

ارزیابی تأثیر اندازه‌ی ذرات در ضخامت باند برشی در آزمایش بیرون کشش ژئوگرید

محمودرضا عبیدی* (دانشیار)

حامد میرزایی فر (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی عمران شریف، (تابش ۱۳۹۷)
دوری ۲ - ۳۴، شماره‌ی ۲/۳، ص. ۳۹-۲۶

اندرکنش ژئوستتیک - خاک با وجود پژوهش‌های گسترده‌ی انجام شده به دلیل پیچیدگی مکانیزم‌ها هنوز کاملاً مشخص نیست. در پژوهش حاضر، با انجام آزمایش بیرون کشش با ابعاد $60 \times 60 \times 100$ سانتی‌متر، تأثیر دانه‌بندی و اندازه‌ی ذرات در ضخامت باند برشی در نمونه‌های ماسه‌یی و شنی مسلح شده با ژئوگرید HDPE مطالعه شده است. بدین منظور در یک وجه جعبه‌ی بیرون کشش از پلکسی‌گلاس جهت امکان عکس‌برداری حین بارگذاری استفاده شده است. در هر مرحله از بارگذاری، از توده‌ی تغییرشکل یافته‌ی خاک در برگرفته‌ی ژئوگرید، عکس‌های دیجیتال تهیه و تصاویری جهت بررسی نحوه‌ی جابه‌جایی ذرات پردازش شده است. آزمایش‌ها تحت سربارهای ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال انجام شده‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که جابه‌جایی دانه‌ها در اطراف المان‌های عرضی ژئوگرید چرخشی بوده و با افزایش اندازه‌ی ذرات، ضخامت باند برشی افزایش یافته است. همچنین در خاک در مجاورت سطوح فوقانی و تحتانی ژئوگرید گسترش یافته و مقاومت بخش بیشتری از خاک را بسیج کرده است.

abdi@kntu.ac.ir
h.mirzaeifar@dena.kntu.ac.ir

واژگان کلیدی: بیرون کشش، برش مستقیم، باند برشی، ژئوگرید، PIV.

۱. مقدمه

اعمال نیروی بیرون کشش از سمت راست به چپ بوده است. ذرات واقع در قسمت بالا و سمت راست المان‌های عرضی به درون حفره‌های ایجادشده در حین بیرون کشش سقوط می‌کنند. تحلیل میکروتصویر، مشاهده‌های ماکروسکوپیک را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که خاک موجود در جلوی المان‌های عرضی در حالت فشار مقاوم و در پشت آن‌ها در شرایط فشار محرک قرار می‌گیرند که باعث ایجاد ناحیه با خاک سست می‌شود.^[۷] بسته به شرایط مرزی مختلف، ذرات ماسه حرکات متقارنی در طول سطح تماس خاک - ژئوستتیک‌ها نشان نمی‌دهند.^[۳] برخی پژوهشگران نیز تغییرمکان کامل مسلح‌کننده و نقاط مشخص در خاک اطراف در حین آزمایش بیرون کشش را با استفاده از تکنولوژی‌های نوین (خاک دانه‌یی شفاف و شیوه‌ی پردازش تصاویر DIC/PIV) بررسی کردند. تکنولوژی‌های مذکور جهت تحلیل تغییرمکان افقی بین ژئوگریدها و خاک اطراف مفید هستند.^[۹] در بررسی رفتارخاک‌های ماسه‌یی مسلح و غیرمسلح زیر پی نواری به کمک روش PIV، کارایی بهتر ژئوگرید نسبت به ژئوتکستایل در خاک‌های ماسه‌یی نشان داده شد.^[۱۰] از آنجایی که نحوه‌ی عملکرد المان‌های عرضی ژئوگرید در تأمین مقاومت مقاوم اهمیت ویژه‌ی دارد، بیشتر مطالعات انجام شده در زمینه‌ی مذکور، بر اندرکنش ماکرو بین ژئوگرید و خاک متمرکز بوده است. عوامل مؤثر در اندرکنش را می‌توان به دو گروه طبقه‌بندی کرد: گروه اول، شامل: اندازه‌ی ذرات خاک، شکل، تغییرمکان نسبی، چرخش و شکست؛ و گروه دوم به شرایط مرزی، زبری سطح و سطح تنش وابسته

