

مقایسه مقاومت بیرون کششی استاتیکی و پساتناوبی ژئوگرید در خاک ماسه لای دار

داود خزایی^۱، علیرضا اردکانی^{۲*}، محمود حسنلوراد^۳

- ۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)
۲- دانشیار گروه مهندسی عمران-مکانیک خاک و پی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)
۳- دانشیار گروه مهندسی عمران-مکانیک خاک و پی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

*a.ardakani@eng.ikiu.ac.ir

تاریخ دریافت [۱۳۹۸/۱۰/۱۳]..... تاریخ پذیرش [۱۳۹۹/۱۰/۲۳]

چکیده

در این پژوهش با انجام آزمایش های بیرون کششی استاتیکی، تناوبی و پساتناوبی، رفتار بیرون کششی استاتیکی و پساتناوبی یک نوع ژئوگرید تک سویه تولید داخل ایران تحت نام تجاری GPGRID80/30، در خاک ماسه ای و ماسه لای دار بررسی شده است. آزمایش ها به صورت بزرگ مقیاس با ابعاد $90 \times 50 \times 50$ سانتیمتر و به صورت جابه جایی کنترل با سرعت ثابت و چند مرحله ای تناوبی روی سه نوع خاک مختلف شامل ماسه یکنواخت و ماسه لای دار، حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد ریزدانه لای و در سه تنش موثر قائم ۲۰، ۴۰ و ۶۰ kPa انجام شده است. نتایج حاکی از افزایش مقاومت بیرون کششی استاتیکی ژئوگرید با افزایش تنش موثر قائم در هر سه نوع خاک مختلف است. همچنین افزایش ریزدانه لای در خاک ماسه، منجر به افزایش مقاومت بیرون کششی استاتیکی بیشینه ژئوگرید در تنش موثر ۲۰ kPa شد، حال آنکه در تنش های بیشتر، افزایش درصد لای تاثیر چندانی بر مقاومت بیرون کششی استاتیکی بیشینه نهایی ژئوگرید نداشته است. با مقایسه مقاومت پساتناوبی و استاتیکی، مشاهده شد که در تنش موثر ۲۰ kPa مقاومت پساتناوبی ژئوگرید در هر سه نوع خاک، نسبت به مقاومت استاتیکی متناظر آن کاهش داشته است، لیکن در تنش های ۴۰ و ۶۰ kPa اعمال بارگذاری چرخه ای تاثیر معناداری بر مقاومت بیرون کششی پساتناوبی ژئوگرید در هر سه نوع خاک نداشته است.

واژگان کلیدی: آزمایش بیرون کششی ژئوگرید، ماسه لای دار، میزان لای، آزمایش چند مرحله ای تناوبی

۱- مقدمه

هندسه سیستم خاکی مسلح شده و فرایند ساخت آن ممکن است بر ویژگی های اندرکنش بین خاک و ژئوستتیک اثر بگذارد، اما این ویژگی ها به شدت تحت تاثیر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک و ویژگی های هندسی و مکانیکی مسلح کننده

اندرکنش بین خاک و ژئوستتیک ها اهمیت بسیار زیادی در کارهای مهندسی به ویژه طراحی و تحلیل پایداری سازه های خاکی مسلح شده با ژئوستتیک دارد. هر چند عواملی مانند

است. در گذشته روش‌های آزمایشگاهی متعددی برای درک صحیح اندرکنش بین خاک و ژئوگرید، شامل آزمایش بیرون‌کشی، آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس و آزمایش صفحه مورب^۱ انجام شده است [1-7].

در این میان آزمایش بیرون‌کشی و برش مستقیم از پرکاربردترین آزمایش‌ها هستند. آزمایش بیرون‌کشی یک روش مناسب برای بررسی اندرکنش بین خاک و ژئوسنتتیک در ناحیه مهاربندی شده است. مقاومت بیرون‌کشی ژئوسنتتیک که یک پارامتر طراحی مهم در ارتباط با پایداری داخلی سازه‌های خاکی مسلح شده با ژئوسنتتیک محسوب می‌شود توسط آزمایش بیرون‌کشی تعیین می‌شود که امکان اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها را در طول نمونه در زمان انجام آزمایش بیرون‌کشی فراهم می‌نماید. مقاومت بیرون‌کشی مسلح کننده به نیروی کششی مورد نیاز برای ایجاد لغزش رو به بیرون مسلح کننده از درون توده خاک اطلاق می‌شود. مقاومت بیرون‌کشی مسلح کننده از مجموع مقاومت‌های اصطکاکی روی سطح اعضای طولی و عرضی ژئوگرید و مقاومت مقاوم که در جلوی اعضای عرضی بسیج، تشکیل می‌شود [8]. در دهه‌های گذشته پژوهشگران مختلفی روی اندرکنش خاک و ژئوگرید تحت شرایط مختلف بارگذاری به وسیله مطالعه‌های آزمایشگاهی پرداختند [9-15].

بررسی اثر صلبیت و انعطاف پذیری جداره جعبه، اثر تنش قائم، ارتفاع خاک، هندسه مسلح کننده، دانه‌بندی خاک، عرض غلاف و نوع گیره مسلح کننده و اثر باربری نوارهای طولی و عرضی بر مقاومت بیرون‌کشی ژئوگریدها، از جمله مطالعات مهم در قالب آزمایش‌های استاتیکی بوده اند [11,14,16-18].

هر چند که خاک دانه‌ای بدون ریزدانه در طراحی سازه‌های خاکی مسلح شده با ژئوسنتتیک توصیه می‌شود، اما بسیاری از سازه‌های خاکی مسلح شده توسط ژئوسنتتیک، با استفاده از خاکی در محل که حاوی درصدی ریزدانه است احداث می‌شوند. بنابراین پژوهش درباره اثر وجود ریزدانه بر پایداری و عملکرد چنین سازه‌های خاکی در شرایط مختلف بارگذاری حائز اهمیت است [19].

لایه‌های تسلیح در زمان بهره‌برداری ممکن است که تحت اثر بارهای تناوبی ناشی از عبور ترافیک و قطار، ارتعاش ماشین‌آلات صنعتی، ضربه ناشی از پهلوگیری شناورها، اثر موج بر شیروانی‌های حفاظت شده و یا لرزش‌های ناشی از زلزله قرار می‌گیرند.

راجو و فنین (۱۹۹۷) آزمایش‌های تناوبی و استاتیکی روی سه نوع ژئوگرید تک سویه مختلف قرار گرفته در ماسه سیلیکاتی یکنواخت، انجام دادند. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌داد که مقاومت بیرون‌کشی در حالت بارگذاری کششی متناوب با نوع و ابعاد ژئوسنتتیک استفاده شده در آزمایش‌ها تغییر می‌کند. به ویژه اینکه روند مشخصی نیز مشاهده نشده است. در واقع در برخی حالت‌ها مقاومت بیرون‌کشی متناوب بیشتر از مقاومت بیرون‌کشی استاتیکی بوده، در حالی که در برخی موارد مقاومت بیرون‌کشی متناوب کمتر از مقاومت بیرون‌کشی استاتیکی مشاهده شده است. در غیاب داده‌های آزمایشگاهی بیشتر پژوهشگران ضریب اندرکنش بین خاک و ژئوگرید را در شرایط دینامیکی معادل ۸۰٪ حالت استاتیکی پیشنهاد کردند [20].

