



مقایسه اندرکنش سطح تماس ماسه و ماسه رس دار با ژئوگرید PET در آزمایش بیرون کشیدگی بر مبنای طول موثر

علی ماهیگیر، علیرضا اردکانی*، محمود حسنیلو راد

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۲

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۰۵

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۰

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷

کلمات کلیدی:

طول موثر

تنش برشی

ضریب اندرکنش بیرون کشیدگی

مقاومت بیرون کشیدگی

ماسه رس دار

خلاصه: آزمایش بیرون کشیدگی بزرگ مقیاس برای بررسی رفتار بیرون کشیدگی ژئوگرید در ناحیه مهاربندی شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. هنگامی که نیروی بیرون کشیدگی به ژئوگرید اعمال می‌گردد، این نیرو به تدریج در طول نمونه پیش می‌رود تا اینکه به انتهای نمونه برسد. به قسمتی از طول ژئوگرید که با فعال شدن مکانیزم اندرکنشی در آن، در برابر نیروی بیرون کشیدگی مقاومت می‌کند، طول موثر گفته می‌شود. جهت بررسی دقیق‌تر اندرکنش سطح تماس خاک و ژئوگرید، می‌بایست رفتار بیرون کشیدگی ژئوگرید بر مبنای طول موثر مورد ارزیابی قرار گیرد. در این مطالعه با انجام یک سری آزمایش بیرون کشیدگی بزرگ مقیاس، ضمن تخمین طول موثر ژئوگرید، به بررسی نحوه توزیع تنش برشی، ضریب اندرکنش بیرون کشیدگی، کرنش طولی سطح تماس دو نوع ژئوگرید تک سویه PET با ساختار هندسی یکسان و سختی متفاوت، مدفون در دو نوع خاک ماسه‌ای و ماسه حاوی ۲۰٪ رس تحت اثر تنش‌های قائم موثر مختلف و بر مبنای طول موثر پرداخته شد. نتایج نشان داد مقدار نیروی بیرون کشیدگی جهت شروع حرکت آخرین نوار عرضی ژئوگرید با افزایش تنش قائم موثر در هر دو نمونه ژئوگرید و هر دو نمونه خاک افزایش پیدا کرد. همچنین، کرنش موثر در هر دو مرحله انتقال نیرو و بیرون کشیدگی در ژئوگرید سخت‌تر مدفون در ماسه و ماسه رس دار نسبت به ژئوگرید شکل پذیرتر، کمتر بود. در مقادیر کم جابجایی‌های جلویی، افزایش سختی ژئوگرید موجب کاهش تنش برشی موثر در خاک ماسه‌ای و خاک ماسه رس دار می‌گردد. در تمامی آزمایش‌های بیرون کشیدگی ضریب اندرکنش بیرون کشیدگی موثر در نقطه تبدیل مرحله انتقال نیرو به مرحله بیرون کشیدگی حداقل مقدار را داشت.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، استفاده از ژئوسینتتیک‌ها به عنوان یک عضو مسلح کننده در سازه‌های خاک مسلح شامل شیروانی‌ها، پایه‌های پل، دیوارهای نگهبان و خاکریز جاده‌ها، به منظور بهبود خصوصیات مکانیکی خاک، به یک روش کاملاً فراگیر و تثبیت شده در سراسر جهان تبدیل شده است. هزینه ساخت نسبتاً پایین، کاهش زمان ساخت، شکل پذیری و انعطاف پذیری بالا از جمله دلایل استفاده روزافزون از ژئوسینتتیک‌ها است. از مهم‌ترین پارامترها جهت طراحی سازه‌های خاک مسلح مقاومت بیرون کشیدگی و تعیین خصوصیات سطح تماس خاک و ژئوسینتتیک است. به این منظور معمولاً از آزمایش‌های بزرگ مقیاس بیرون کشیدگی جهت تعیین پارامترهای سطح تماس خاک و ژئوسینتتیک در ناحیه مهاربندی شده استفاده می‌شود، زیرا در این شرایط امکان اندازه‌گیری مقاومت بیرون کشیدگی و جابجایی‌ها در طول نمونه ژئوسینتتیک

جهت طراحی سازه‌های خاک مسلح شده میسر می‌شود [۱ و ۲]. توزیع نیروی بیرون کشیدگی در طول ژئوسینتتیک با توجه به مشخصات مکانیکی، هندسی و ساختار ژئوسینتتیک، خصوصیات مکانیکی خاک و شرایط مرزی متفاوت است [۳-۸]. هنگامی که نیروی بیرون کشیدگی به نمونه ژئوسینتتیک اعمال می‌گردد، با توجه به قابلیت شکل پذیری ژئوسینتتیک‌ها، این نیرو به تدریج از قسمت جلویی نمونه به قسمت انتهایی آن منتقل می‌شود، به طوری که سهم قسمت جلویی ژئوسینتتیک در تحمل نیروی بیرون کشیدگی بیشتر است. جهت بررسی دقیق‌تر اندرکنش بین خاک و ژئوسینتتیک، بایستی طول موثر ژئوسینتتیک در حین انجام آزمایش بیرون کشیدگی تعیین گردد. ژئوگرید یکی از انواع ژئوسینتتیک است که به طور عمده برای تسلیح سازه‌های خاکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقاومت بیرون کشیدگی ژئوگرید که عبارت از بار کششی مورد نیاز برای لغزش رو به بیرون ژئوگرید از بین توده خاک

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.ardakani@eng.ikiu.ac.ir



مختلف شامل دو نوع ژئوگرید، یک نوع ژئوتنکستایل و یک نوع ژئوکامپوزیت مدفون در خاک محل در تراکم‌های نسبی مختلف پرداختند [۱۳]. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش تراکم نسبی خاک، ضریب اندرکنش بیرون کشیدگی بر مبنای طول کلی، کاهش می‌یابد. کاردیل و همکاران در سال ۲۰۱۶ رفتار بیرون کشیدگی دو نوع ژئوگرید تک سویه HDPE مدفون در خاک ماسه‌ای متراکم و در طول‌های مختلف را مورد ارزیابی قرار دادند [۱۴]. آن‌ها ضریب سطح تماس ژئوگرید و خاک و همچنین تنش برشی را بر مبنای طول موثر ژئوگرید محاسبه کردند. عبدی و میرزایی‌فر در سال ۲۰۱۷ با انجام آزمایش بیرون کشیدگی بر روی ژئوگرید HDPE مدفون در سه نوع خاک دانه‌ای با دانه‌بندی متفاوت نشان دادند که نیروی بیرون کشیدگی و ضخامت ناحیه برشی با افزایش اندازه دانه‌های خاک افزایش پیدا می‌کند [۱۶]. رفتار بیرون کشیدگی تسمه‌های پلیمری در خاک دانه‌ای متراکم تحت اثر بارهای استاتیکی و دینامیکی توسط رزازان و همکاران مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج تحقیق آن‌ها به روشنی نشان دهنده این موضوع بود که ضریب سطح تماس خاک دانه‌ای و تسمه پلیمری بر مبنای طول کلی، با افزایش تنش قائم موثر در هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی کاهش پیدا می‌کند [۱۷]. کاردیل و همکاران در سال ۲۰۱۹ ضمن بررسی ضریب اصطکاک ظاهری سطح تماس ژئوگرید HDPE و خاک دانه‌ای متراکم بر مبنای طول کلی، دریافتند که این ضریب در دو حالت استاتیکی و پساتناوبی^۳ با افزایش تنش قائم موثر کاهش پیدا می‌کند. ضریب اصطکاک ظاهری سطح تماس در حالت پساتناوبی همواره کمتر از حالت استاتیکی بود و این اختلاف با افزایش تنش قائم موثر کاهش پیدا کرد [۱۸].

اکثر مطالعات قبلی به بررسی رفتار بیرون کشیدگی ژئوگرید مدفون در خاک دانه‌ای و محاسبه ضریب سطح تماس ژئوگرید و خاک بر مبنای طول کلی ژئوگرید پرداختند. حال آن که تعیین ضریب اندرکنش سطح تماس بین خاک و ژئوگرید بر مبنای طول کلی با توجه به عدم توزیع یکنواخت نیروی بیرون کشیدگی در طول نمونه و اینکه بخش عمده نیروی بیرون کشیدگی توسط قسمت جلویی ژئوگرید تحمل می‌گردد، نمی‌تواند از دقت بالایی برخوردار باشد. از طرف دیگر در روش تحلیل جابجایی^۴، جهت بسیج شدن تنش‌ها در ژئوگرید، یک جابجایی از پیش تعیین شده در بالاترین قسمت یک شیروانی و یا یک دیوار مسلح شده با ژئوگرید، در نظر گرفته می‌شود. روش تحلیل جابجایی مستلزم منحنی نیرو-جابجایی جهت طراحی سازه‌های خاک مسلح مورد نظر است که از آزمایش بیرون کشیدگی به دست می‌آید. در

است، به طور کلی از دو مولفه مقاومت اصطکاکی و مقاومت مقاوم^۱ تشکیل می‌شود [۹-۱۲]. طول موثر به قسمتی از طول ژئوگرید اطلاق می‌گردد که با بسیج شدن مکانیزم اندرکنشی در آن، در برابر نیروی بیرون کشیدگی مقاومت می‌کند. بنابراین تعیین طول موثر برای درک رفتار واقعی تر اندرکنش خاک و ژئوگرید در آزمایش بیرون کشیدگی و همچنین طراحی صحیح تر سازه‌های خاکی مسلح، بسیار پراهمیت است. ضریب اندرکنش بیرون کشیدگی موثر (f_b) یک پارامتر مهم برای طراحی سازه‌های خاکی مسلح شده با ژئوسینتتیک است. این ضریب، مقاومت سطح تماس خاک و ژئوسینتتیک تحت اثر نیروی بیرون کشیدگی را با مقاومت برشی داخلی خاک تحت اثر تنش قائم یکسان مقایسه می‌کند. ضریب اندرکنش بیرون کشیدگی موثر (f_{bAI}) از رابطه (۱) به دست می‌آید [۱۳]:

$$f_{bAI} = \frac{P}{2L_A(c + \sigma'_v \tan \phi)} = \frac{\tau_{AI}}{\tau_s} \quad (1)$$

که در این رابطه P نیروی بیرون کشیدگی، c و ϕ به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک و L_A طول موثر ژئوسینتتیک هستند. τ_s مقاومت برشی پسماند خاک مورد نظر و τ_{AI} مقاومت برشی موثر بسیج شده در سطح تماس خاک و ژئوگرید در طی آزمایش بیرون کشیدگی هستند که از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد [۱۴]:

$$\tau_{AI} = \frac{P}{2L_A} \quad (2)$$

موراجی و ریکالکاتی در سال ۲۰۰۶ به بررسی رفتار سه نوع ژئوگرید HDPE^۲ تحت تنش‌های قائم موثر مختلف در خاک ماسه‌ای متراکم پرداختند و ضریب اندرکنش سطح تماس خاک و ژئوگرید را در دو حالت اوج و پسماند بر مبنای طول کلی ژئوگرید به دست آوردند [۱۵]. نتایج تحقیق آن‌ها بیانگر این بود که ضریب سطح تماس خاک و ژئوگرید در حالت اوج و بیشینه با افزایش تنش قائم موثر کاهش پیدا می‌کند. فریرا و همکاران در سال ۲۰۱۶ به تحقیق درباره رفتار بیرون کشیدگی چهار نوع ژئوسینتتیک