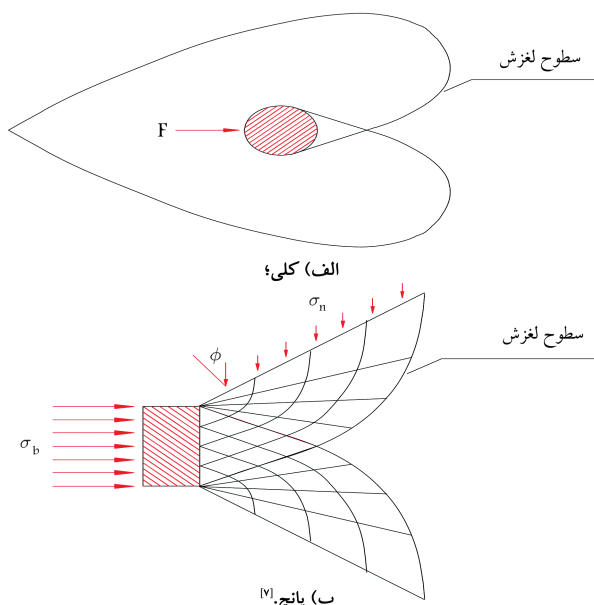
جهت تحلیل رفتار سازه‌های خاک مسلح، درک صحیح اندرکنش خاک - ژئوستتیک‌ها تحت شرایط برش مستقیم و بیرون کشش، اهمیت بسیاری دارد. دستگاه بیرون کشش^۱ بزرگ‌مقیاس، امکان مطالعه‌ی اندرکنش خاک - ژئوستتیک‌ها در سطح تماس و تعیین پارامترهای موردنیاز جهت طراحی سازه‌های خاک مسلح را فراهم می‌سازد. مقاومت در برابر بیرون کشیده شدن ناشی از اصطکاک در سطح تماس خاک - ژئوگرید، مقاومت برشی خاک - خاک در چشمه‌های ژئوگرید و همچنین مقاومت مقاوم خاک در جلوی المان‌های عرضی ژئوگرید است.^[۶-۷] براساس نتایج پژوهش‌های انجام شده، سهم المان‌های عرضی ژئوگریدها در تأمین مقاومت در برابر بیرون کشش ۷۵ تا ۹۰ درصد گزارش شده است.^[۶-۴]

در سال‌های اخیر، اندرکنش در سطح تماس خاک - ژئوستتیک‌ها با استفاده از روش تحلیل میکروتصویر توسط برخی پژوهشگران مطالعه شده است.^[۶-۷] بررسی اندرکنش المان‌های عرضی ژئوگرید و ماسه نشان داده است که ذرات ماسه در حین بارگذاری حول المان‌های عرضی می‌چرخند و ذرات در بالای مسلح‌کننده حول محور تقارن در جهت عقربه‌های ساعت و ذرات در زیر محور تقارن در جهت خلاف عقربه‌های ساعت می‌چرخند.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۳/۲۲، اصلاحیه ۱۳۹۵/۹/۱۳، پذیرش ۱۳۹۵/۱۰/۴.

DOI: 10.24200/J30.2018.1397



شکل ۲. گسیختگی برشی.

که در آن، ϕ' زاویه‌ی اصطکاک داخلی مؤثر خاک است. در سال ۲۰۱۲، رابطه‌ی اصلاح‌شده‌ی ۵ جهت حالت گسیختگی پانچ ارائه شده است: [۷]

$$\sigma'_b = e^{\pi \tan \phi'} \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2}\right) \frac{1}{\cos \phi'} \sigma'_n \quad (5)$$

۳. روش‌های پردازش تصویر

روش‌های پردازش تصویر (PIV)، ابزاری مؤثر جهت اندازه‌گیری میکروسکوپی تغییرشکل مصالح هستند. به کارگیری روش‌های مذکور در سال‌های اخیر در زمینه‌ی ژئوتکنیک رشد چشمگیری داشته‌اند. [۱۱-۱۳] بزرگ‌ترین مزیت روش‌های پردازش تصویر، توانایی اندازه‌گیری تغییرمکان چند نقطه به‌طور هم‌زمان و بدون دست‌خوردگی نمونه است.

۴. مطالعات آزمایشگاهی

۱.۴. دستگاه بیرون‌کشیدگی

جعبه‌ی دستگاه بیرون‌کشش مورد استفاده در پژوهش حاضر به طول ۱۰۰، ارتفاع ۶۰ و عرض ۶۰ سانتی‌متر بوده است. بدنه‌ی جعبه از ورق‌های فولادی به ضخامت ۱۵ میلی‌متر ساخته شده است. به منظور بارگذاری در آزمایش‌ها از یک جک بادی با قابلیت بارگذاری یک‌نواخت به ظرفیت ۶۰ کیلو نیوتن و طول سیلندر ۱۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. نیروی بیرون‌کشش در شرایط کنترل تغییرمکان و با نرخ ۱ میلی‌متر بر دقیقه اعمال شده است. نیروی حاصل توسط نیروسنج که در فاصله‌ی جک و نمونه قرار گرفته است، به سیستم فرمان منتقل و در آنجا قرائت می‌شود. محور سیلندر جک، نیروسنج و مسلح‌کننده در یک امتداد قرار می‌گیرند تا از هرگونه چرخش و دوران نمونه حین آزمایش و تأثیر ناخواسته در نتایج آن جلوگیری شود. تغییرمکان افقی ژئوگرید حین آزمایش در محل نقطه‌ی اتصال به گیره‌ی جلو و ۳ نقطه‌ی دیگر در بخش مدفون آن، توسط ۴ عدد تغییرمکان‌سنج (LVDT) از نوع میله‌یی با