موراکی و کاردیل در سال‌های (۲۰۰۸) و (۲۰۰۹) انجام آزمایش بیرون‌کشی چند مرحله‌ای برای تخمین رفتار بیرون‌کشی تحت اثر بار تناوبی و پساتنوبی در سه مرحله بارگذاری پیشنهاد کردند. مقایسه بین منحنی‌های بیرون‌کشی در حالت استاتیکی و چند مرحله‌ای حاکی از آن است که بارهای تناوبی بیرون‌کشی موجب تغییر مقاومت پساتنوبی می‌شوند [21-22].

رزازان و همکاران (۲۰۱۸) یک‌سری آزمایش استاتیکی و چندمرحله‌ای تناوبی روی نوارهای پلیمری انجام دادند. نتایج نشان داد که تغییر فرکانس بارگذاری از ۰/۱ Hz به ۰/۵ Hz بر مقاومت بیرون‌کشی تأثیری ندارد. همچنین تأثیر افزایش تعداد سیکل بار از ۳۰ به ۲۵۰ روی مقاومت بیرون‌کشی بیشینه ناچیز بود [23].

مطابق پژوهش‌های گذشته، یکی از مولفه‌های موثر بر نتایج، نوع ژئوگرید استفاده شده است و بیشتر مطالعات قبلی به بررسی رفتار بیرون‌کشی ژئوگرید مدفون در خاک ماسه‌ای تمیز پرداختند. از این رو در این مطالعه رفتار بیرون‌کشی یک نوع

شکل (۱) منحنی توزیع دانه‌بندی ماسه (طبق استاندارد ASTM D6913) و منحنی دانه‌بندی لای از آزمایش هیدرومتری (طبق استاندارد ASTM D422-63) را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی ماسه مورد آزمایش

Parameters	values
D ₅₀ (mm)	0.77
C _U	2.14
C _C	0.89
G _s	2.65
γ _{dmax} (ton/m ³)	1.62
γ _{dmin} (ton/m ³)	1.37
ω _{opt} (%)	5.5
φ _p (degree)	39.2
c (kPa)	5.57

Table 1. Physical characteristics of sand

همچنین جدول (۲) پارامترهای مقاومتی خاک ماسه حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد لای را نشان می‌دهد. در شکل (۲) تغییرات مقاومت برشی بیشینه خاک‌های مختلف در برابر تغییرات تنش عمودی اعمالی نشان داده شده است. ژئوگرید استفاده شده در این پژوهش از نوع تک‌سویه است که توسط یک شرکت داخلی به نام ژئوشبکه پارسبان در بازار عرضه می‌شود. ژئوگرید تحت نام تجاری GPGRID و در مدل ۸۰/۳۰ عرضه می‌شود که در جدول (۳) خصوصیتی که توسط شرکت تولید کننده فراهم شده، ارائه شده است. و همچنین در شکل (۳) نتایج آزمایش کشش روی ژئوگرید را که توسط شرکت سازنده آن تهیه شده نشان می‌دهد. در ژئوگرید GP GRID80/30 اعداد اول و دوم از چپ به ترتیب نشان دهنده مقاومت کششی در جهت طولی و عرضی در واحد کیلونیوتن بر متر را نشان می‌دهد.

جدول ۲. مشخصات مکانیکی ماسه حاوی ۱۰ درصد و ۲۰ درصد لای مورد آزمایش

Parameters	Sand+10% Silt	Sand+20% Silt
γ _{dmax} (Ton/m ³)	1.82	2
ω _{opt} (%)	6.5	7.5
φ _p (degree)	36.13	37.05
C (kPa)	7.37	14.6

Table 2. Physical properties of sand containing 10% and 20% silt

ژئوگرید تک‌سویه تولید داخل، مدفون در خاک ماسه‌ای خالص و حالت‌های حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد ریزدانه لای، بررسی می‌شود، و در نتیجه تاثیر میزان لای و تنش موثر قائم به وسیله آزمایش‌های بیرون‌کششی جابه‌جایی با سرعت ثابت روی مقاومت بیرون‌کششی استاتیکی و پساتناوبی ژئوگرید تجزیه و تحلیل می‌شود.

۲- مصالح

به منظور انجام این پژوهش، از ماسه سیلیسی ۱۳۱ فیروزکوه و لای فیروزکوه، استفاده شده است. ماسه لای‌دار از مخلوط کردن ماسه خالص با لای به منظور رسیدن به درصد ریزدانه ۱۰ و ۲۰ درصد وزن مخصوص خشک ماسه خالص به دست آمده است. برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ماسه خالص، ماسه حاوی ۱۰ درصد لای و ماسه حاوی ۲۰ درصد لای آزمایش‌هایی شامل دانه‌بندی، تراکم اصلاح شده برای تعیین بیشینه دانسیته خشک و رطوبت بهینه طبق استاندارد ASTM D698 و ASTM D1557 انجام گرفت. با توجه به توزیع دانه‌بندی و براساس سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS)، ماسه در رده SP قرار می‌گیرد. لای فیروزکوه به عنوان مصالح ریزدانه در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. لای فیروزکوه از نظر شکل ظاهری به صورت پودر بوده و تیز گوشه است.

شکل ۱. نمودار دانه‌بندی ماسه و لای مورد آزمایش

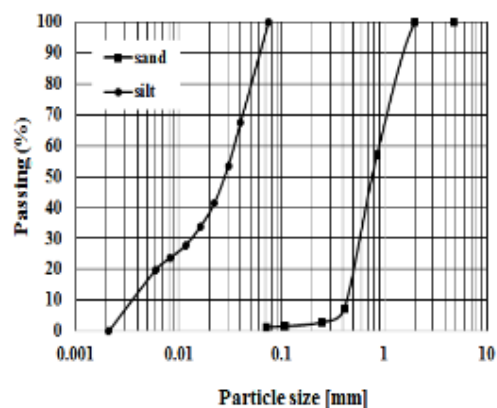


Fig. 1. Grading chart of sand and silt

۳- مراحل نمونه سازی

مراحل آماده سازی نمونه های مسلح شده با انواع مختلف ژئوگرید قبل از انجام آزمایش های بیرون کشش به شرح ذیل است:

الف) خاک ماسه مورد آزمایش با درصد مورد نظر لای خشک عبوری از الک شماره ۴۰# به ازای حجم مورد نیاز جعبه بیرون کشش اندازه گرفته شده و سپس در درصد رطوبت بهینه و در وزن مخصوص خشک برابر با ۹۰ درصد وزن مخصوص خشک حداکثر مخلوط شده است. نیمی از خاک برای پر کردن قسمت تحتانی و نصف دیگر برای پرکردن بخش فوقانی جعبه بیرون کشش استفاده شده است.

ب) خاک ماسه ای دارای درصد رطوبت بهینه در پنج لایه ۴/۵ سانتی متری و تا رسیدن به ارتفاع ۲۲/۵ سانتی متر در قسمت تحتانی جعبه دستگاه بیرون کشش ریخته و هر لایه تا رسیدن به وزن مخصوص خشک مورد نظر تراکم شده است. به منظور به دست آوردن اطمینان از رسیدن به تراکم مورد نیاز 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 درجه تراکم مورد نظر هنگام آزمایش - های مقدماتی و به صورت سعی و خطا تعیین شده است.