3 Post-cyclic

4 Displacement analysis method

1 Passive resistance

2 High density polyethylene

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و مقاومتی ماسه، رس و ماسه رس‌دار

Table 1. Physical and shear strength characteristics of the sand, clay and clayey sand

ماسه رس‌دار		رس		ماسه	
SC	USCS	CL	USCS	SP	USCS
۲۰/۵۹ (kN/m ³)	γ_{dmax}	۴۲ (%)	LL	۰/۷۷ (mm)	D₅₀
۳۶/۵۹°	ϕ_p	۲۸ (%)	PL	۲/۱۴	C_u
۱۴/۸۳ (kPa)	C	۱۴ (%)	PI	۰/۸۹	C_c
۸/۷ (%)	OMC	۲/۶۲	G _s	۲/۶۵	G_s
		۲۳ (%)	OMC	۵/۵ (%)	OMC
		۱۴/۹۱ (kN/m ³)	γ_{dmax}	۱۵/۸۹ (kN/m ³)	γ_{dmax}
		۱۰°	ϕ_p	۳۹/۲°	ϕ_p
		۲۳/۲ (kPa)	C	۵/۶ (kPa)	C

OMC: Optimum Moisture Content

مشابه و مقاومت نهایی و سختی متفاوت، مدفون در خاک ماسه‌ای و خاک ماسه‌ای حاوی ۲۰٪ رس، تحت اثر تنش‌های قائم موثر متفاوت و بر مبنای تخمین طول موثر ژئوگرید پرداخته شده است. به این منظور، در این مطالعه ضمن تخمین طول موثر ژئوگرید، تغییرات تنش برشی موثر و ضریب اندرکنش بیرون کشیدگی موثر سطح تماس خاک با ژئوگرید بر مبنای طول موثر مورد ارزیابی و تجزیه تحلیل قرار می‌گیرد.

۲- مصالح مورد استفاده

۲-۱- خاک

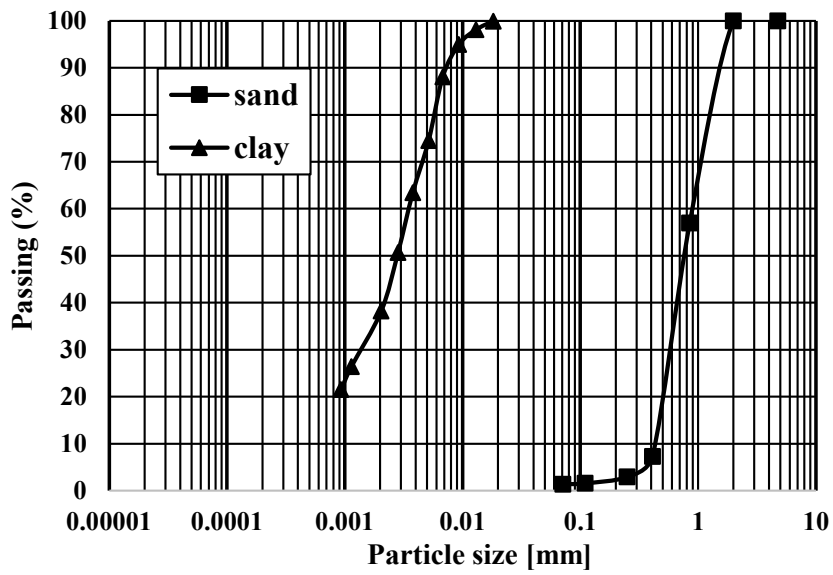
خاک‌های مورد استفاده در این تحقیق ماسه خالص و ماسه رس‌دار هستند. ماسه رس‌دار از ترکیب ماسه سیلسی یکنواخت فیروزکوه و ۲۰٪ رس کائولینیت، که بر اساس وزن خشک ماسه اندازه‌گیری شده، تهیه شد. به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماسه و رس، آزمایش‌های آزمایشگاهی شامل دانه‌بندی مطابق استاندارد [۲۴] ASTM D۶۹۱۳ برای ماسه و استاندارد [۲۵] ASTM D۴۲۲-۶۳ برای رس، تراکم پروکتور اصلاح شده برای تعیین حداکثر دانسیته خشک و رطوبت بهینه طبق استاندارد [۲۶] ASTM D۶۹۸ و آزمایش برش مستقیم برای تعیین زاویه اصطکاک و چسبندگی مطابق با استاندارد [۲۷] ASTM D۳۰۸۰ انجام گرفت. مشخصات فیزیکی و پارامترهای مقاومت برشی ماسه، رس و ماسه رس‌دار در جدول ۱ آورده شده است. شکل ۱ نمودار دانه‌بندی ماسه و رس و شکل ۲ پوش مقاومت برشی پیشینه خاک ماسه و ماسه رس‌دار را نشان می‌دهد.

این روش، برای اینکه طراحی‌ها از دقت و صحت بالاتری برخوردار باشند، منحنی نیرو-جابجایی باید بر اساس طول موثر محاسبه گردد.

به دلیل فقدان خاک‌های با کیفیت و گران در برخی مناطق خاک‌های با کیفیت پایین در ساخت شیروانی‌ها و بزرگراه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار کم ریزدانه (۶ تا ۱۰) درصد می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای نفوذپذیری خاک‌ها را کاهش داده و چنانچه این سازه‌های خاکی در شرایط غیراشباع ساخته شوند، یک نگرانی عمده، تحلیل پایداری و طراحی این سازه‌ها و کاهش مقاومت سطح تماس خاک و ژئوسنتیک در اثر مرطوب شدن سطح تماس آن‌ها می‌باشد. اگر چه در برخی استانداردها استفاده از خاک‌های درشت‌دانه برای خاکریز پشت دیوارهای خاک مسلح پیشنهاد شده است [۱۹]، اما در مواردی به دلیل عدم دسترسی به خاک دانه‌ای با کیفیت بالا و همچنین مسائل اقتصادی ناچار به استفاده از خاک محل هستیم که ممکن است مقداری ریزدانه داشته باشد [۲۱ و ۲۰]. برخی آیین‌نامه‌های طراحی صنعتی استفاده از خاک حاوی حداکثر ۳۵٪ ریزدانه را به شرط تامین زهکشی مناسب مجاز دانسته‌اند [۲۲]. همچنین برخی آیین‌نامه‌ها استفاده از خاک ریزدانه حداکثر تا ۵۰٪ را جهت استفاده از خاکریز در ساخت شیروانی‌ها و سازه‌های خاکی مسلح را مجاز شمرده‌اند [۲۳].

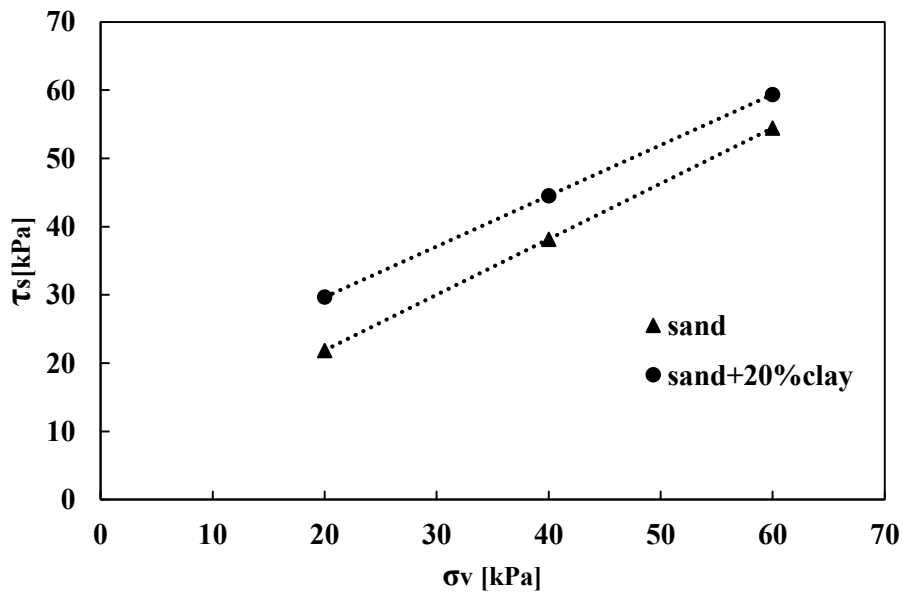
به منظور بررسی تاثیر افزایش همزمان ریزدانه و سختی ژئوگرید بر اندرکنش سطح تماس خاک و ژئوگرید، در این مطالعه به بررسی رفتار بیرون کشیدگی دو نوع ژئوگرید تک‌سویه از نوع PET^۱ با ساختار هندسی

1 Polyester



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی ماسه و رس مورد آزمایش

Fig. 1. Gradation curves of used sand and clay



شکل ۲. پوش مقاومت برشی بیشینه خاک ماسه‌ای و ماسه رس‌دار

Fig. 2. Peak shear strength envelope of sand and clayey sand

جدول ۲. ویژگی‌های ژئوگرید مدل GPGRID 80/30 و GPGRID 110/30

Table 2. Properties of GPGRID 80/30 (GP1) and GPGRID 110/30 (GP2)

GPGRID110/30 (GP2)	GPGRID80/30 (GP1)	ژئوگرید
PET	PET	مواد اولیه
PVC	PVC ^۱	پوشش
۱۱۰ (kN/m)	۸۰ (kN/m)	مقاومت کششی نهایی در جهت طولی
۳۰ (kN/m)	۳۰ (kN/m)	مقاومت کششی نهایی در جهت عرضی
۱۲(٪)	۱۲(٪)	کرنش در مقاومت کششی اسمی در جهت طولی
۸۶۰ (kN/m)	۶۹۰ (kN/m)	سختی طولی ژئوگرید (J5%)
۳۳ (mm)	۳۳ (mm)	اندازه چشمه ژئوگرید در جهت طولی
۲۵ (mm)	۲۵ (mm)	اندازه چشمه ژئوگرید در جهت عرضی
۲ (mm)	۲ (mm)	ضخامت

^۱ Polyvinyl chloride

کیلوپاسکال را دارد. جابجایی نوارهای عرضی ژئوگرید به وسیله سه عدد سیم فولادی غیرقابل کشش که به سه عدد LVDT در قسمت انتهایی جعبه دستگاه متصل شده‌اند، در فواصل یکسان در طول نمونه اندازه‌گیری می‌شوند. برای به حداقل رساندن اثر اصطکاک دیواره جلویی دستگاه، از یک غلاف به طول ۱۵ سانتی‌متر در داخل جعبه دستگاه استفاده گردیده است. همچنین به منظور جلوگیری از اثر اصطکاک دیواره‌های کناری دستگاه بر نتایج آزمایش، شیشه‌های پلاستیکی^۲ در وجوه داخلی جداره‌های کناری دستگاه نصب گردید. از یک گیره فلزی به منظور اتصال نمونه ژئوگرید به جک بارگذاری استفاده شد. شکل ۴ به صورت شماتیک اجزای مختلف دستگاه بیرون کشیدگی مورد استفاده را نمایش می‌دهد.