هستند. بنابراین بررسی میکروسکوپی اندرکنش در سطح تماس خاک - ژئوگریدها به منظور شفاف‌سازی مکانیزم بسیار پراهمیت است. به منظور بررسی چگونگی گسترش تغییرشکل‌های ایجاد شده و همچنین توزیع کرنش در اطراف ژئوگرید، تعدادی آزمایش بیرون‌کشش برنامه‌ریزی انجام و تأثیر اندازه‌ی ذرات در ضخامت باند برشی ایجاد شده در خاک توسط روش PIV بررسی شد. اندازه‌گیری ضخامت باند برشی در درک صحیح تغییرشکل‌ها و مکانیزم جابه‌جایی مصالح دانه‌یی در حین برش حائز اهمیت است. باندهای برشی مصالح دانه‌یی قابل مشاهده بود و تعیین ضخامت آن‌ها نسبت به قطر ذرات بسیار مفید و جهت کالیبره‌کردن مدل‌های تئوریک قابل استفاده است.

۲. تئوری اندرکنش خاک - ژئوگرید

نیروی بیرون‌کشش مقاوم ژئوگرید از طریق رابطه‌ی ۱ بیان می‌شود:

$$P_r = P_{rs} + P_{rb} \quad (1)$$

که در آن، P_{rs} مؤلفه‌ی نیروی اصطکاکی و P_{rb} مؤلفه‌ی نیروی مقاوم هستند. مؤلفه‌ی نیروی اصطکاکی از رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود.

$$P_{rs} = 2\alpha_s L_r W_r \sigma'_n \tan \delta \quad (2)$$

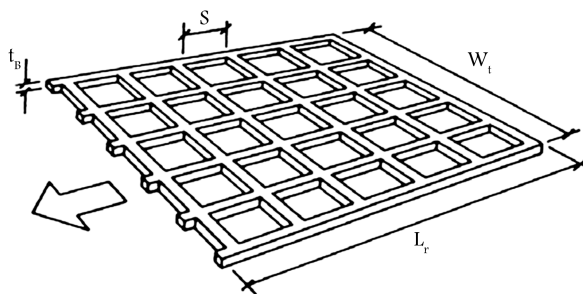
که در آن، δ اندرکنش مابین خاک و ژئوگرید و α_s بخشی از سطح ژئوگرید است که سبب نیروی اصطکاکی می‌شود. L_r طول و W_r عرض ژئوگرید هستند (شکل ۱). مؤلفه‌ی نیروی مقاوم بیرون‌کشش به‌صورت رابطه‌ی ۳ است:

$$P_{rb} = \alpha_b \left(\frac{L_r}{S}\right) W_r t_B \sigma'_b \quad (3)$$

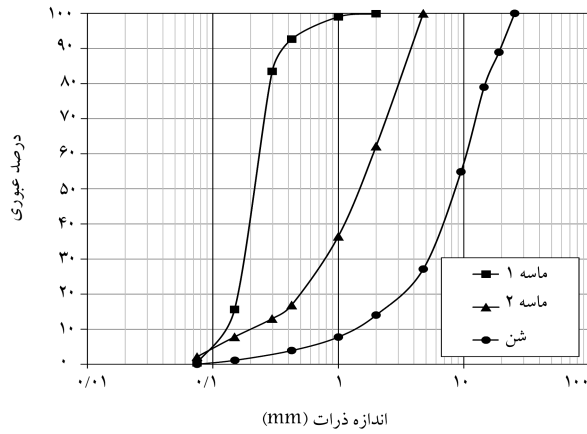
که در آن، σ'_b بخش مؤثر در باربری سطح جلویی ژئوگرید، S فاصله‌ی بین المان‌های ژئوگرید، L_r/S تعداد اعضاء عرضی، t_B ضخامت المان‌ها و σ'_b تنش مؤثر باربری در اعضاء باربر هستند. تنش مؤثر باربری متأثر از حالت گسیختگی است. براساس اندازه‌ی ذرات خاک در حالت بیرون‌کشش، یکی از دو نوع گسیختگی برشی کلی و یا گسیختگی برشی پانچ رخ می‌دهد (شکل ۲).

رابطه‌ی ۴ براساس مکانیزم پانچ ارائه شده است: [۷]

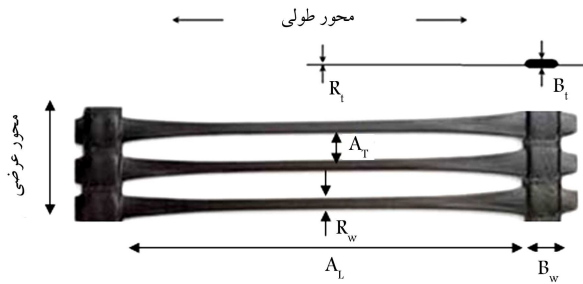
$$\sigma'_b = e^{\pi \tan \phi'} \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2}\right) \times \left[\cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi'}{2}\right) + (1 - \sin \phi') \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi'}{2}\right)\right] \sigma'_n \quad (4)$$



شکل ۱. ابعاد ژئوگرید.



شکل ۴. توزیع دانه بندی خاک‌ها.