پ) پس از رسیدن ارتفاع خاک به تراز میانی محفظه بیرون کشش در مرحله بعد نمونه ژئوگرید متصل به گیره با نسبت طول به عرض حداقل برابر ۲، به طول ۷۲ سانتی متر و عرض ۳۳ سانتی متر روی خاک به صورت کاملاً افقی قرار داده شده، به شکلی که فاصله انتها و کناره های نمونه ژئوگرید تا بدنه محفظه دستگاه بیرون کشش حدود ۷/۵ سانتی متر به دست آید. سپس قسمت جلویی نمونه پس از عبور از میان غلاف دستگاه به گیره متصل شده است. جابه جایی نسبی قطعات عرضی نمونه ژئوگرید به وسیله سه عدد سیم غیرقابل کشش متصل شده به آن ها اندازه گیری می شود. این سیم ها با عبور از حفاظ فلزی انتهایی دستگاه به سیستم LVDT متصل شده اند.

ت) نیمه فوقانی محفظه بیرون کشش نیز مانند نیمه تحتانی از خاک ماسه لای دار با درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک مدنظر در پنج لایه حدود ۴/۵ سانتی متری و تا رسیدن به ارتفاع ۴۵ سانتی متری پر شده و تراکم شده است. سپس کیسه

با انجام یک سری آزمایش برش مستقیم مطابق با استاندارد ASTM D3080 در تنش های موثر قائم مشابه با آزمایش های بیرون کشش مقاومت برشی خاک ماسه، ماسه حاوی ۱۰٪ و ۲۰٪ لای در تراکم ۹۰٪ بیشینه وزن مخصوص خشک و در درصد رطوبت بهینه تعیین شد که نتایج در شکل (۲) نشان داده شده است.

شکل ۲. پوش گسیختگی تنش برشی حداکثر خاک های مختلف

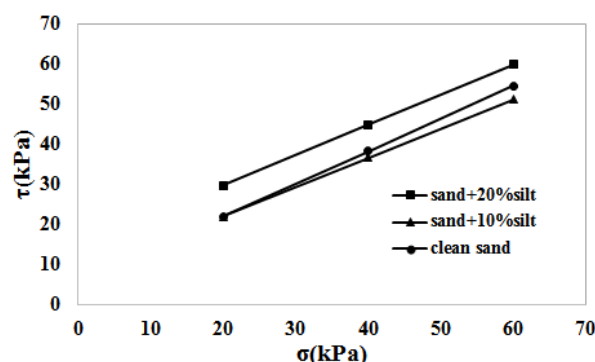


Fig. 2. Maximum shear stress envelope for different soils

جدول ۳. ویژگی های ژئوگرید مدل GP GRID 80/30

Parameters	values
PET	Raw material
PVC	Coating
80 (kN/m)	Ultimate longitudinal tensile strength
30 (kN/m)	Ultimate transverse tensile strength
12 (%)	Longitudinal strain at ultimate tensile strength
33 (mm)	Longitudinal mesh dimension
25 (mm)	Transverse mesh dimension
2 (mm)	Thickness

Table 3. Characteristics of geogrid GP GRID80/30

شکل ۳. نتیجه آزمایش کشش روی ژئوگرید

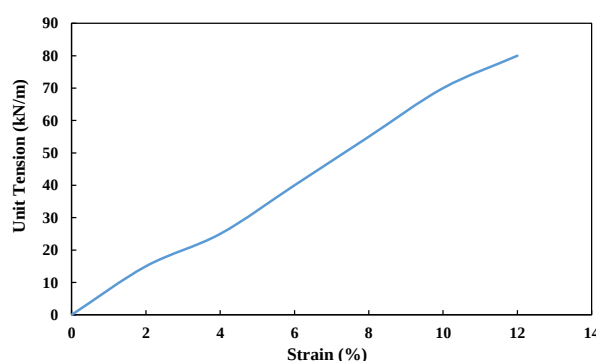


Fig. 3. Result of tension test on geogrid

به صورتی که فشار هوا از طریق کمپرسور هوای مرکزی وارد دستگاه شده و پس از تنظیم فشار مدنظر از طریق لوله مرتبط به کیسه منتقل می‌شود. بعد از قرارگیری کیسه هوا و بسته شدن در دستگاه این اعمال فشار صورت گرفته (که می‌توان بیان کرد کیسه فشرده مابین در بسته شده و سطح فوقانی خاک قرار گرفته و مطابق بخش ۹ شکل (۵) توزیع فشار یکسانی را در تمام سطح خاک اعمال می‌کند. از یک جک الکتریکی برای اعمال بار بیرون‌کشش افقی به نمونه استفاده شد. شکل (۴) تصویر ژئوگرید را در تراز میانی دستگاه نشان می‌دهد که سه عدد سیم غیرقابل انعطاف در فواصل مساوی به آن متصل است. تصویر شماتیک دستگاه بیرون‌کشش موجود در شکل (۵) نشان داده شده است.

۴- روند انجام آزمایش‌های بیرون‌کشش جابه جایی با سرعت ثابت و چند مرحله ای تناوبی

برای مطالعه رفتار ژئوگرید در شرایط جابه‌جایی با سرعت ثابت ^۳(CRD) و بیرون‌کششی تناوبی ^۴(MST) از دو فرآیند مجزا استفاده شده است. آزمایش‌های جابه‌جایی با سرعت ثابت (CRD) در شرایط مشابه آزمایش با آزمایش‌های چند مرحله‌ای (برای نمونه طول نمونه و تنش عمودی اعمالی) انجام شده‌اند.

در آزمایش‌های استاتیکی ^۴(MPT) نیروی بیرون‌کشش به شکل کنترل جابه‌جایی و با سرعت ۱ mm/min به نمونه اعمال شده است. آزمایش زمانی پایان می‌یابد که یا گسیختگی بیرون کششی رخ دهد یا نمونه ژئوگرید آسیب ببیند و یا جابه‌جایی جلویی نمونه به مقدار ۷۵mm برسد. رفتار بیرون‌کششی تناوبی و پساتناوبی با استفاده از آزمایش بیرون‌کششی چندمرحله‌ای مورد بررسی واقع شده است. آزمایش‌های چند مرحله‌ای در مراحل مختلف روی نمونه ژئوگرید صورت می‌پذیرد. در مرحله اول آزمایش، آزمایش بیرون‌کشش تحت شرایط کنترل جابه‌جایی با سرعت ثابت ۱mm/min انجام شده و هنگامی که نیروی بیرون‌کششی به مقدار مشخصی (که این

هوای انعطاف پذیر برای اعمال تنش‌های عمودی روی نمونه خاک قرار داده می‌شود. مطابق شکل (۴) اعمال سربار قائم باید به صورت گسترده باشد به طوری که بتوان یک سربار گسترده یکنواخت را در تمام سطح فوقانی لایه‌ی دوم اعمال نمود. بدین منظور دو نوع سازوکار برای اعمال سربار گسترده وجود دارد: الف) سربار گسترده اعمالی صلب توسط وزنه‌ها یا جک ب) سربار گسترده اعمالی انعطاف پذیر توسط کیسه هوا. در این پژوهش از یک کیسه مقاوم برای اعمال بارگذاری انعطاف‌پذیر استفاده شده است.