۴- فرآیند انجام آزمایش

آزمایش‌های بیرون کشیدگی بر روی دو نوع ژئوگرید GP_۱ و GP_۲ مدفون در خاک ماسه‌ای خالص و خاک ماسه حاوی ۲۰ درصد ریزدانه انجام گرفت. با توجه به اینکه هدف این مطالعه مقایسه بین اندرکنش سطح تماس ماسه و ماسه رس‌دار با ژئوگرید است و از طرفی وجود ریزدانه‌ها تا ۳۵٪ طبق برخی استانداردها مجاز دانسته شده که در عمل مشکلاتی از جمله

۲-۲ ژئوگرید

در این مطالعه دو نوع ژئوگرید تک‌سویه پلی‌استر (PET) تحت نام تجاری (GP_۱) GPGRID ۸۰/۳۰ و (GP_۲) GPGRID ۱۱۰/۳۰ برای انجام آزمایش‌های بیرون کشیدگی مورد استفاده قرار گرفته است. در این دو نوع ژئوگرید اعداد اول و دوم از چپ به ترتیب نشان دهنده مقاومت کششی در جهت طولی و عرضی برحسب کیلونیوتن بر متر است. در جدول ۲ مشخصات هندسی و مکانیکی این دو نوع ژئوگرید که توسط شرکت سازنده آن تهیه شده، آورده شده است.

۳- دستگاه بیرون کشش

دستگاه بیرون کشیدگی بزرگ مقیاس مورد استفاده در این تحقیق (شکل ۳) که توسط شرکت ساخت آزما ویستا تولید شده است، از یک جعبه فولادی به طول ۹۰ سانتی‌متر، عرض ۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر، بالشتک هوا جهت اعمال بار قائم، جک محرک الکتریکی جهت اعمال بار بیرون کشیدگی افقی، یک سلول بار^۱ جهت اندازه‌گیری بار بیرون کشیدگی و تجهیزات ذخیره اطلاعات تشکیل شده است. بالشتک حاضر در فضایی به ارتفاع حدود ۴ سانتی‌متر بالای جعبه قرار می‌گیرد و امکان بارگذاری تا ۷۵

2 Plexiglas

1 Load cell



(الف)



(ج)



(ب)

شکل ۳. الف) تصویر کلی از دستگاه بیرون کشیدگی موجود در آزمایشگاه (ب) نحوه قرارگیری ژئوگرید در تراز میانی ماسه (ج) جاگذاری بالشتک هوا بر روی خاک جهت اعمال بار قائم [۲۹]

Fig. 3. a) General view of the pullout apparatus b) Geogrid placement at the middle level of sand c) Placement of airbag at top of the soil for applying vertical stress

مورد نیاز و همچنین توزیع یکنواخت انرژی تراکمی روی سطح نمونه از یک چکش که به این منظور ساخته شده، استفاده گردید. تعداد ضربات برای رسیدن به درجه تراکم مورد نظر طی آزمایش‌های مقدماتی و به صورت سعی و خطا تعیین گردید.

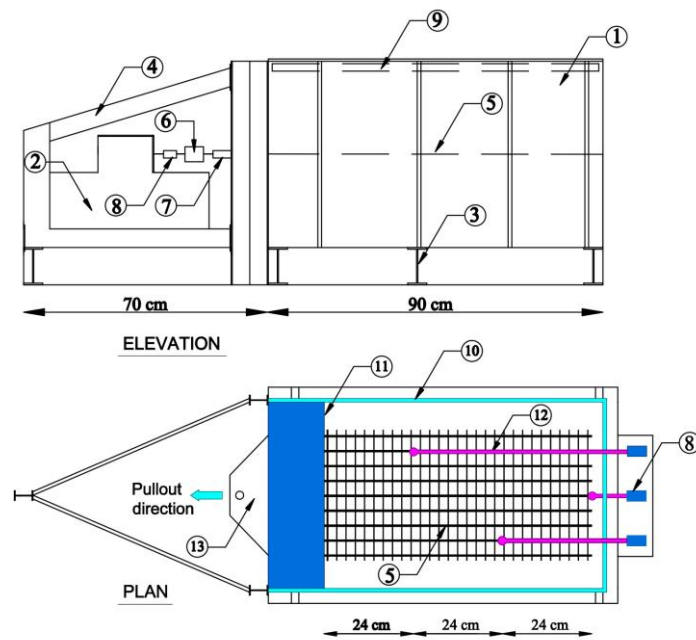
ب- پس از رسیدن ارتفاع خاک به تراز میانی محفظه بیرون کشیدگی، نمونه ژئوگرید متصل به گیره، به طول ۷۲ سانتی‌متر و عرض ۳۳ سانتی‌متر بر روی خاک به صورت کاملاً افقی قرار داده شد، به نحوی که فاصله انتها و کناره‌های نمونه ژئوگرید تا بدنه‌ی محفظه دستگاه بیرون کشش حدود ۷/۵ سانتی‌متر به دست آید. سپس قسمت جلویی نمونه پس از عبور از میان

زهکشی را در اجرا در پی خواهد داشت، از این رو ماسه با ۲۰ درصد رس انتخاب گردید.

مراحل آماده‌سازی نمونه خاک ماسه‌ای و ماسه رس‌دار مسلح شده با

ژئوگرید قبل از انجام آزمایش‌های بیرون کشیدگی به شرح ذیل است:

الف- خاک ماسه‌ای و ماسه رس‌دار در ۵ لایه حدوداً ۴/۵ سانتی‌متری و تا ارتفاع حدوداً ۲۲/۵ سانتی‌متری در قسمت تحتانی جعبه دستگاه بیرون کشیدگی ریخته شد. هر لایه تا رسیدن به وزن مخصوص خشک برابر با ۹۰ درصد وزن مخصوص خشک حداکثر و در درصد رطوبت بهینه خاک مورد نظر تراکم گردید. به منظور حصول اطمینان از رسیدن به تراکم



۱) جعبه دستگاه ۲) دستگاه محرک الکتریکی ۳) تکیه‌گاه زیرین ۴) تکیه‌گاه بالایی ۵) ژنوگرید ۶) سلول بار ۷) گیره ۸) LVDT ۹) بالشتک هوا ۱۰) شیشه پلاستیکی ۱۱) غلاف ۱۲) سیم‌های فولادی غیرقابل کشش ۱۳) گیره

1) Pullout box 2) Electric actuator device 3) Base support 4) Top support 5) Geogrid 6) Load cell 7) Clamp 8) LVDT 9) Airbag 10) Plexiglas 11) Sleeve 12) Inextensible steel wires 13) Clamp

شکل ۴. جزئیات شماتیک از دستگاه بیرون کشیدگی موجود در آزمایشگاه [۲۹]

Fig. 4. Schematic details of the pullout apparatus available in the laboratory

بالشتک اعمال شده و قبل از شروع آزمایش، این فشار حداقل به مدت ۵ دقیقه روی نمونه باقی ماند. شکل ۴ نحوه قرارگیری نمونه ژنوگرید بر سطح لایه میانی و چگونگی اتصال سیم‌های غیرقابل کشش به نمونه ژنوگرید را نشان می‌دهد.

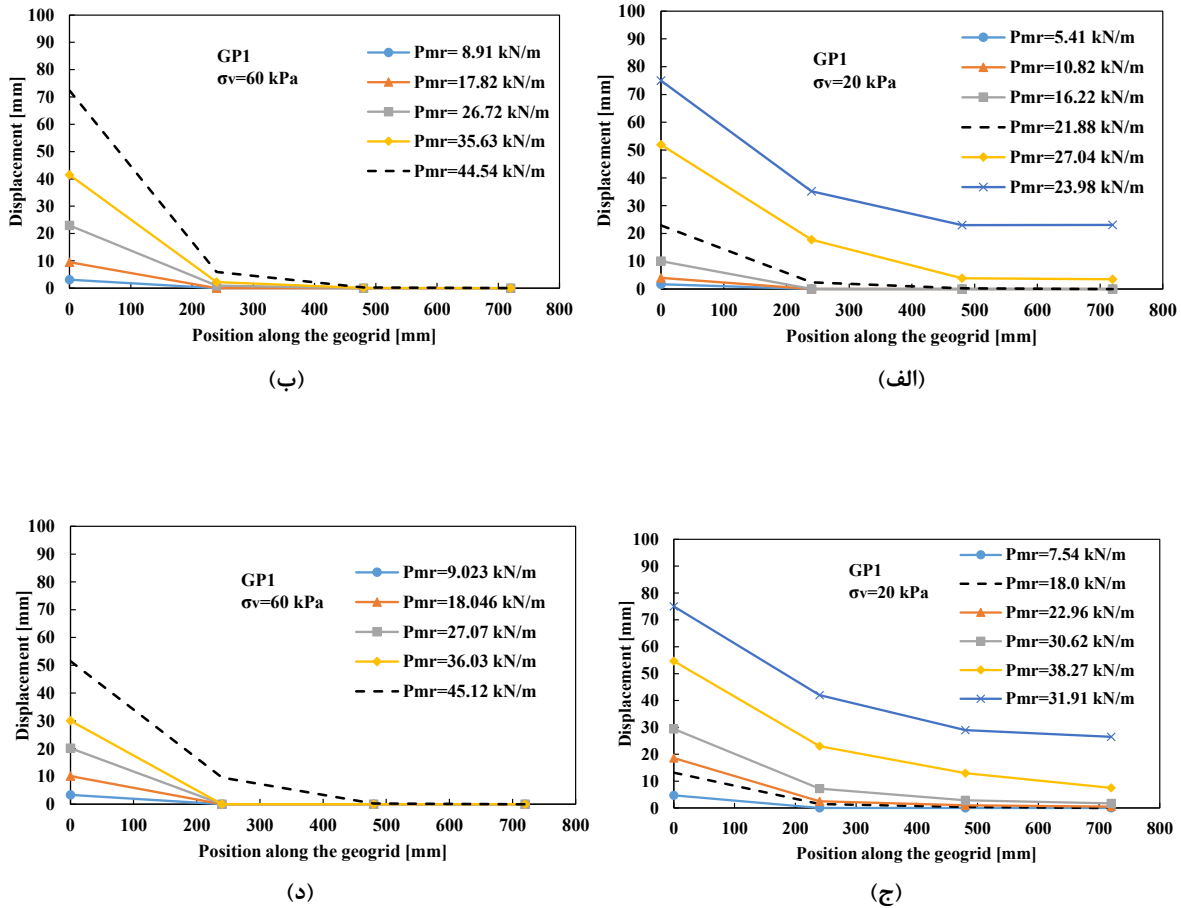
در حین نمونه‌سازی از آزمایش دانسیته در محل^۱ برای ماسه و از نمونه‌گیر استوانه‌ای برای ماسه رس‌دار جهت پی بردن به میزان تراکم و کوپیدگی لایه‌های ماسه استفاده گردید. نتایج نشان می‌داد بیشترین میزان اختلاف تراکم لایه‌های ماسه و ماسه رس‌دار با تراکم واقعی، که ۹۰ درصد وزن مخصوص خشک بیشینه بود، ۲/۵ درصد است.