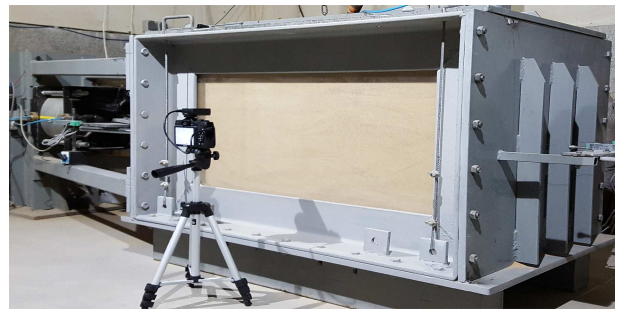
شکل ۵. ژئوگرید ۹۰ TT.

جدول ۲. مشخصات ژئوگرید مصرفی [۱۴].

مقدار	مشخصات هندسی / فیزیکی
۲۰۰ mm	طول بازشدگی (A_L)
۱۵ mm	عرض بازشدگی (A_T)
۵٫۵ mm	ضخامت اعضاء عرضی (B_i)
۱٫۷ mm	ضخامت اعضاء طولی (R_t)
۱۵ mm	طول اعضاء عرضی (B_w)
۱۳٪	کرنش در مقاومت کششی اسمی در جهت طولی
۲۶ (kN/m)	مقاومت در ۲٪ کرنش
۵۰ (kN/m)	مقاومت کششی در ۵٪ کرنش
۹۰ (kN/m)	مقاومت کششی نهایی در جهت طولی (T_{ult})

۵. آماده سازی نمونه ها و انجام آزمایش ها

ارتفاع خالص داخل جعبه بیرون کشش، ۶۰ سانتی متر است که ۸ سانتی متر بالای آن به بالشتک هوا جهت اعمال تنش های قائم مورد نظر اختصاص یافته است. خاک ها به صورت لایه - لایه و با ضخامت تقریبی ۸ الی ۱۰ سانتی متر در هر لایه ریخته و توسط کوبه تا رسیدن به درجه ای تراکم مورد نظر متراکم شده است. ابتدا قسمت تحتانی جعبه طی ۳ لایه ی تقریباً مساوی پر و متراکم شده و سپس ژئوگرید در محل مورد نظر قرار گرفته و به گیره ی دستگاه جهت اعمال نیروی بیرون کشش متصل شده است. به منظور اندازه گیری و کنترل تغییر مکان ها، یک تغییر مکان سنج (LVDT) به گیره ی جاویی دستگاه و ۳ عدد دیگر توسط سیم های مخصوص در امتداد طول ژئوگرید مطابق شکل ۶ متصل شده اند. سپس بخش فوقانی جعبه طبق



شکل ۳. جعبه ی دستگاه بیرون کشش همراه دوربین عکس برداری.

جدول ۱. خصوصیات خاک ها.

مشخصات	ماسه ی		شن
	۱	۲	
$\gamma_{d \min} (gr/cm^3)$	۱٫۳۷	۱٫۵۴	۱٫۵۳
$\gamma_{d \max} (gr/cm^3)$	۱٫۶۷	۱٫۸	۱٫۷۲
$D_r (\%)$	۷۰	۷۰	۷۰
$D_{10} (mm)$	۰٫۱۴	۰٫۲	۰٫۲۵
$D_{30} (mm)$	۰٫۱۸	۰٫۲۸	۰٫۴۲
$D_{50} (mm)$	۰٫۲۲	۰٫۳۵	۰٫۴۸
$D_{60} (mm)$	۰٫۲۴	۰٫۳۸	۰٫۶۱
C_u	۱٫۷۱	۹	۸٫۰۸
C_C	۰٫۹۶	۱٫۷۸	۲٫۱۴
طبقه بندی	SP	SW	GP
زاویه ی اصطکاک داخلی ($^\circ$)	۳۳	۴۰	۴۴

محدوده ی رفتار خطی ۱۰۰ میلی متر اندازه گیری و ثبت شده است. توسط بالشتک هوا در قسمت فوقانی جعبه ی فشار، سربار مورد نظر به طور یکنواخت به نمونه ها اعمال شده است. جهت مشاهده ی میزان تغییر شکل خاک در برگردنده ی ژئوگرید و عکس برداری از نمونه ها حین بارگذاری، یکی از دیواره های جعبه ی بیرون کشیدگی توسط پلکسی گلاس^۲ جایگزین شده است که در شکل ۳ مشاهده می شود. در حین آزمایش و مراحل مختلف بارگذاری از توده ی خاک در حال تغییر شکل با استفاده از دوربین دیجیتال با وضوح تصویری ۱۲/۱ مگاپیکسل عکس برداری و در حافظه ی داخلی آن ذخیره شده و سپس با استفاده از نرم افزار GEOPIVA، پردازش تصویری صورت گرفته است.