شکل ۴. چگونگی قرارگیری نمونه ژئوگرید در تراز میانی دستگاه

بیرون کشش



Fig. 4. Position of embedment geogrid in middle level of pullout box

شکل ۵. تصویر شماتیک دستگاه بیرون‌کشش

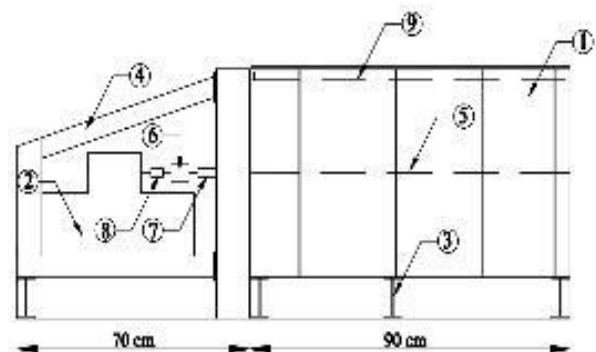


Fig. 5. Schematic detail of pullout apparatus

- (۱) جعبه دستگاه (۲) محرک الکتریکی (۳) تکیه گاه زیرین (۴) تکیه گاه بالایی (۵) ژئوگرید (۶) سلول بار (۷) گیره (۸) LVDT (۹) کیسه هوا (به روش بارگذاری انعطاف پذیر)

Parameters	Values and used materials
Soil type	Clean sand, clean sand+10% silt, clean sand+20% silt
Vertical effective stress(kPa)	20,40,60
Cyclic load frequency(Hz)	0.1
Number of tensile load cycle	30
A/P _{vm} (%)	40
P _i /P _{vm} (%)	35
Pullout loading rate(mm/min)	1

Table 4. Program of multistage pullout tests

۵- نتایج و بحث

شکل (۶) تغییرات نیروی بیرون کشش در برابر جابه جایی جلویی نمونه ژئوگرید مدفون در خاک ماسه ای (اندازه گیری شده در لبه چسبیده به گیره) را در سه تنش موثر قائم مختلف ۲۰، ۴۰ و ۶۰ kPa نشان می دهد. مطابق شکل، با توجه به قسمت ابتدایی نمودارها مشاهده می شود که تا جابه جایی تقریبی ۷ میلی متری، افزایش نیروی بیرون کشش در برابر جابه جایی دارای شیب بسیار تندتری است که نشان دهنده بسیج سریع تر نیروی بیرون کشش در این محدوده از جابه جایی است. همچنین تا این میزان از جابه جایی، هر سه نمودار مقدار نیروی بیرون کشش یکسانی را نشان می دهند که بیانگر عدم تاثیرگذاری تنش های موثر قائم در جابه جایی های کوچک بر مقدار مقاومت بیرون کشش ژئوگرید است.

شکل ۶. بررسی اثر تنش سربار قائم بر رفتار بیرون کششی در خاک ماسه ای تمیز

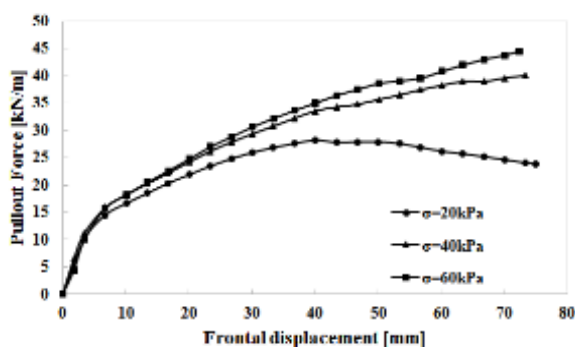


Fig. 6. Effect of vertical effective stress on pullout behavior in clean sand

همانطور که در شکل (۶) مشاهده می شود الگوی رفتاری نمودارهای بیرون کشش با تغییر تنش موثر قائم تغییر می کند. در

مقدار معادل با جابه جایی متناظر با مقدار نیروی ۰/۳۵ بیشینه نیروی بیرون کشش در حالت آزمایش استاتیکی با سرعت ثابت است) رسید، یک نیروی بیرون کششی تناوبی سینوسی با فرکانس ۰/۱ Hz و با دامنه ی بار ۰/۴ حداکثر نیروی بیرون کشش در آزمایش با سرعت ثابت در تنش سربار متناظر، در حالت کنترل بار و به تعداد ۳۰ سیکل بر نمونه اعمال شد [9]. مشخصات آزمایش های بارگذاری چند مرحله ای در جدول (۴) ارائه شده است.

نیروی P_i و دامنه بار درصدی از مقاومت نهایی بیرون کششی نمونه در حالت جابه جایی با سرعت ثابت هستند. پس از این مرحله آزمایش دوباره تحت شرایط جابه جایی با سرعت ثابت و مشابه مرحله اول ادامه می یابد تا اینکه جابه جایی جلویی نمونه ژئوگرید به ۷۵ mm، گسیختگی بیرون کششی و یا گسیختگی کششی برسد.

مرحله اول و دوم آزمایش چند مرحله ای بیرون کشش به ترتیب شرایطی را شبیه سازی می کند که ژئوگرید درون سازه مسلح شده خاکی تحت اثر نیروی بیرون کششی استاتیکی ناشی از وزن توده خاک قرار گرفته و سپس نیروهای دینامیکی موجب افزایش نیروهای کششی می شوند. در فاز آخر آزمایش، بین نتایج آزمایش با مقادیر آزمایش های استاتیکی مرسوم تحت سرعت ثابت (CRD) مقایسه می شود تا اینکه تغییرات مقاومت بیرون کششی در اثر بارهای کششی تناوبی مورد بررسی قرار گیرد. همه آزمایش ها تا رسیدن به یک جابه جایی بیشینه برابر با ۷۵ mm یا رسیدن به مقاومت کششی نهایی ژئوگرید ادامه می یابد. در این پژوهش به منظور بررسی اثر میزان ریزدانه لای و تنش سربار تعداد ۹ آزمایش چند مرحله ای پیش بینی شده است که مشخصات آن در جدول (۴) نشان داده شده است.

با توجه به اینکه در مطالعات قبلی مقدار نیروی کششی تناوبی اعمالی در مرحله دوم بین ۲۰ تا ۴۰ درصد مقاومت نهایی بیرون کششی ژئوگرید در حالت استاتیکی انتخاب شده است [22-23]، در این مطالعه میزان این نیرو برای بیشترین مقدار بازه مذکور و برابر با ۴۰ درصد نیروی بیشینه ژئوگرید در حالت استاتیکی در نظر گرفته شده است.

جدول ۴. برنامه ریزی آزمایش های بیرون کششی چند مرحله ای

به ماسه خالص در سربار 20 kPa است. همچنین در سربارهای 40 و 60 kPa مقاومت بیرون کشش تغییرات چندانی نداشته است. در سربار 20 kPa با توجه به اینکه رفتار بیرون کششی ژئوگرید به صورت لغزشی است، از این رو مطابق شکل (۷) افزایش مقاومت برشی ماسه حاوی 10 درصد لای نسبت به ماسه خالص موجب افزایش مقاومت بیرون کشش بیشینه ژئوگرید می شود. در تنش های سربار 40 و 60 kPa ، کاهش اندک در مقاومت بیرون کششی می تواند ناشی از تغییر کم مقاومت برشی ماسه حاوی 10 درصد لای نسبت به ماسه خالص باشد.

