Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis", ASTM International, West Conshohocken, PA (2017).
 27. ASTM D698-12e2. "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))", ASTM International, West Conshohocken, PA (2012).
 28. ASTM D3080 / D3080M-11. "Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions", ASTM International, West Conshohocken, PA (2011).
 29. Suksiripattanapong C., Horpibulsuk, S. Chinkulkijniwat, A. and et al. "Pullout resistance of bearing reinforcement embedded in coarse-grained soils", *Geotextiles and Geomembranes*, **36**, pp. 44-54 (2013).
 30. ASTM D6706-01, "Standard test method for measuring geosynthetic pullout resistance in soil (2013).