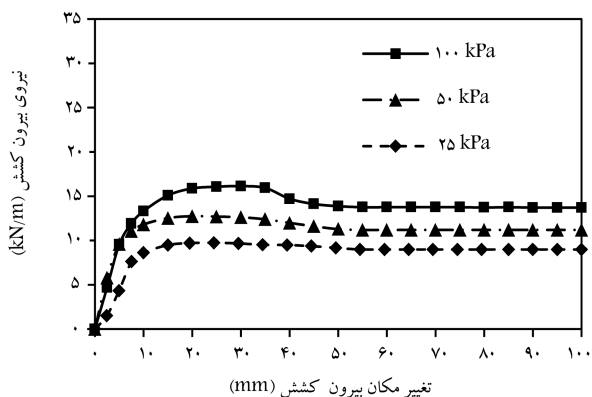
۲.۴. مصالح

۱.۲.۴. ماسه و شن

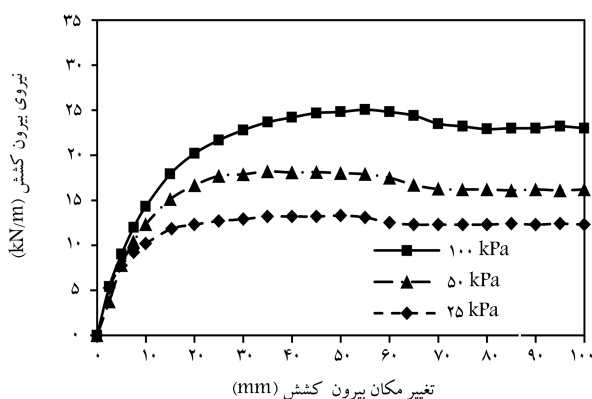
به منظور مطالعه ی اثر اندازه ی ذرات و دانه بندی خاک در برگردنده ی ژئوگرید در ضخامت باند برشی از دو خاک ماسه یی و یک خاک شنی با دانه بندی های نشان داده شده در شکل ۴ استفاده شده است. خلاصه ی خصوصیات خاک ها در جدول ۱ ارائه شده است.

۲.۲.۴. ژئوگرید

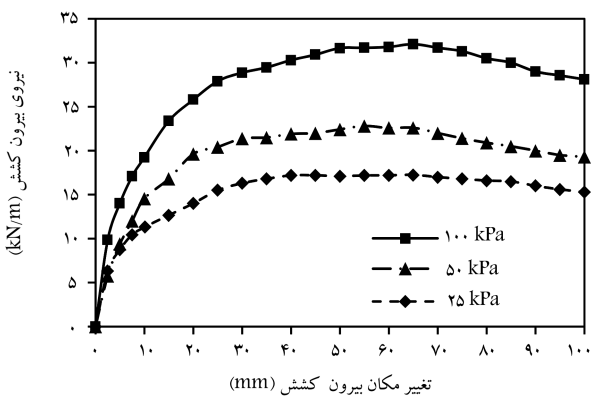
مسلح کننده ی مورد استفاده در پژوهش حاضر، ژئوگرید تک سوپه ی HDPE محصول شرکت Tenax تحت نام تجاری ۹۰ TT بوده است (شکل ۵) که مشخصات هندسی و مقابله ای آن در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۷. تغییرات نیروی بیرون کشش - تغییر مکان ماسه‌ی ۱.

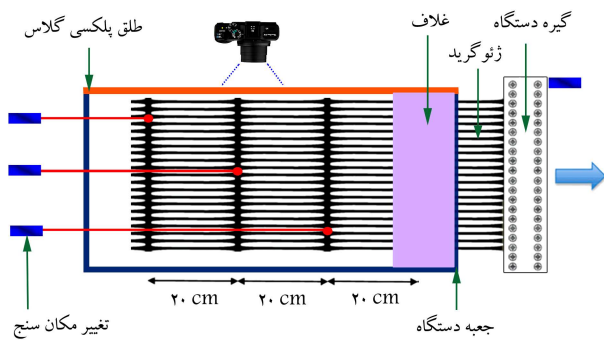


شکل ۸. تغییرات نیروی بیرون کشش - تغییر مکان ماسه‌ی ۲.



شکل ۹. تغییرات نیروی بیرون کشش - تغییر مکان شن.

نکته‌ی حائز اهمیت در خصوص نتایج به‌دست آمده آن است که تحت سربارهای مورد مطالعه، با افزایش قطر متوسط ذرات، بیشینه‌ی نیروهای بیرون کشش به طور قابل ملاحظه‌ی افزایش می‌یابند. به‌عنوان مثال، تحت سربار 100 kPa، بیشینه‌ی نیروهای بیرون کشش برای ماسه‌ی ۱، ماسه‌ی ۲ و شن به ترتیب ۱۶/۱، ۲۴/۶ و ۳۲/۱ (kN/m) به‌دست آمده است. ماسه‌ی ۲ و شن نسبت به ماسه‌ی ۱ با دانه‌بندی ریزتر و یکنواخت‌تر به ترتیب ۵۳ و ۱۰ درصد افزایش نشان می‌دهند که بیان‌گر تأثیر اندازه‌ی ذرات در اندرکنش خاک - ژئوگرید است. بیشینه‌ی نیروهای بیرون کشش اندازه‌گیری‌شده برای هر سه خاک در شکل ۱۰ ارائه شده است که بیان‌گر رابطه‌ی خطی بین این نیروها و فشارهای سربار است.



شکل ۶. موقعیت قرارگیری LVDTها.