شکل ۷. بررسی اثر تنش سربار قائم بر رفتار بیرون کششی در خاک ماسه ای حاوی 10 درصد لای

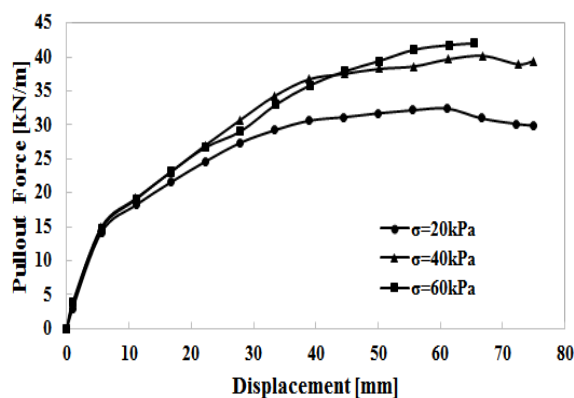


Fig. 7. Effect of vertical effective stress on pullout behavior in 10% silty sand

تغییرات مقاومت بیرون کشش در برابر جابه جایی جلویی نمونه ژئوگرید مدفون در خاک حاوی 20 درصد لای در شکل (۸) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۲)، با افزایش درصد لای از 10 به 20 درصد مقاومت برشی خاک افزایش یافته که این امر می تواند منجر به افزایش مقاومت بیرون کشش ژئوگرید در کلیه سربارها شده باشد. شکل (۹) مقایسه بین نمودار نیروی بیرون کشش در برابر جابه جایی حاصل از آزمایش بیرون کشش چند مرحله ای را با نمودار متناظر آن در آزمایش بیرون کشش استاتیکی در شرایط یکسان تنش موثر قائم و طول نمونه به ازای مقادیر مختلف تنش موثر قائم در خاک ماسه ای تمیز نشان می دهد.

شکل ۸. بررسی اثر تنش سربار قائم بر رفتار بیرون کششی در خاک ماسه ای حاوی 20 درصد لای

تنش موثر قائم کم (20 kPa) با افزایش جابه جایی ژئوگرید رفتار نرم شوندگی کرنشی را از خود نشان می دهد. در حالی که در تنش های موثر قائم 40 و 60 kPa ژئوگرید با افزایش جابه جایی رفتار سخت شوندگی کرنشی از خود نشان می دهد. نمونه ژئوگرید تحت تنش موثر قائم بیشتر قابلیت کشش بیشتری از خود نشان داده و موجب شکل گیری سازوکار اندرکشی پیش رونده و در نتیجه منجر به افزایش مداوم مقاومت بیرون کشش با افزایش جابه جایی می شود. به عبارت دیگر رفتار ژئوگرید در تنش های سربار کم به صورت لغزشی است در حالی که در تنش های سربار زیادتر رفتار ژئوگرید به صورت ازدیاد طول است. رفتار لغزشی می تواند موجب عدم شکل گیری تنش های برشی قابل توجه در طول نمونه در قیاس با رفتار ازدیاد طول شود و در نتیجه از مقاومت بیرون کششی ژئوگرید مدفون در ماسه نیز کاسته می شود. مقاومت بیرون کشش بیشینه ژئوگرید با افزایش تنش موثر قائم افزایش می یابد به طوری که مقدار نیروی بیرون کشش بیشینه ژئوگرید به ازای تنش موثر قائم 20 ، 40 و 60 kPa به ترتیب مقادیر $28/52$ ، $40/24$ و $44/53 \text{ kN/m}$ است. از آنجا که طبق پژوهش های موراکی و جیوفری [24] مقاومت خاک در منافذ ژئوگرید سهم عمده ای در مقاومت کلی بیرون کششی ژئوگرید داشته و بین 75 تا 90 درصد مقاومت بیرون کششی ژئوگرید از مولفه مقاومت مقاوم خاک در جلوی المان های عرضی به دست می آید، از این رو با افزایش سربار وارد شده نیروهای بین دانه ای در ماسه و به تبع آن مقاومت ماسه در منافذ ژئوگرید بیشتر شده و در نتیجه مقاومت بیرون کششی بیشینه ژئوگرید نیز بالاتر می رود.

شکل (۷) تغییرات مقاومت بیرون کشش نمونه ژئوگرید را در برابر جابه جایی جلویی نمونه در خاک ماسه حاوی 10 درصد لای نشان می دهد. مشاهده می شود که در این حالت نیز، در 7 میلی متر ابتدایی نمونه ژئوگرید در هر سه سربار مقاومت یکسانی از خود نشان می دهند. مقاومت بیرون کشش ژئوگرید در خاک ماسه ای حاوی 10 درصد لای نیز با افزایش سربار وارد شده افزایش می یابد به شکلی که مقدار نیروی بیرون کشش بیشینه ژئوگرید به ازای تنش موثر قائم 20 ، 40 و 60 kPa به ترتیب مقادیر $32/41$ ، $40/16$ و $42/01 \text{ kN/m}$ است. نکته قابل توجه افزایش مقاومت بیرون کشش ماسه حاوی 10 درصد لای نسبت

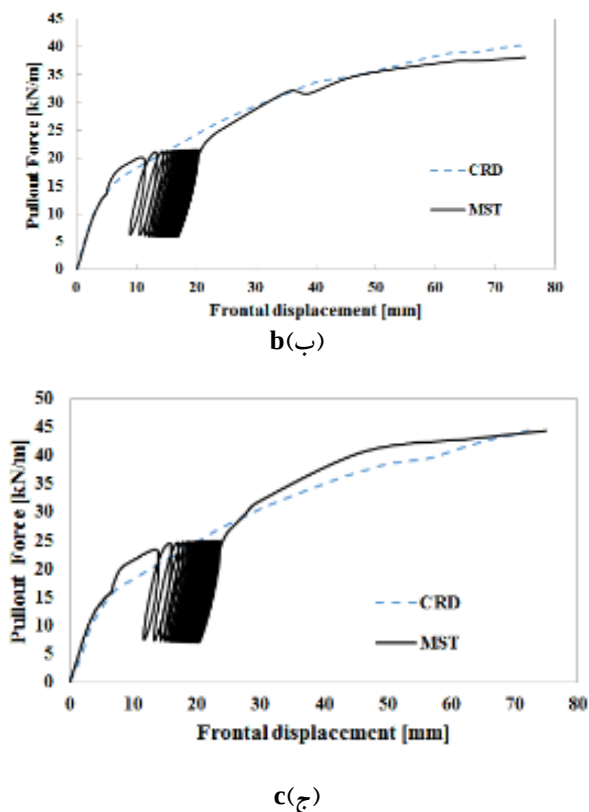


Fig. 9. Comparison between multistage pullout test and monotonic pullout test for geogrid embedded in clean sand at vertical effective stress of a: 20kPa b: 40kPa c: 60kPa