آزمایش‌ها به شکل جابجایی با سرعت ثابت انجام گرفت و نیروی بیرون کشیدگی به شکل جابجایی کنترل و با سرعت ثابت mm/min ۱ مطابق با ASTM D۶۷۰۶-۰۱ [۲۸] به نمونه اعمال شد. آزمایش

غلاف دستگاه به فک دستگاه متصل گردید. جهت اندازه‌گیری جابجایی طولی نسبی قطعات عرضی نمونه ژنوگرید، سه عدد سیم غیرقابل کشش به وسیله قلاب‌های مخصوص و در فواصل یکسان ۲۴ سانتی‌متری نسبت به هم به نمونه متصل گشت، به طوری که نمونه ژنوگرید به سه قسمت برابر تقسیم شد. این سیم‌ها با عبور از حفاظ فلزی انتهایی دستگاه به سیستم LVDT متصل گردیدند.

پ- نیمه فوقانی محفظه بیرون کشیدگی نیز همانند نیمه تحتانی از خاک مورد نظر در درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک برابر با ۹۰ درصد وزن مخصوص خشک حداکثر، در ۵ لایه حدود ۴/۵ سانتی‌متری و تا رسیدن به ارتفاع ۴۵ سانتی‌متری پر شده و متراکم گردید. سپس بالشتک هوا جهت اعمال تنش‌های عمودی بر روی نمونه خاک قرار داده شده و درپوش فوقانی به وسیله ۶ عدد پیچ بسته شد. بالشتک هوا تا رسیدن به تنش قائم مورد نظر تحت فشار قرار می‌گیرد. جریان هوا با استفاده از سرور کنترل فشار به داخل

1 Sand bottle



شکل ۵. تغییرات جابجایی در طول نمونه ژئوگرید به ازای مقادیر مختلف نیروی بیرون کشیدگی در الف) ژئوگرید GP1 مدفون در ماسه تحت تنش قائم موثر ۲۰ کیلوپاسکال ب) ژئوگرید GP1 مدفون در ماسه تحت تنش قائم موثر ۶۰ کیلوپاسکال ج) ژئوگرید GP1 مدفون در ماسه رس دار تحت تنش قائم موثر ۶۰ کیلوپاسکال د) ژئوگرید GP2 مدفون در ماسه رس دار تحت تنش قائم موثر ۶۰ کیلوپاسکال

Fig. 5. The variation of pullout force versus active length of geogrid under different vertical effective stresses for a) GP1 embedded in sand b) GP2 embedded in sand c) GP1 embedded in clayey sand d) GP2 embedded in clayey sand

ماسه رس دار در آزمایش های بیرون کشیدگی از ۶ عدد نمونه گیر در لایه های مختلف خاک مورد استفاده قرار گرفت که حداکثر اختلاف درصد تراکم مدنظر و به دست آمده ۲/۵٪ بود. شکل ۳ نمونه ژئوگرید در لایه میانی ماسه و همچنین چگونگی قرارگیری بالشتک هوا را بر روی خاک جهت اعمال بار قائم نشان می دهد.

۵- تحلیل نتایج

۵-۱- مکانیزم انتقال بار بیرون کشیدگی در طول ژئوگرید

شکل ۵ مقدار جابجایی نقاط گره ای ژئوگرید GP1 مدفون در خاک ماسه و ماسه رس دار را در حین انجام آزمایش بیرون کشیدگی به ازای مقادیر مختلف نیروی بیرون کشیدگی و تحت اثر تنش قائم موثر ۲۰

زمانی پایان یافت که یا نمونه ژئوگرید گسیخته شد و یا جابجایی جلویی نمونه به مقدار ۷۵ میلی متر، که بیشترین مقدار جابجایی جلویی گیره دستگاه است، رسید. این مقدار جابجایی با مقدار جابجایی مجاز تحت تنش موثر ۷۵ کیلوپاسکال مطابقت دارد. تعداد ۱۲ آزمایش بیرون کشیدگی جابجایی با سرعت ثابت در سه تنش قائم موثر برابر با ۲۰، ۴۰ و ۶۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شد و برای اطمینان از تکرارپذیری نتایج، هر آزمایش نیز سه مرتبه تکرار گردید. با توجه به اینکه حداکثر تنش قائم موثر قابل اعمال توسط بالشتک هوا بر نمونه خاک ۷۵ کیلوپاسکال است، از این رو جهت شبیه سازی رفتار بیرون کشیدگی نمونه ژئوگرید در تنش های موثر قائم کم و زیاد از این سه تنش قائم موثر استفاده گردید. جهت کنترل درصد تراکم و رطوبت خاک

عرضی متصل به هر قلاب شروع به حرکت کند، فاصله آن نوار عرضی تا گیره دستگاه، به علاوه میزان تغییر طول آن قسمت، طول موثر نامیده می‌شود. وقتی آخرین نوار عرضی شروع به حرکت کند، مرحله دوم (مرحله بیرون کشیدگی) آغاز می‌گردد و در این مرحله کل طول نمونه در برابر نیروی بیرون کشیدگی مقاومت می‌کند.

شکل ۶ مقادیر آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده طول موثر، L_A ، با افزایش نیروی بیرون کشش برای نمونه ژئوگرید GP۱ و GP۲ مدفون در خاک ماسه‌ای و خاک ماسه رس‌دار را در تنش قائم موثر ۲۰، ۴۰ و ۶۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. برای هر نمونه ژئوگرید و هر تنش قائم موثر، بهترین منحنی از طریق رابطه (۳) به وسیله داده‌های ثبت شده، برازش داده شد و ضرایب a و b تعیین گردید:

$$P = aL_A^2 + bL_A \quad (3)$$

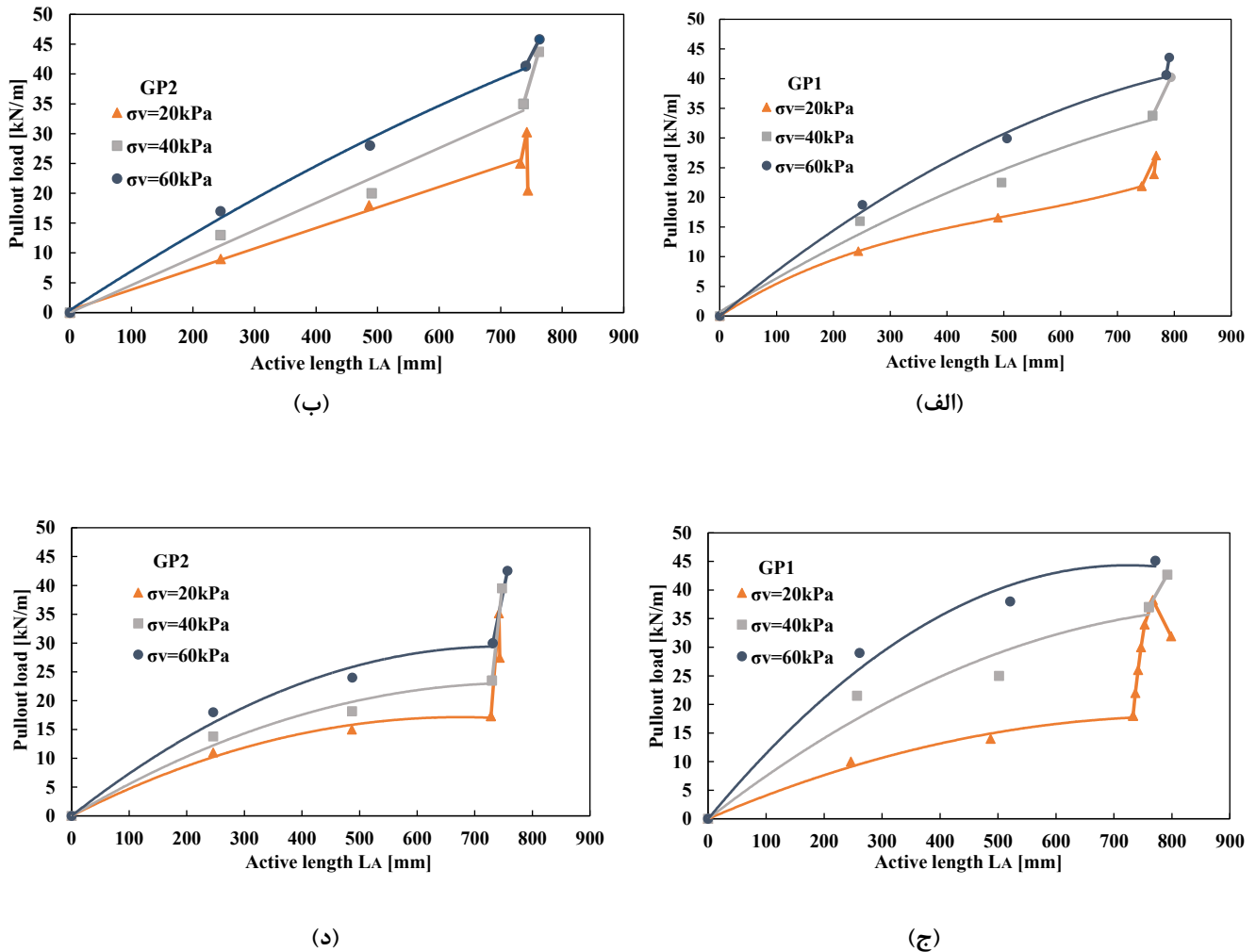
همانطور که از شکل ۶ مشخص است داده‌های آزمایشگاهی مطابقت خوبی با توابع پیشنهادی دارند. در مرحله انتقال بار با افزایش نیروی بیرون کشیدگی طول موثر ژئوگرید هم به صورت تدریجی اضافه می‌شود تا زمانی که کل طول نمونه ژئوگرید در برابر نیروی بیرون کشیدگی فعال می‌شود، به عبارت دیگر طول موثر برابر با طول کلی نمونه ژئوگرید می‌گردد، و نمونه وارد مرحله بیرون کشیدگی شده و از این پس افزایش طول موثر تنها به دلیل تغییر شکل نمونه است و چون نرخ افزایش طول موثر در برابر نرخ افزایش نیروی بیرون کشیدگی در این مرحله نسبت به مرحله انتقال بار کمتر است، این مسئله موجب افزایش شیب نمودار می‌گردد. مطابق شکل ۶، نیروی بیرون کشیدگی متناظر با طول موثر نمونه ژئوگرید در دو نمونه GP۱ و GP۲ و هر دو نوع خاک با افزایش تنش قائم موثر افزایش پیدا می‌کند. منحنی‌های مربوط به هر نمونه ژئوگرید در هر تنش قائم موثر از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول مرحله انتقال نیرو و بخش دوم مرحله بیرون کشیدگی است و مرز بین این دو قسمت، نقطه شروع حرکت آخرین نوار عرضی ژئوگرید و بسیج شدن کل طول ژئوگرید جهت مقاومت در برابر نیروی بیرون کشیدگی است. مقدار نیروی بیرون کشیدگی جهت شروع حرکت آخرین نوار عرضی ژئوگرید با افزایش تنش قائم موثر در هر دو نمونه ژئوگرید و هر دو نمونه خاک افزایش پیدا می‌کند. نتایج تحقیق مورچی و ریکالکاتی (۲۰۰۶) و کاردیل و همکاران (۲۰۱۶) بر روی مقاومت