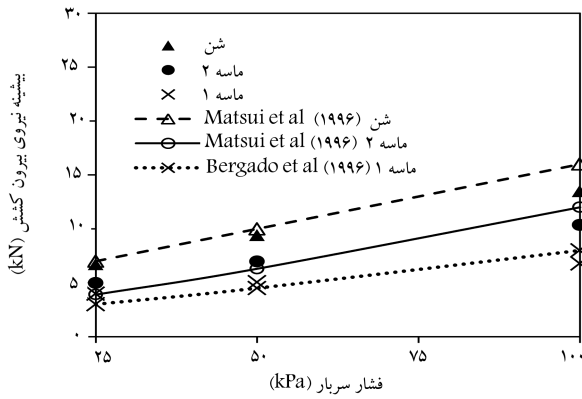
روش مذکور توسط خاک پر و متراکم شده است. پس از استقرار کیسه‌ی هوا و بستن درب دستگاه، توسط کمپرسور تنش‌های قائم ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ (kPa) به نمونه‌ها اعمال شده است. پس از تثبیت فشارهای وارده، بارگذاری بیرون کشش صورت پذیرفته است.

۶. نتایج

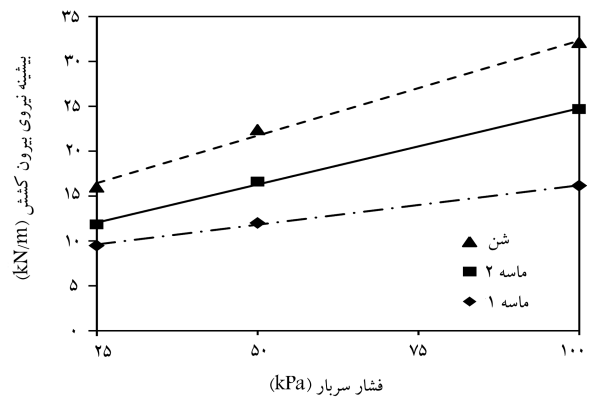
در بخش کنونی، نتایج آزمایش‌ها در دو زیربخش به صورت تغییرات نیروی بیرون کشش - تغییر مکان ژئوگرید و تحلیل‌های حاصل از روش PIV ارائه و تجزیه و تحلیل شده است.

۱.۶. نتایج بیرون کشش

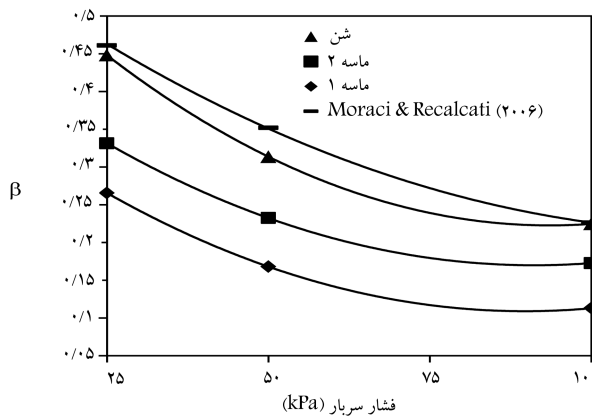
شکل‌های ۷ الی ۹، تغییرات نیروی بیرون کشش - تغییر مکان ژئوگرید را به ترتیب برای ماسه‌ی ۱، ماسه‌ی ۲ و شن تحت تنش‌های قائم ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ (kPa) نشان می‌دهند. در هر سه مورد مشاهده می‌شود که با افزایش تنش‌های قائم، نیروهای بیرون کشش و جابه‌جایی‌های متناظر با آن افزایش می‌یابند. نرخ افزایش نیروی بیرون کشش در مراحل ابتدایی آزمایش‌ها، نسبتاً شدید بوده است تا به مقاومت بیرون کشش نهایی نمونه برسد و با افزایش بیشتر تغییر مکان، نرخ تغییرات نیروهای بیرون کشش کاهش و نهایتاً ثابت شده است. این تغییرات در شکل‌های ۷ و ۸ برای ماسه‌های ۱ و ۲ به وضوح مشاهده می‌شود. در ماسه‌ی ۱ به دلیل ریزدانه‌تر بودن ذرات خاک، بیشینه‌ی نیروهای بیرون کشش در جابه‌جایی‌های کمتر حاصل و گسیختگی از نوع پانچ تشخیص داده شده است (شکل ۲ ب). در شکل ۹، نیروی بیرون کشش خصوصاً در سربار زیاد به حالت ثابت و پایدار نرسیده است که دلیل آن احتمالاً درشت‌تر بودن ذرات خاک شنی است. به عبارتی اگر امکان ادامه‌ی آزمایش با جابه‌جایی بیش از ۱۰ سانتی‌متر فراهم می‌بود، خاک به حالت مقاومت بیرون کشش ثابت و پایدار می‌رسید. نمونه‌های ماسه‌ی ۱ تحت سربارهای ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ (kPa) به ترتیب پس از ۲۰، ۳۰ و ۵۰ (mm) تغییر مکان ژئوگرید به شرایط ثابت و پایدار (شرایط نهایی) رسیده‌اند و با افزایش بیشتر تغییر مکان، نیروهای بیرون کشش افزایش نمی‌یابند. نمونه‌های ماسه‌ی ۲ تحت سربارهای ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ (kPa) به ترتیب پس از ۶۰، ۷۰ و ۸۰ (mm) تغییر مکان، به شرایط ثابت و پایدار رسیده است. در نمونه‌ی شن رسیدن به شرایط پایدار مستلزم جابه‌جایی‌های بیش از ۱۰ سانتی‌متر بوده است که با توجه به ساختار دستگاه، امکان اندازه‌گیری آن میسر نبوده است. معیار پایان آزمایش‌ها، پارگی ژئوگرید و یا رسیدن به تغییر مکان ۱۰ سانتی‌متر بوده است.