تأثیر بارکششی تنابویی روی مقاومت پساتنوبی ژئوگرید مدفون در خاک ماسه‌ای حاوی ۱۰ درصد لای در مقادیر مختلف تنش موثر قائم در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در هر تنش موثر قائم مورد نظر بین نمودار مقاومت بیرون کشش در برابر جابه جایی جلویی حاصل از آزمایش بیرون کشش چند مرحله‌ای و آزمایش بیرون کشش جابه جایی با سرعت ثابت مقایسه صورت گرفت. مطابق شکل (۱۰-الف) اعمال بار تنابویی کششی در مرحله دوم آزمایش بیرون کشش چند مرحله‌ای در تنش موثر قائم ۲۰ kPa موجب کاهش ۸ درصدی مقاومت بیرون کشش پساتنوبی بیشینه ژئوگرید در مقایسه با مقاومت بیشینه استاتیکی آن شده است. شکل (۱۰-ب) بیانگر عدم تأثیر بارگذاری تنابویی بر رفتار بیرون کششی ژئوگرید مدفون در خاک ماسه حاوی ۱۰ درصد لای در تنش موثر قائم ۴۰ kPa است و مقاومت بیشینه حاصل از هر دو آزمایش بیرون کشش چند مرحله‌ای و استاتیکی تقریباً یکسان است. رفتار بیرون کششی ژئوگرید در آزمایش بیرون کشش چند مرحله‌ای تحت تنش موثر قائم ۶۰ kPa در ماسه

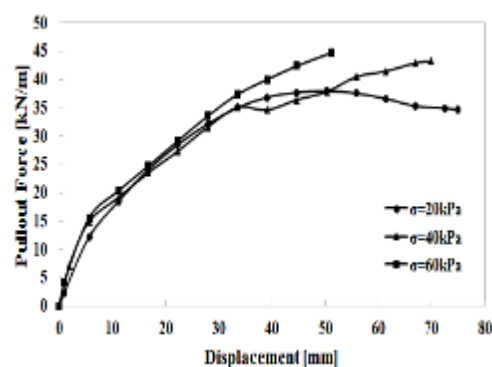
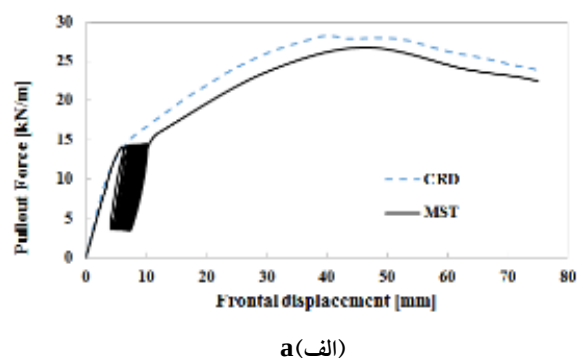


Fig. 8. Effect of vertical effective stress on pullout behavior in 20% silty sand

همانطور که از شکل ۹-الف مشخص است اعمال بار کششی تنابویی موجب کاهش ۶/۵ درصدی مقاومت پساتنوبی ژئوگرید در مقایسه با مقاومت متناظر آن در آزمایش بیرون کشش استاتیکی شده است. در تنش موثر ۴۰ kPa اعمال بارگذاری تنابویی تأثیر چندانی بر مقاومت پساتنوبی ژئوگرید مدفون در خاک ماسه‌ای نداشته و تغییرات مقاومت پساتنوبی ژئوگرید نسبت به مقاومت متناظر آن در آزمایش بیرون کشش استاتیکی ناچیز است. در تنش موثر قائم ۶۰ kPa اعمال بار کششی تنابویی در مرحله دوم آزمایش چند مرحله‌ای در ابتدا موجب افزایش مقاومت بیرون کشش پساتنوبی ژئوگرید شده اما با افزایش جابجایی مقاومت نهایی پساتنوبی ژئوگرید با مقاومت حاصل از آزمایش بیرون کشش استاتیکی نمونه در آزمایش بیرون کشش استاتیکی برابر می‌گردد.

شکل ۹. مقایسه نتایج آزمایش بیرون کشش چند مرحله‌ای و استاتیکی برای ژئوگرید مدفون در خاک ماسه‌ای به ازای تنش موثر قائم الف: ۲۰ kPa ب: ۴۰ kPa ج: ۶۰ kPa



شکل ۱۱. مقایسه نتایج آزمایش بیرون کشش چندمرحله ای و استاتیکی برای ژئوگرید مدفون در خاک ماسه حاوی ۲۰ درصد لای به ازای تنش موثر

قائم الف: ۲۰kPa ب: ۴۰kPa ج: ۶۰kPa

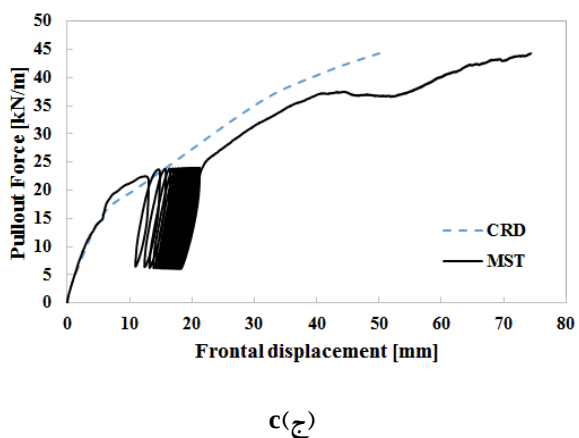
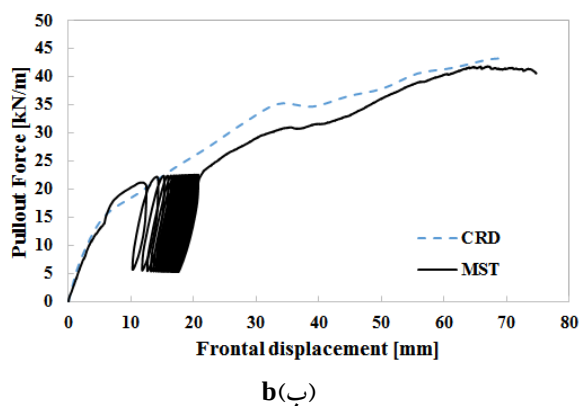
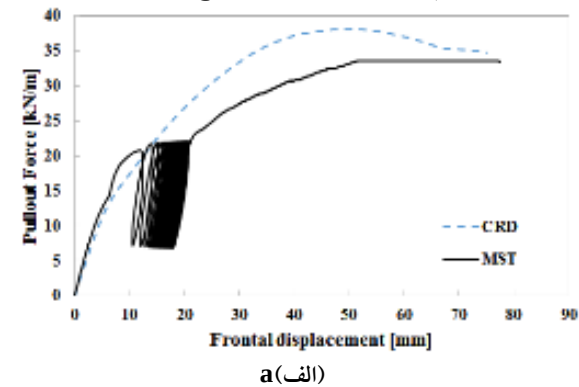


Fig. 11. Comparison between multistage pullout test and monotonic pullout test for geogrid embedded in 20% silty sand at vertical effective stress of a:20kPa b:40kPa c:60kPa

بر اساس شکل (۱۱)، مشخص است در هر سه تنش قائم، مقاومت پستانوبی نسبت به مقاومت متناظر در آزمایش استاتیکی کاهش یافته است. به طوریکه مقاومت بیرون کشش پستانوبی بیشینه، نسبت به مقاومت استاتیکی بیشینه نظیر، در تنش سربار ۲۰kPa، کاهش ۱۴ درصدی رخ داده است. در تنش موثر قائم ۴۰kPa پس از اعمال بارگذاری تناوبی نیروی بیرون

حاوی ۱۰ درصد لای مانند خاک ماسه ای، پس از اعمال بارگذاری تناوبی، ابتدا با افزایش مقاومت نسبت به نمودار متناظر در آزمایش بیرون کشش استاتیکی همراه است و سپس در انتهای آزمایش مقاومت حاصل از هر دو آزمایش مقداری یکسان را نمایش می دهد.