و ۶۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. مطابق شکل ۵، جابجایی‌های ثبت شده به وسیله جابجایی‌سنج‌ها (LVDT) حاکی از توزیع غیرخطی تغییر شکل در طول نمونه ژئوگرید است. مقدار جابجایی‌های نقاط در طول نمونه در بخش ابتدایی بیشتر است و با افزایش فاصله از نقطه اعمال جابجایی (محل چسبیده به گیره)، از مقدار جابجایی‌های نقاط در طول نمونه کاسته می‌شود. قابلیت کشش ژئوگرید و شکل‌گیری مکانیزم خرابی پیش‌رونده در طول نمونه ژئوگرید، نقش به‌سزایی در کاهش مقدار جابجایی نقاط در طول نمونه با افزایش فاصله از نقطه اعمال بار دارد. همچنین با افزایش تنش قائم موثر از ۲۰ به ۶۰ کیلوپاسکال، به دلیل تغییر رفتار ژئوگرید از حالت لغزش^۱ به حالت ازدیاد طول^۲، شیب خط واصل بین نقاطی که در آن جابجایی ثبت گردید، افزایش می‌یابد. با مقایسه منحنی‌های جابجایی می‌توان دریافت که برای آزمایش تحت تنش قائم موثر ۲۰ کیلوپاسکال شیب خط واصل بین نقاط در نمودارهای بالایی توزیع جابجایی با هم تقریباً یکسان شده که بیانگر وقوع حالت بیرون کشیدگی^۳ در نمونه ژئوگرید است، حال آن که که برای آزمایش‌های تحت تنش قائم موثر ۶۰ کیلوپاسکال نمونه ژئوگرید رفتار سخت شونده‌گی از خود نشان می‌دهد، زیرا با افزایش نیروی بیرون کشیدگی شیب منحنی‌های توزیع جابجایی افزایش می‌یابد. در توجیه این پدیده باید به قابلیت کشش ژئوگرید در بسیج شدن مکانیزم اندرکنش سطح تماس خاک و ژئوگرید اشاره کرد. مکانیزم اندرکنش ژئوگرید و خاک تحت تنش موثر قائم ۶۰ کیلوپاسکال به صورت پیش‌رونده و تدریجی است در صورتی که مکانیزم اندرکنشی خاک و ژئوگرید تحت تنش موثر قائم ۲۰ کیلوپاسکال تقریباً در یک زمان مشابه و به طور همزمان در طول نمونه فعال می‌گردد. با افزایش نیروی بیرون کشیدگی، طول موثر ژئوگرید به صورت تدریجی بیشتر شده تا جایی که نیروی بیرون کشیدگی موجب حرکت آخرین نوار عرضی ژئوگرید و فعال شدن کل طول نمونه ژئوگرید می‌شود که در شکل با منحنی خط‌چین مشخص گردیده است.

۵-۲- تخمین آزمایشگاهی طول موثر

جابجایی نوارهای عرضی در حین انجام آزمایش بیرون کشیدگی به وسیله سیم‌های فولادی غیرقابل کشش متصل به LVDT، اندازه‌گیری شد. در مرحله اول (مرحله انتقال نیرو) نیروی بیرون کشیدگی به تدریج از قسمت جلویی دستگاه در طول نمونه فعال می‌گردد و به محض اینکه نوار

- 1 Sliding
- 2 Elongation
- 3 Pullout condition

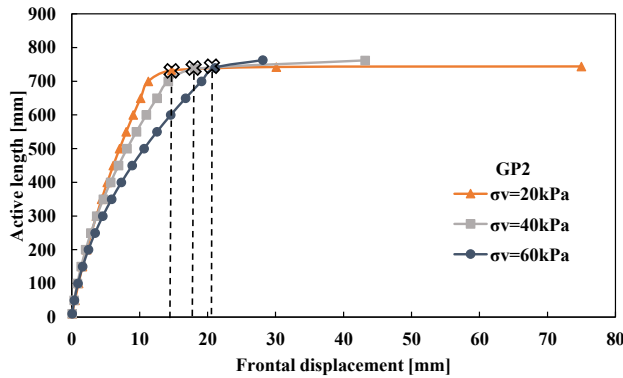


شکل ۶. تغییرات نیروی بیرون کشیدگی در برابر طول موثر ژئوگرید به ازای مقادیر مختلف تنش قائم موثر در الف) ژئوگرید GP۱ مدفون در ماسه ب) ژئوگرید GP۲ مدفون در ماسه ج) ژئوگرید GP۱ مدفون در ماسه رس دار د) ژئوگرید GP۲ مدفون در ماسه رس دار

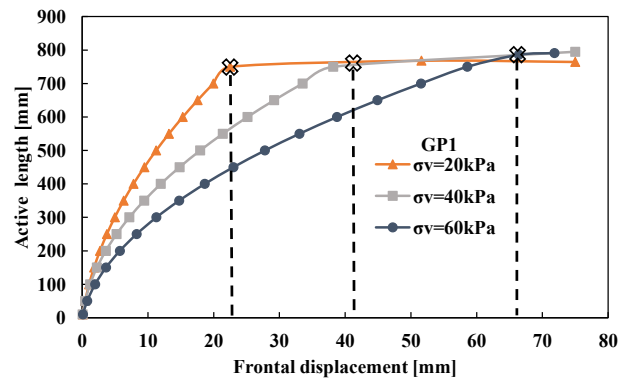
Fig. 6. The variation of pullout force versus active length of geogrid under different vertical effective stresses for a) GP1 embedded in sand b) GP2 embedded in sand c) GP1 embedded in clayey sand d) GP2 embedded in clayey sand

است. در نمونه خاک ماسه‌ای افزایش سختی ژئوگرید تاثیر چندان زیادی بر روی نیروی بیرون کشیدگی مورد نیاز جهت شروع حرکت آخرین نوار عرضی ژئوگرید ندارد، حال آن که در خاک ماسه رس دار و در تنش قائم موثر 40 و 60 کیلوپاسکال کاهش سختی موجب افزایش نیروی بیرون کشیدگی متناظر با فعال شدن طول کل ژئوگرید می‌گردد. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش تراکم خاک سطح تماس موجب افزایش نیروی بیرون کشیدگی

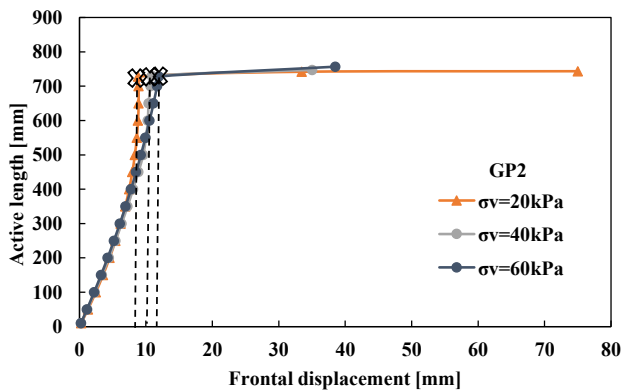
بیرون کشیدگی ژئوگرید HDPE مدفون در ماسه متراکم بود نیز حاکی از افزایش نیروی بیرون کشیدگی جهت حرکت آخرین نوار عرضی با افزایش تنش قائم موثر داشت [۱۴ و ۱۵]. افزایش تنش قائم موثر موجب افزایش نیروهای بین دانه‌ای و قفل و بست بیشتر ذرات خاک می‌گردد که این مسئله افزایش مقاومت مقاوم در جلوی نوارهای عرضی را در پی خواهد داشت و در نتیجه نیروی بیشتری جهت حرکت آخرین نوار عرضی ژئوگرید مورد نیاز



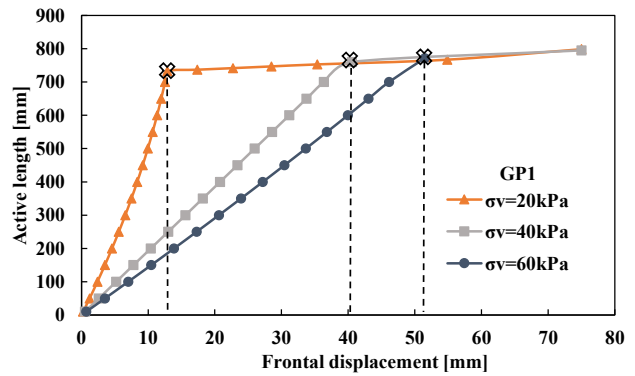
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

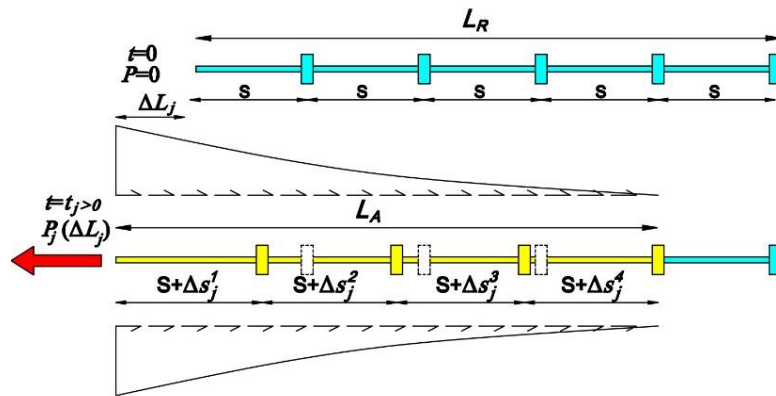
شکل ۷. تغییرات طول موثر ژئوگرید در برابر جابجایی جلویی به ازای مقادیر مختلف تنش قائم موثر در الف) ژئوگرید GP۱ مدفون در ماسه ب) ژئوگرید GP۲ مدفون در ماسه رس دار

Fig. 7. The variation of active length of geogrid versus frontal displacement under different vertical effective stresses for a) GP1 embedded in sand b) GP2 embedded in sand c) GP1 embedded in clayey sand d) GP2 embedded in clayey sand

می‌پذیرد.