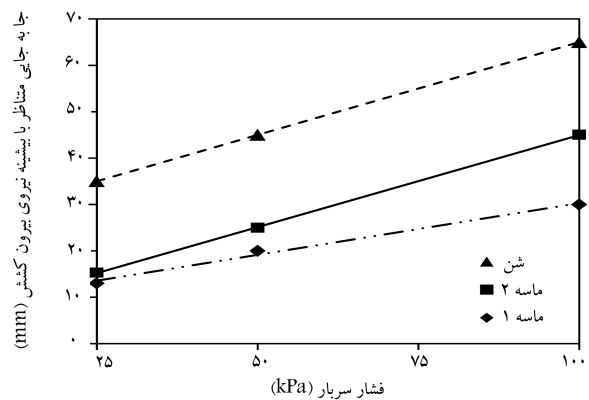
شکل ۱۲. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و روابط تحلیلی.



شکل ۱۰. تغییرات بیشینه‌ی نیروی بیرون کشش - فشار سربار.



شکل ۱۳. تغییرات پارامتر بتای بیرون کشش به سربار - فشار سربار.



شکل ۱۱. تغییرات جابه‌جایی متناظر با بیشینه‌ی نیروی بیرون کشش - فشار سربار.

یک ضریب ثابت در سربار ضرب می‌شود که سبب افزایش نتایج به صورت خطی است. روابط ذکر شده، اقتباسی از رابطه‌ی مقاومت برشی موهر-کلمب هستند. این در حالی است که عدم توزیع یکنواخت تنش‌های برشی در امتداد طول و در سطح تماس خاک - ژئوگرید (به دلیل خاصیت کشسان خمیری ژئوگرید) مانع از ثابت بودن نسبت نیروی بیرون کشش به سربار اعمالی می‌شود. این نسبت با ضریب β نشان داده شده است.

$$\beta = \frac{\text{حداکثر نیروی بیرون کشش (kN)}}{\text{سربار اعمالی} \times \text{سطح بارگیر (kN)}} \quad (6)$$

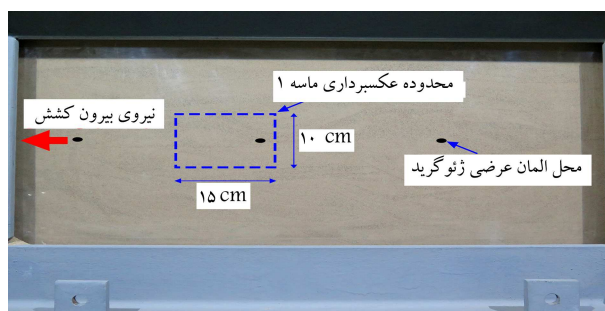
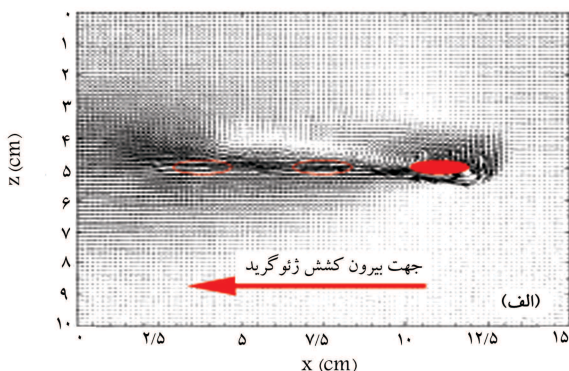
طبق شکل ۱۳، ضریب β با افزایش فشار سربار به صورت غیرخطی کاهش یافته است و در طی آزمایش عدد ثابتی نیست که با نتیجه‌ی مطالعات سایر پژوهشگران همسو است.^[۱۶] به عنوان مثال و با توجه به شکل ۱۳، ضریب β برای ماسه‌ی ۲ تحت سربارهای ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب ۰٫۲۳، ۰٫۳۴ و ۰٫۱۷ است که تحت سربارهای ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال کاهش یافته به ۳۲٪ و ۵۰٪ نسبت به سربار ۲۵ کیلوپاسکال نشان می‌دهند.