شکل (۱۱) مقایسه بین رفتار بیرون کششی ژئوگرید حاصل از دو آزمایش چندمرحله ای و استاتیکی در سه تنش قائم، در خاک ماسه حاوی ۲۰ درصد لای را نشان می دهد.

شکل ۱۰. مقایسه نتایج آزمایش بیرون کشش چندمرحله ای و استاتیکی برای ژئوگرید مدفون در خاک ماسه حاوی ۱۰ درصد لای به ازای تنش موثر

قائم الف: ۲۰kPa ب: ۴۰kPa ج: ۶۰kPa

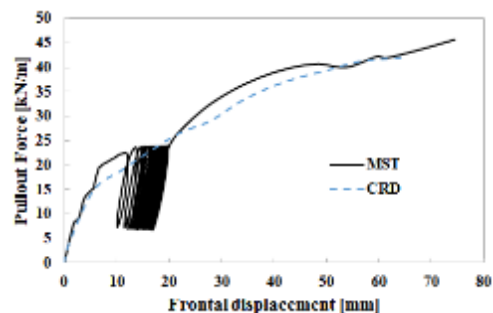
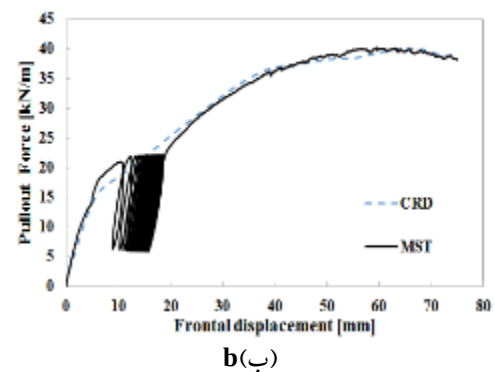
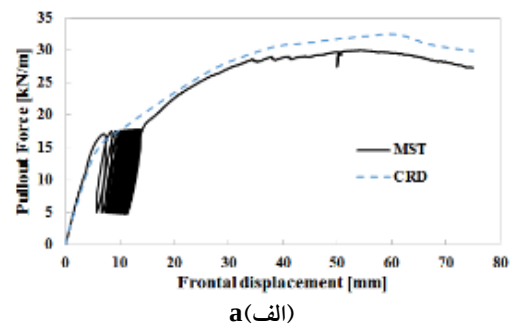


Fig. 10. Comparison between multistage pullout test and monotonic pullout test for geogrid embedded in 10% silty sand at vertical effective stress of a:20kPa b:40kPa c:60kPa

- با افزایش میزان لای از ۱۰ به ۲۰٪، تاثیر بارگذاری تناوبی بر کاهش مقاوت پساتناوبی به ویژه در تنش‌های سربار ۴۰ و ۶۰ kPa بیشتر می‌شود.

References

۷- مراجع

- 1-Lopes M. L., Ferreira F., Carneiro J. R., Vieira C. S. 2014 Soil-geosynthetic inclined plane shear behavior: influence of soil moisture content and geosynthetic type. *Int. J. Geotech. Eng.*, vol. 8, no. 3, pp. 335–342.
- 2-Liu C. N., Ho Y. H., Huang J. W. 2009 Large scale direct shear tests of soil/PET-yarn geogrid interfaces. *Geotext. Geomembranes*, vol. 27, no. 1, pp. 19–30.
- 3-Lopes M. L. & Laderia M. 1996 Influence of the confinement, soil density and displacement rate on soil-geogrid interaction. *Geotext. Geomembranes*, vol. 10, no. 14, pp. 543–554.
- 4-Lopes M. L. & Laderia M. 1996 Role of specimen geometry, soil height, and sleeve length on the pull-out behaviour of geogrids. *Geosynth. Int.*, vol. 3, no. 6, pp. 701–719.
- 5-Nayeri A. & Fakharian K. 2009 Study on pullout behavior of uniaxial HDPE geogrids under monotonic and cyclic loads.
- 6-Raju D. M. & Fannin R. J. 1998 Load-strain-displacement response of geosynthetics in monotonic and cyclic pullout. *Can. Geotech. J.*, vol. 35, no. 2, pp. 183–193.
- 7-Vieira C. S., Lopes M. L., Caldeira M. L. 2013 Sand-geotextile interface characterisation through monotonic and cyclic direct shear tests. *Geosynth. Int.*, vol. 20, no. 1, pp. 26–38.
- 8-Palmeira E. M. 2009 Soil-geosynthetic interaction: Modelling and analysis. *Geotext. Geomembranes*, vol. 27, no. 5, pp. 368–390.
- 9- Cardile G., Pisanio M., Moraci N. 2019 The influence of a cyclic loading history on soil-geogrid interaction under pullout condition. *Geotext. Geomembranes*, vol. 47, no. 4, pp. 552–565, 2019, doi: 10.1016/j.geotextmem.01.012.
- 10- Chandrakaran S., Subaida E. A., Sankar N. 2008 Prediction of Pullout Strength of Woven Coir Geotextiles from Yarn Pullout Resistances.

کشش در ابتدا کاهش یافته ولی با افزایش جابه‌جایی اختلاف بین مقاومت پساتناوبی ژئوگرید و مقاومت استاتیکی کمتر شده و در انتهای آزمایش تقریباً یکسان می‌شود. در تنش موثر ۶۰ kPa مقاومت پساتناوبی ژئوگرید نسبت به مقدار متناظر حاصل از آزمایش استاتیکی کاهش یافته و میزان این کاهش در جابه‌جایی‌های یکسان به ۲۲ درصد نیز می‌رسد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با انجام ۱۸ آزمایش بزرگ مقیاس بیرون‌کششی استاتیکی و چندمرحله‌ای تناوبی مقاومت بیرون‌کشش ژئوگرید تک سویه GPGRID80/30 مدفون در خاک ماسه خالص، ماسه حاوی ۱۰ درصد و ۲۰ درصد لای بررسی شد. از میان عوامل موثر بر مقاومت بیرون‌کشش به بررسی اثر تنش موثر قائم در سه سربار ۲۰، ۴۰ و ۶۰ kPa پرداخته شد و نتایج زیر به دست آمد:

- وجود ریزدانه لای، منجر به تغییر مقاومت بیرون‌کششی استاتیکی شده است. میزان این تغییرات مقاومت بیرون‌کششی، به صورت کلی می‌تواند ناشی از تغییر مقاومت برشی خاک باشد.

- با افزایش تنش موثر قائم، مقاومت بیشینه بیرون‌کشش ژئوگرید در خاک ماسه‌ای تمیز و ماسه حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد لای افزایش یافت.

- رفتار ژئوگرید در هر سه خاک به ازای تنش سربار ۲۰ kPa به صورت نرم‌شوندگی کرنشی است. در این تنش سربار، اعمال بارگذاری تناوبی، منجر به کاهش مقاومت بیرون‌کششی در هر سه نوع خاک شده است. به شکلی که مقاومت بیرون‌کششی پساتناوبی در مقایسه با مقاومت بیرون‌کششی استاتیکی کاهش ۶ الی ۱۴ درصدی داشته است.