شکل ۷ تغییرات طول موثر را در برابر جابجایی جلویی (جابجایی گیره) برای دو نوع ژئوگرید GP۱ و GP۲ مدفون در خاک ماسه‌ای و خاک ماسه رس‌دار نشان می‌دهد. علامت‌های موجود بر روی نمودار نشان دهنده نقطه آغاز مرحله بیرون کشیدگی و فعال شدن کل طول نمونه ژئوگرید است. همانطور که از شکل ۷ مشخص است، با افزایش تنش قائم موثر، جابجایی

ژئوگرید شکل‌پذیرتر (GP۱) نسبت به ژئوگرید سخت‌تر (GP۲) جهت شروع حرکت آخرین نوار عرضی ژئوگرید می‌گردد. به عبارت دیگر، با توجه به مکانیزم گسیختگی پیش‌رونده در تنش قائم موثر ۴۰ و ۶۰ کیلوپاسکال و تمرکز نیروها در قسمت ابتدایی ژئوگرید، این مسئله با افزایش همزمان تراکم خاک و شکل‌پذیری ژئوگرید برجسته‌تر شده و انتقال نیرو به قسمت‌های انتهایی ژئوگرید به ازای مقادیر بیشتری از نیروی بیرون کشیدگی صورت



شکل ۸. چگونگی انتقال بار در طول ژئوگرید در حین انجام آزمایش بیرون کشیدگی

Fig. 8. Load transfer along the geogrid during the pullout test

تخمین کرنش‌های صورت گرفته در نمونه بر مبنای طول موثر ژئوگرید تعریف می‌شود [۱۳]:

$$\varepsilon_{Al} = \frac{\Delta L}{L_A - \Delta L} \quad (۴)$$

که در این رابطه ΔL تغییر طول نمونه و ε_{Al} کرنش موثر است. جدول ۳ کرنش‌های به وجود آمده در مرحله انتقال نیرو ($\varepsilon_{t_{Al}}$) و مرحله بیرون کشیدگی ($\varepsilon_{p_{Al}}$) را در دو نمونه خاک و دو نوع ژئوگرید نشان می‌دهد. بر طبق داده‌های جدول ۳، افزایش تنش قائم موثر منجر به افزایش کرنش موثر $\varepsilon_{t_{Al}}$ و $\varepsilon_{p_{Al}}$ در نمونه‌های ژئوگرید و در هر دو نوع خاک شده است. علاوه بر این، به دلیل سختی زیادتر، کرنش موثر در انتهای هر دو مرحله انتقال نیرو و بیرون کشیدگی در ژئوگرید GP۲ نسبت به ژئوگرید GP۱ کمتر است. کرنش موثر ایجاد شده در انتهای مرحله انتقال نیرو در ژئوگرید مدفون در خاک ماسه‌ای نسبت به خاک ماسه‌ای رس‌دار دارای مقدار بیشتری است که این مسئله به دلیل سریع‌تر بسیج شدن اندرکنش سطح تماس بین خاک و ژئوگرید و در خاک ماسه‌ای رس‌دار در اثر تراکم بالاتر آن نسبت به خاک ماسه‌ای است. شکل ۷ نیز به خوبی موید این مسئله است که ژئوگرید قرار گرفته در خاک ماسه رس‌دار به ازای جابجایی جلویی کمتری نسبت

جلویی نمونه جهت آغاز مرحله بیرون کشیدگی به دلیل افزایش مقاومت مقاوم شکل گرفته در جلوی نوارهای عرضی در هر دو نوع ژئوگرید و هر دو نوع خاک افزایش پیدا می‌کند. مطابق شکل ۷، به دلیل سختی بیشتر، جابجایی جلویی مورد نیاز جهت فعال شدن کل طول نمونه، در ژئوگرید GP۲ در هر دو نوع خاک و هر تنش قائم موثر نسبت به ژئوگرید GP۱ کمتر است. با افزایش سختی ژئوگرید مکانیزم اندرکنش بین خاک و ژئوگرید تقریباً به طور همزمان در طول ژئوگرید فعال می‌گردد و موجب می‌گردد تا نیروی بیرون کشیدگی به ازای جابجایی جلویی کمتری به آخرین نوار عرضی ژئوگرید برسد. ژئوگریدهای مدفون در خاک ماسه رس‌دار در جابجایی جلویی کمتری نسبت به خاک ژئوگرید مدفون در خاک ماسه‌ای وارد مرحله بیرون کشیدگی می‌گردند. افزایش تراکم خاک سطح تماس ماسه رس‌دار با ژئوگرید نسبت به خاک ماسه موجب می‌گردد تا اندرکنش سطح تماس خاک و ژئوگرید زودتر بسیج شده و طول موثر نمونه ژئوگرید در جابجایی جلویی کمتری برابر با طول کل نمونه گردد.

۵-۳- کرنش موثر

شکل ۸ وضعیت ژئوگرید را در لحظه ابتدای آزمایش ($t=0$) و در حین انجام آزمایش ($t=t_j$) به صورت شماتیک نشان می‌دهد. از آنجا که طول، میزان تغییر طول و نیروی بیرون کشیدگی اعمالی بر نمونه ژئوگرید در طی انجام آزمایش بیرون کشیدگی تغییر پیدا می‌کند، از این رو رابطه (۴) جهت

جدول ۳. مقادیر کرنش مرحله انتقال نیرو (ϵ_{tAI}) و مرحله بیرون کشیدگی (ϵ_{pAI}) در ژئوگرید GP۱ و GP۲

Table 3. The values of strain at force transfer stage (ϵ_{tAI}) and pullout stage (ϵ_{pAI}) in geogrid GP1 and GP2

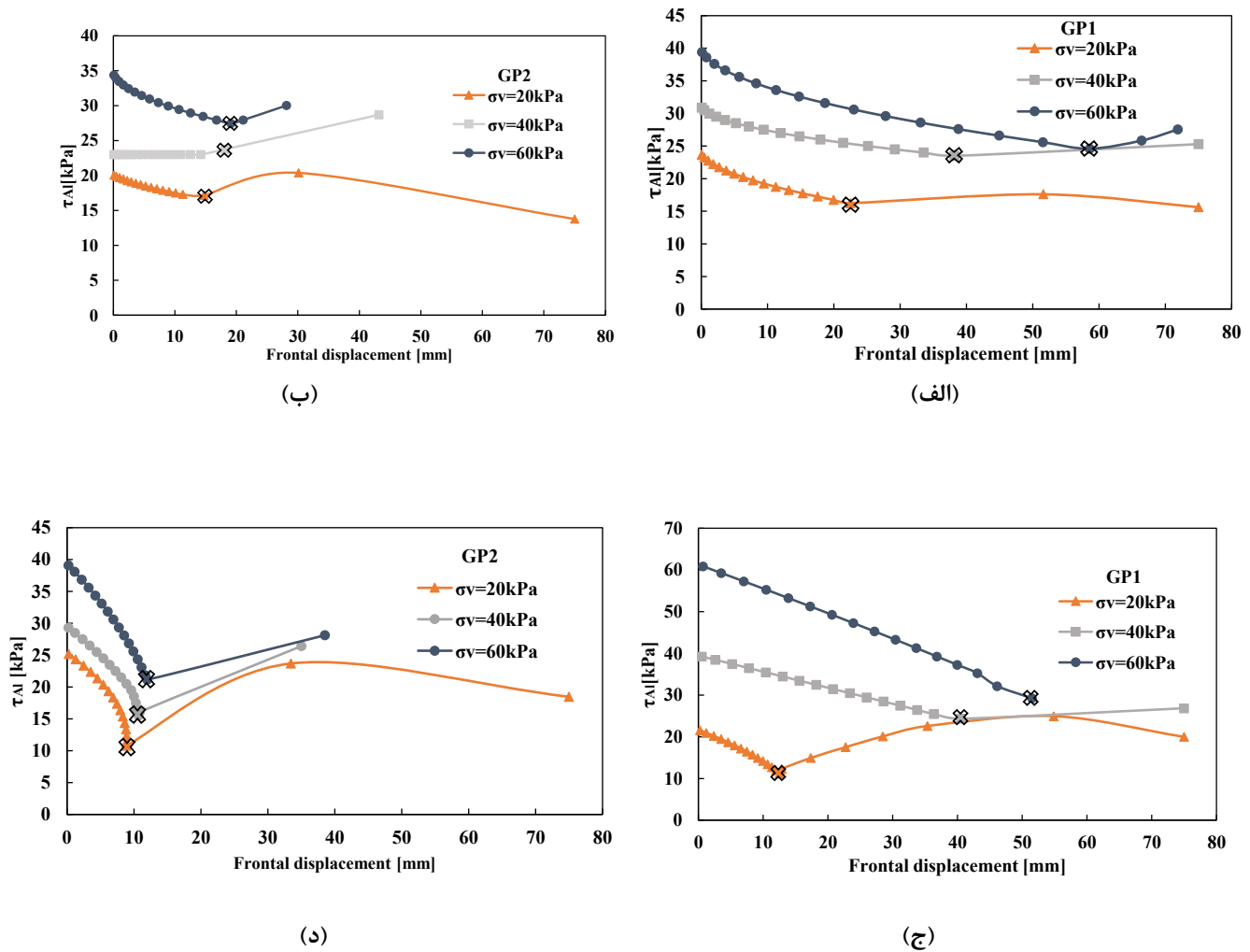
$\epsilon_{pAI}(\%)$	$\epsilon_{tAI}(\%)$	σ_v (kPa)	نوع خاک	ژئوگرید
۶/۱۶	۳/۱۵	۲۰	ماسه خالص	GP1
۳/۳۳	۱/۶۹	۲۰	ماسه خالص	GP2
۹/۵۲	۵/۷۷	۴۰	ماسه خالص	GP1
۳/۰۳	۲/۳۴	۴۰	ماسه خالص	GP2
۹/۸۷	۹/۱۵	۶۰	ماسه خالص	GP1
۳/۰۳	۲/۸۷	۶۰	ماسه خالص	GP2
۱۰/۹۰	۱/۷۷	۲۰	ماسه با ۲۰٪ رس	GP1
۳/۲۸	۱/۱۶	۲۰	ماسه با ۲۰٪ رس	GP2
۱۰/۰۰	۵/۵۸	۴۰	ماسه با ۲۰٪ رس	GP1
۳/۸۱	۱/۱۶	۴۰	ماسه با ۲۰٪ رس	GP2
۰	۷/۱۵	۶۰	ماسه با ۲۰٪ رس	GP1
۵/۱۲	۱/۱۶	۶۰	ماسه با ۲۰٪ رس	GP2

ژئوگرید در هر دو نوع خاک می‌گردد. اما با شروع مرحله بیرون کشیدگی و بسیج شدن کل طول نمونه ژئوگرید، افزایش جابجایی جلویی ژئوگرید موجب افزایش تنش برشی موثر در نمونه‌های ژئوگرید در هر دو نوع خاک می‌شود. در مرحله بیرون کشیدگی به دلیل اینکه کل طول نمونه در برابر نیروی بیرون کشیدگی بسیج شده است، بنابراین افزایش طول موثر ژئوگرید فقط به دلیل کرنش طول کل نمونه ژئوگرید است، و چون نرخ افزایش طول موثر در برابر نرخ افزایش نیروی بیرون کشیدگی کمتر است، این موضوع افزایش تنش برشی موثر را در پی خواهد داشت. برای آزمایش‌های بیرون کشیدگی انجام شده در تنش موثر قائم ۲۰ کیلوپاسکال، تنش برشی موثر در مرحله بیرون کشیدگی پس از رسیدن به نقطه اوج مجدداً کاهش پیدا می‌کند. این مسئله بخاطر رفتار نرم‌شوندگی کرنشی نمونه‌های ژئوگرید در هر دو نوع خاک در تنش قائم موثر ۲۰ کیلوپاسکال است که پس از رسیدن نیروی بیرون کشیدگی به مقدار بیشینه، با افزایش بیشتر جابجایی جلویی نیروی بیرون کشیدگی کاهش پیدا می‌کند. در حالی که در تنش‌های قائم موثر ۴۰ و ۶۰ کیلوپاسکال به دلیل رفتار سخت‌شوندگی کرنشی، تنش برشی موثر در مرحله بیرون کشیدگی به طور مداوم افزایش می‌یابد. در خاک ماسه‌ای، تنش برشی موثر سطح تماس ژئوگرید GP۱ در جابجایی‌های جلویی کوچک،

به ژئوگرید قرار گرفته در خاک ماسه‌ای از مرحله انتقال نیرو وارد مرحله بیرون کشیدگی می‌گردد. با مقایسه داده‌های جدول، می‌توان اظهار کرد که تاثیر سختی ژئوگرید در میزان کاهش کرنش‌های ϵ_{tAI} و ϵ_{pAI} نسبت به تاثیر افزایش تراکم خاک به مراتب بیشتر است.