- رفتار بیرون‌کششی ژئوگرید در هر سه خاک، به ازای مقادیر تنش سربار ۴۰ kPa و ۶۰ kPa به صورت سخت‌شوندگی است. در این مقادیر تنش سربار، در حالت ماسه تمیز و ماسه حاوی ۱۰٪ لای، بارگذاری سیکلی تاثیر محسوسی بر مقاومت بیرون‌کششی پساتناوبی در مقایسه با مقاومت استاتیکی نداشته است. لیکن در حالت ماسه‌ی حاوی ۲۰٪ لای، کاهش محسوس مقاومت پساتناوبی مشاهده شده است.

- 18-Pant A., Datta M., Ramana G. V., Bansal D. 2019 Measurement of role of transverse and longitudinal members on pullout resistance of PET geogrid. *Measurement*, vol. 148, p. 106944.
- 19- Abu-Farsakh M., Coronel J., Tao M. 2007 Effect of Soil Moisture Content and Dry Density on Cohesive Soil-Geosynthetic Interactions Using Large Direct Shear Tests. *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 19, no. 7, pp. 540-549, doi:10.1061/(asce)08991561(2007)19:7(540).
- 20-Raju D. M. & Fannin R.J. 1997 Monotonic and cyclic pull-out resistance of geogrids. *Geotechnique*, vol. 47, no. 2, pp. 331-337.
- 21-Moraci N. & Cardile G. 2008 Cyclic pullout behaviour of extruded geogrids. *European Conference on Geosynthetics-Eurogeo4, Edinburgh, Scotland*, vol. 710.
- 22-Moraci N. & Cardile G. 2009 Influence of cyclic tensile loading on pullout resistance of geogrids embedded in a compacted granular soil. *Geotext. geomembranes*, vol. 27, no. 6, pp. 475-487.
- 23-Razzazan S., Keshavarz A., Mosallanezhad M. 2018 Pullout behavior of polymeric strip in compacted dry granular soil under cyclic tensile load conditions. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 10, no. 5, pp. 968-976.
- 24-Moraci N. & Gioffre D. 2006 A simple method to evaluate the pullout resistance of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil. *Geotext. Geomembranes*, vol. 24, no. 2, pp. 116-128.
- 11-Ferreira F. B., Vieira C. S., Lopes M. L., Carlos D. M. 2016 Experimental investigation on the pullout behaviour of geosynthetics embedded in a granite residual soil. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 20, no. 9, pp. 1147-1180.
- 12-Palmeira E.M. 2004 Bearing force mobilisation in pull-out tests on geogrids. *Geotext. geomembranes*, vol. 22, no. 6, pp. 481-509
- 13-Sieira A. C. C. F., Gerscovich D. M S. 2009 Displacement and load transfer mechanisms of geogrids under pullout condition. *Geotext. Geomembranes*, vol. 27, no. 4, pp. 241-253.
- 14-Sugimoto M., Alagiyawanna A. M. N., Kadoguchi K. 2001 Influence of rigid and flexible face on geogrid pullout tests. *Geotext. Geomembranes*, vol. 19, no. 5, pp. 257-277.
- 15-Zhou J., Chen J. F., Wang J. Q. 2012 Micro-mechanism of the interaction between sand and geogrid transverse ribs. *Geosynth. Int.*, vol. 19, no. 6, pp. 426-437.
- 16-Moraci N., Cardile G., Gioffre D., Mandaglio M. C., Calvarano L. S., Carbone L. 2014 Soil geosynthetic interaction: design parameters from experimental and theoretical analysis. *Transp. Infrastruct. Geotechnol.*, vol. 1, no. 2, pp. 165-227.
- 17-Moraci N. & Recalcatti P. 2006 Factors affecting the pullout behaviour of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil. *Geotext. Geomembranes*, vol. 24, no. 4, pp. 220-242.

Comparison of static and post-cyclic pullout strength of geogrid embedded in silty sand

D.Khazaei¹, A.Ardakani^{2*}, M.Hassanlou Rad³

1-Master of Civil-geotechnical engineering, Faculty of Technical and Engineering, Imam Khomeini International University (IKIU)

2-Associate Professor of Civil-geotechnical engineering, Faculty of Technical and Engineering, Imam Khomeini International University (IKIU)

3-Associate Professor of Civil-geotechnical engineering, Faculty of Technical and Engineering, Imam Khomeini International University (IKIU)

*a.ardakani@eng.ikiu.ac.ir

Abstract:

The interaction between soil and geosynthetics has great importance in engineering work, especially in design and stability analysis of geosynthetic-reinforced geotechnical structures. In recent decades, several laboratory methods have been performed to properly understand the interaction between soil and geogrids, including pullout test, large-scale direct shear test. Although factors such as the geometry of the reinforced soil system and its construction process may affect the interaction properties between the soil and the geosynthetic, these properties are strongly influenced by the physical and mechanical properties of the soil and the geometrical and mechanical properties of the geosynthetic. Pullout test determines the geosynthetic pullout resistance, which is an important design parameter in relation to the internal stability of geosynthetic-reinforced geotechnical structures, and allows the measurement of displacements throughout the specimen during the pullout testing. Pullout force refers to the tensile force required to create an external sliding of geogrid embedded in soil mass. The tensile strength of the reinforcement consists of the frictional resistance on the surface of the longitudinal and transverse members of the geogrid and the passive resistance that is mobilized against the transverse members. Although fine-grained soil is recommended in the design of geosynthetic-reinforced soil structures, many geosynthetic-reinforced soil structures are constructed using soil containing a fine percentage. Therefore it is important to investigate the effect of fine grains on the stability and performance of such soil structures under different loading conditions. Geosynthetic-reinforced soil structures are sometimes affected by cyclic loads due to traffic and train crossings, vibration of industrial machinery, wave and earthquake. In this study, by performing static and multistage pullout tests, the static and post-cyclic pullout behavior of a uniaxial geogrid manufactured in Iran under the brand GPGRID80/30 is presented. The tests were carried out on a large scale pullout box with a dimension of $90 \times 50 \times 50$ cm and with a constant rate and multi-stage procedures on three different soil types including clean sand, sand containing 10 and 20% fine silt and three effective vertical stresses of 20, 40 and 60 kPa. Results show that geogrid static pullout resistance increases with increasing effective vertical stress in all three different soil types. Also, the increase of silt in the sandy soil resulted in an increase in the monotonic maximum pullout resistance at effective stress of 20 kPa. The geogrid behavior in all three soils for 20 kPa vertical effective stress was strain softening and for the 40 and 60 kPa vertical effective stress the geogrid pullout behavior was strain hardening. However, 10% increase in silt content leads to a slight decrease in monotonic pullout resistance and a 20% increase resulted the slight increase in monotonic pullout resistance of geogrid at vertical stress of 40 and 60 kPa. As the amount of silt content increased, the effect of cyclic loading on post-cyclic resistance increased, especially in vertical effective stresses of 40 and 60 kPa. Also, at effective stress of 20 kPa, the geogrid post-cyclic resistance decreased in all three sands, sand containing 10% silt and sand containing 20% silt relative to its corresponding monotonic pullout resistance.

Keywords: Pullout test of geogrid, Silty sand, Silt content, Cyclic multistage test