۵-۴- تنش برشی موثر

شکل ۹ توزیع تنش برشی موثر، τ_{AL} ، را با افزایش جابجایی جلویی نمونه ژئوگرید GP۱ و GP۲ در دو خاک ماسه و ماسه رس‌دار و در سه تنش قائم موثر مختلف نشان می‌دهد. مطابق انتظار با افزایش تنش قائم موثر در هر دو نوع ژئوگرید و هر دو نوع خاک تنش برشی موثر نیز افزایش پیدا کرد. در مرحله انتقال نیرو، با افزایش جابجایی جلویی ژئوگرید و افزایش طول موثر ژئوگرید، علی‌رغم افزایش تنش مقاوم در جلوی نوارهای عرضی و تنش مماسی در سطح تماس ژئوگرید و خاک، تنش برشی موثر کاهش پیدا کرد. در این مرحله با افزایش جابجایی جلویی، هم طول موثر و هم نیروی بیرون کشیدگی متناظر با آن، افزایش پیدا می‌کنند، اما با توجه به اینکه نرخ افزایش طول موثر در برابر نرخ افزایش نیروی بیرون کشیدگی متناظر با آن بیشتر است، این مسئله موجب کاهش تنش برشی موثر در نمونه‌های

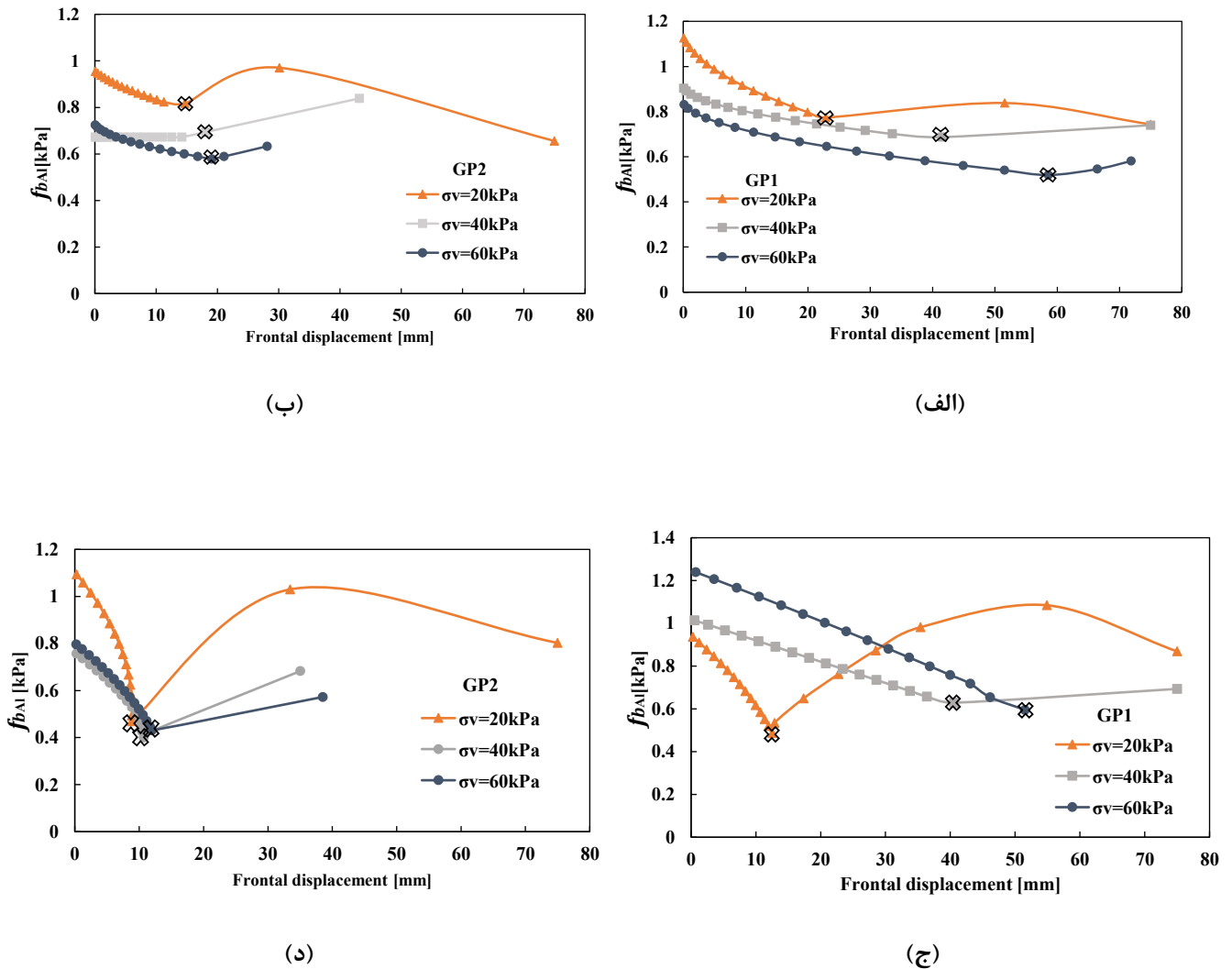


شکل ۹. تغییرات تنش برشی موثر در برابر جابجایی جلویی به ازای مقادیر مختلف تنش قائم موثر در الف) ژئوگرید GP۱ مدفون در ماسه ب) ژئوگرید GP۲ مدفون در ماسه رس دار ج) ژئوگرید GP۱ مدفون در ماسه رس دار د) ژئوگرید GP۲ مدفون در ماسه رس دار

Fig. 9. The variation of active shear stress versus frontal displacement under different vertical effective stresses for a) GP1 embedded in sand b) GP2 embedded in sand c) GP1 embedded in clayey sand d) GP2 embedded in clayey sand

ژئوگرید GP۱ چه در جابجایی‌های جلویی کوچک و چه در نقطه تبدیل مرحله انتقال نیرو به مرحله بیرون کشیدگی، نسبت به تنش برشی موثر سطح تماس ژئوگرید GP۲ بیشتر است، اما در تنش قائم موثر ۲۰ کیلوپاسکال این تفاوت ناچیز است. کاردیل و همکاران (۲۰۱۶) نیز نشان دادند در طی مرحله انتقال بار، تنش برشی موثر بین خاک ماسه‌ای متراکم و ژئوگرید HDPE با افزایش جابجایی جلویی نمونه ژئوگرید کاهش می‌یابد و با شروع مرحله بیرون کشیدگی مجدداً افزایش پیدا می‌کند [۱۴].

نسبت به تنش برشی موثر سطح تماس ژئوگرید GP۲ در همه تنش‌های قائم موثر بزرگ‌تر بوده و با افزایش جابجایی جلویی تنش برشی موثر کاهش می‌یابد. در نقطه تبدیل مرحله انتقال نیرو به مرحله بیرون کشیدگی تنش‌های برشی موثر به ازای تمامی تنش‌های قائم موثر، تقریباً یکسان هستند، با این تفاوت که تنش برشی موثر در ژئوگرید GP۲ به دلیل سختی بیشتر، زودتر از ژئوگرید GP۱ به این نقطه می‌رسد. در خاک ماسه رس دار و در تنش‌های قائم موثر ۴۰ و ۶۰ کیلوپاسکال تنش برشی موثر سطح تماس



شکل ۱۰. تغییرات ضریب اندرکنش بیرون کشش موثر در برابر جابجایی جلویی به ازای مقادیر مختلف تنش موثر قائم در الف) ژئوگرید GP۱ مدفون در ماسه ب) ژئوگرید GP۲ مدفون در ماسه رس دار ج) ژئوگرید GP۱ مدفون در ماسه رس دار د) ژئوگرید GP۲ مدفون در ماسه رس دار

Fig. 10. The variation of active pullout interaction coefficient versus frontal displacement under different vertical effective stresses for a) GP1 embedded in sand b) GP2 embedded in sand c) GP1 embedded in clayey sand d) GP2 embedded in clayey sand

۵-۵- ضریب اندرکنش موثر

انجام گرفته بر روی دو نوع ژئوگرید مدفون در دو نوع خاک، کمترین مقدار ضریب اندرکنش بیرون کشیدگی موثر در هر تنش قائم موثر، در نقطه تبدیل مرحله انتقال نیرو به مرحله بیرون کشیدگی (لحظه آغاز حرکت آخرین نوار عرضی ژئوگرید) است. ضریب اندرکنش بیرون کشیدگی موثر نهایی (در انتهای آزمایش) در ژئوگرید GP۱ مدفون در خاک ماسه‌ای و ماسه رس دار و ژئوگرید GP۲ مدفون در خاک ماسه رس دار با افزایش تنش قائم موثر کاهش می‌یابد. در ژئوگرید GP۲ و در تنش قائم موثر ۲۰ کیلوپاسکال،

تغییرات ضریب اندرکنش بیرون کشیدگی موثر در برابر جابجایی جلویی نمونه ژئوگرید GP۱ و GP۲ مدفون در خاک ماسه‌ای و خاک ماسه رس دار تحت اثر تنش‌های قائم موثر مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مشابه روند تغییرات تنش برشی موثر، ضریب اندرکنش موثر در جابجایی‌های جلویی کوچک مقدار بزرگ‌تری بوده و با افزایش جابجایی جلویی و تارسیدن به مرحله بیرون کشیدگی از مقدار آن کاسته می‌شود. در تمامی آزمایش‌های

به دلیل سختی بالاتر، ژئوگرید به ازای جابجایی جلویی کوچک‌تری به مقاومت بیرون‌کشیدگی بیشینه می‌رسد و در نتیجه کاهش قابل توجه نیروی بیرون‌کشیدگی نهایی نسبت به نیروی بیرون‌کشیدگی بیشینه موجب افت ضریب اندرکنش موثر نهایی می‌گردد. مطالعات قبلی در زمینه محاسبه ضریب اندرکنش بیرون‌کشیدگی بین خاک و ژئوسینتتیک، یک عدد ثابت را برای این ضریب در کل آزمایش بیرون‌کشیدگی در نظر گرفتند [۳۱ و ۳۰ و ۱۳]. حال آنکه مطالعه کنونی نشان می‌دهد که مقدار ضریب اندرکنش بیرون‌کشیدگی با افزایش جابجایی جلویی نمونه ژئوگرید تغییر می‌کند و در نظر گرفتن یک عدد ثابت برای آن می‌تواند منجر به طراحی‌های بعضاً محافظه‌کارانه و غیراقتصادی یا مخاطره‌آمیز گردد.

۶- نتیجه‌گیری

برای درک رفتار واقعی‌تر اندرکنش خاک و ژئوگرید و طراحی‌های صحیح‌تر در آزمایش بیرون‌کشیدگی، تعیین طول موثر بسیار حائز اهمیت است. از سوی دیگر، سازه‌های خاک مسلح ممکن است در محلی که خاک آن حاوی مقداری ریزدانه باشد، احداث گردد. به این منظور، با انجام یک سری آزمایش بیرون‌کشیدگی بزرگ مقیاس، به مقایسه اندرکنش سطح تماس دو نوع ژئوگرید PET با مقاومت طولی نهایی متفاوت و ساختار هندسی یکسان تحت عنوان تجاری GP1 (GPGRID80/30) و GP2 (GPGRID110/30) مدفون در خاک ماسه‌ای و خاک ماسه رس‌دار بر مبنای طول موثر پرداخته شد. هر چند در این تحقیق با توجه به محدودیت‌های موجود، به مقایسه ضریب اندرکنش سطح تماس خاک ماسه‌ای و و ماسه رس‌دار پرداخته شد، اما در مطالعات آتی می‌توان رفتار بیرون‌کشیدگی انواع مختلف ژئوگرید مدفون در انواع خاک‌های دیگر از جمله ماسه لای‌دار، شن حاوی ریزدانه و ... بر مبنای طول موثر مورد بحث و بررسی قرار گیرد. نتایج تحقیق حاضر به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

- ۱- مقدار نیروی بیرون‌کشیدگی جهت شروع حرکت آخرین نوار عرضی ژئوگرید با افزایش تنش قائم موثر در هر دو نمونه ژئوگرید و هر دو نمونه خاک افزایش پیدا می‌کند. در نمونه خاک ماسه‌ای افزایش سختی ژئوگرید تاثیر چندان زیادی بر روی نیروی بیرون‌کشیدگی مورد نیاز جهت شروع حرکت آخرین نوار عرضی ژئوگرید ندارد، حال آن که در خاک ماسه رس‌دار و در تنش قائم موثر ۴۰ و ۶۰ کیلوپاسکال کاهش سختی موجب افزایش نیروی بیرون‌کشیدگی متناظر با فعال شدن طول کل ژئوگرید می‌گردد.
- ۲- کرنش موثر در هر دو مرحله انتقال نیرو و بیرون‌کشیدگی در ژئوگرید

GP۲ نسبت به ژئوگرید GP۱ به دلیل سختی زیادتر، کمتر است. علاوه بر این، ژئوگرید مدفون در خاک ماسه رس‌دار به دلیل تراکم بالاتر در سطح تماس خاک با ژئوگرید، مقادیر کرنش‌های موثر کمتری نسبت به ژئوگریدهای مدفون در خاک ماسه خالص در هر دو مرحله انتقال نیرو و بیرون‌کشیدگی دارند.

۳- در خاک ماسه‌ای، تنش برشی موثر ژئوگرید GP۱، در جابجایی‌های جلویی کوچک نسبت به تنش برشی موثر سطح تماس ژئوگرید GP۲ در همه تنش‌های قائم موثر بزرگ‌تر است. با افزایش جابجایی جلویی تنش برشی موثر کاهش یافته و در نقطه تبدیل مرحله انتقال نیرو به مرحله بیرون‌کشیدگی، تنش‌های برشی موثر در تمامی تنش‌های موثر تقریباً یکسان هستند، با این تفاوت که مقدار تنش برشی موثر در ژئوگرید GP۲ به دلیل سختی بیشتر، زودتر به این نقطه می‌رسد. در خاک ماسه رس‌دار و در تنش‌های قائم موثر ۴۰ و ۶۰ کیلوپاسکال تنش برشی موثر سطح تماس ژئوگرید GP۱، چه در جابجایی‌های جلویی کوچک و چه در نقطه تبدیل مرحله انتقال نیرو به مرحله بیرون‌کشیدگی، نسبت به ژئوگرید GP۲ بیشتر است، اما در تنش قائم موثر ۲۰ کیلوپاسکال این تفاوت ناچیز است.

۴- در تمامی آزمایش‌های انجام گرفته بر روی دو نوع ژئوگرید مدفون در دو نوع خاک، کمترین مقدار ضریب اندرکنش بیرون‌کشیدگی موثر، در نقطه تبدیل مرحله انتقال نیرو به مرحله بیرون‌کشیدگی (لحظه آغاز حرکت آخرین نوار عرضی ژئوگرید) است.

۵- نتایج نشان داد که با افزایش سختی ژئوگرید و تراکم خاک، نیروی بیرون‌کشیدگی بیشینه به ازای جابجایی جلویی کمتری بسیج می‌گردد که این مسئله در مواردی که در ساخت سازه‌های خاک مسلح با محدودیت‌های جابجایی مواجه هستیم، می‌تواند پراهمیت باشد.

تشکر و قدردانی

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

منابع

- [1] E.M. Palmeira, Soil-geosynthetic interaction: Modelling and analysis, Geotextiles and Geomembranes, 27(5) (2009) 368-390.
- [2] C.S. Vieira, F.B. Ferreira, P.M. Pereira, M. de Lurdes Lopes, Pullout behaviour of geosynthetics in a recycled

- [12] F.M. Ezzein, R.J. Bathurst, A new approach to evaluate soil-geosynthetic interaction using a novel pullout test apparatus and transparent granular soil, *Geotextiles and Geomembranes*, 42(3) (2014) 246-255.
- [13] F. Ferreira, C. Vieira, M. Lopes, D. Carlos, Experimental investigation on the pullout behaviour of geosynthetics embedded in a granite residual soil, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(9) (2016) 1147-1180.
- [14] G. Cardile, N. Moraci, L. Calvarano, Geogrid pullout behaviour according to the experimental evaluation of the active length, *Geosynthetics International*, 23(3) (2016) 194-205.
- [15] N. Moraci, P. Recalcati, Factors affecting the pullout behaviour of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil, *Geotextiles and Geomembranes*, 24(4) (2006) 220-242.
- [16] M. Abdi, H. Mirzaeifar, Experimental and PIV evaluation of grain size and distribution on soil-geogrid interactions in pullout test, *Soils and foundations*, 57(6) (2017) 1045-1058.
- [17] S. Razzazan, A. Keshavarz, M. Mosallanezhad, Pullout behavior of polymeric strip in compacted dry granular soil under cyclic tensile load conditions, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(5) (2018) 968-976.
- [18] G. Cardile, M. Pisano, N. Moraci, The influence of a cyclic loading history on soil-geogrid interaction under pullout condition, *Geotextiles and Geomembranes*, 47(4) (2019) 552-565.
- [19] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). *Standard Specifications for Highway Bridges*, seventeenth ed.. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA, (2002).
- [20] D. Esmaili, K. Hatami, G.A. Miller, Influence of matric suction on geotextile reinforcement-marginal soil interface strength, *Geotextiles and Geomembranes*, 42(2) (2014) 139-153.
- [21] C.N. Khoury, G.A. Miller, K. Hatami, Unsaturated soil-geotextile interface behavior, *Geotextiles and construction and demolition material-Effects of cyclic loading*, *Transportation Geotechnics*, (2020) 100346.
- [3] A. Nayeri, K. Fakharian, Study on pullout behavior of uniaxial HDPE geogrids under monotonic and cyclic loads, *International Journal of Civil Engineering*, 7(4) (2009) 211-223.
- [4] J. Zhou, J.-F. Chen, J.-F. Xue, J.-Q. Wang, Micro-mechanism of the interaction between sand and geogrid transverse ribs, *Geosynthetics International*, 19(6) (2012) 426-437.
- [5] N. Moraci, G. Cardile, D. Gioffrè, M.C. Mandaglio, L.S. Calvarano, L. Carbone, Soil geosynthetic interaction: design parameters from experimental and theoretical analysis, *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 1(2) (2014) 165-227.
- [6] L. Calvarano, D. Gioffrè, G. Cardile, N. Moraci, A stress transfer model to predict the pullout resistance of extruded geogrids embedded in compacted granular soils, in: *Proceedings of the 10th International Conference on Geosynthetics, ICG, 2014*, pp. 8.
- [7] S.M. Rahmaninezhad, J. Han, J.I. Kakrasul, M. Weldu, Stress distributions and pullout responses of extensible and inextensible reinforcement in soil using different normal loading methods, *Geotechnical Testing Journal*, 42(6) (2019) 1606-1623.
- [8] F. Ferreira, C. Vieira, M. Lopes, P. Ferreira, HDPE geogrid-residual soil interaction under monotonic and cyclic pullout loading, *Geosynthetics International*, 27(1) (2020) 79-96.
- [9] N. Moraci, D. Gioffrè, A simple method to evaluate the pullout resistance of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil, *Geotextiles and Geomembranes*, 24(2) (2006) 116-128.
- [10] Palmeira, E.M.: Soil-geosynthetic interaction: modelling and analysis. *Geotext. Geomembr.* 27, 368-390 (2009).
- [11] G. Cardile, D. Gioffrè, N. Moraci, L. Calvarano, Modelling interference between the geogrid bearing members under pullout loading conditions, *Geotextiles and Geomembranes*, 45(3) (2017) 169-177.

- [27] ASTM D3080 / D3080M-11, Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- [28] ASTM D6706-01, Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2013).
- [29] A. Mahigir, A. Ardakani, M. Hassanlourad, 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(1) (2021) 1-15.
- [30] C.-W. Hsieh, G.-H. Chen, J.-H. Wu, The shear behavior obtained from the direct shear and pullout tests for different poor graded soil-geosynthetic systems, Journal of GeoEngineering, 6(1) (2011) 15-26.
- [31] X. Tang, G.R. Chehab, A. Palomino, Evaluation of geogrids for stabilising weak pavement subgrade, International Journal of Pavement Engineering, 9(6) (2008) 413-429.
- Geomembranes, 29(1) (2011) 17-28.
- [22] NCMA, Design Manual for Segmental Retaining Walls, second ed. National Concrete Masonry Association, Herndon, VA, USA, (2002).
- [23] V. Elias, B.R. Christopher, R.R. Berg, Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes-design and Construction Guidelines. FHWA-NHI-00-043, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA, (2001).
- [24] ASTM D6913 / D6913M-17, Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [25] ASTM D422-63(2007)e2, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (Withdrawn 2016), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.
- [26] 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.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Mahigir, A. R. Ardakani, M. Hassanlourad, Comparison between the Interface Interaction of Sand and Clayey Sand with PET Geogrid in Pullout Test Based on Active Length, Amirkabir J. Civil Eng., 54(1) (2022) 95-112.

DOI: [10.22060/ceej.2021.18191.6800](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.18191.6800)