۲.۶. نتایج پردازش تصویر

به دلیل اختلاف قابل ملاحظه در اندازه‌ی ذرات خاک‌ها و یکسان بودن لنز دوربین در تمامی آزمایش‌ها، جهت واضح تر شدن تصاویر در خاک با دانه‌بندی ریزتر فاصله‌ی دوربین تا دیواره‌ی پلکسی گلاسی کمتر و در خاک‌های درشت‌دانه بیشتر بوده است. در ماسه‌ی ۱، محدوده‌ی ذکر شده به طول ۱۵ و عرض ۱۰ سانتی‌متر بوده

با بررسی بیشینه‌ی نیروها و تغییر مکان‌های متناظر با آن‌ها در ماسه‌ی ۱، ماسه‌ی ۲ و شن مشاهده می‌شود که با افزایش سربار نیروی بیرون کشش و تغییر مکان متناظر با آن افزایش می‌یابد که ناشی از محصورشدگی بیشتر ذرات و بنابراین افزایش عامل اصطکاکی و نیروهای مقاومت مقاوم است. در ماسه‌ی ۱، افزایش نیروی بیرون کشش تحت سربارهای ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب ۳۵ و ۷۰ درصد نسبت به سربار ۲۵ کیلوپاسکال افزایش داشته است. نکته‌ی جالب توجه اینکه در ماسه‌ی ۲ و شن، میزان افزایش نیروهای بیرون کشش تحت سربارهای ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال تقریباً یکسان و برابر ۴۰ و ۱۰۰ درصد نسبت به سربار ۲۵ کیلوپاسکال بوده است که علت اصلی آن ریزدانه بودن ماسه‌ی ۱ است ($D_{50} = 0.22 \text{ mm}$). در خاک مذکور به دلیل ریزی دانه‌ها و محدوده‌ی برشی کوچک در جلوی المان‌های عرضی ژئوگرید، نوع گسیختگی از نوع پانچ است و بر این اساس نرخ افزایش مقاومت بیرون کشش تحت سربارهای بالا نیز کمتر شده است. در سال ۱۹۸۴ نیز گزارش شده است که در خاک‌های با دانه‌بندی ریز و یکنواخت، احتمالاً گسیختگی از نوع پانچ است.^[۱۵] در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود که نرخ تغییرات بیشینه‌ی نیروی بیرون کشش نسبت به فشار سربار و جابه‌جایی متناظر برای ماسه‌ی ۱ به مراتب کمتر از دو خاک دیگر است.

در شکل ۱۲، نتایج حاصل از آزمایش‌های بیرون کشش و نتایج تئوریک براساس روابط ۴ و ۵ به منظور مقایسه ارائه شده‌اند. تحت سربارهای ۲۵ و ۵۰ (kPa)، نتایج روابط تحلیلی انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان داده‌اند، لیکن تحت سربار ۱۰۰ kPa نتایج تحلیلی از نتایج آزمایشگاهی قدری بیشتر هستند. طبق روابط ۴ و ۵، نیروی بیرون کشش ضریبی از سربار اعمالی است. به عبارت دیگر،



شکل ۱۴. محدوده عکس برداری در ماسه‌ی ۱.

است (شکل ۱۴). محدوده‌ی عکس برداری در ماسه‌ی ۲، 20×20 سانتی‌متر و در نمونه‌ی شن به 25×20 سانتی‌متر افزایش یافته است. در تمامی آزمایش‌ها، عکس برداری حول المان عرضی صورت گرفته است.

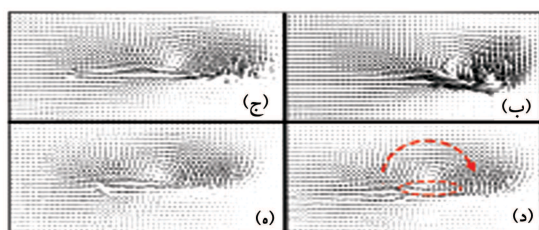
۱.۲.۶. بردارهای تغییر مکان

در شکل ۱۵، بردارهای تغییر مکان حاصل از انجام آزمایش بیرون کشش با استفاده از روش PIV تحت سربار 50 کیلوپاسکال برای ماسه‌ی ۱ به عنوان نمونه ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۱۵ الف مشاهده می‌شود، فقط محدوده‌ی باریکی از ماسه تحت تأثیر نیروی بیرون کشش ژئوگرید و نیز تغییر مکان ذرات هم جوار قرار می‌گیرد. بیشینه‌ی ضخامت محدوده‌ی مذکور که ذرات روی یکدیگر غلتیده و یا در جلوی المان‌های عرضی جابه‌جا شده‌اند، 13 میلی‌متر بوده است و با فاصله گرفتن از سطح تماس خاک - ژئوگرید، ذرات خاک بخش‌های فوقانی و تحتانی تحت تأثیر تغییرات مذکور قرار نمی‌گیرند. موقعیت اولیه‌ی المان عرضی ژئوگرید با مقطع بیضی به رنگ قرمز توپر مشخص و موقعیت‌های بعدی آن در حین بیرون کشیدگی با بیضی‌های قرمز رنگ به صورت خط چین نشان داده شده است.

جهت مشاهده و بررسی ریزبینه‌تر تغییرات ذکر شده، شکل‌های ۱۵ ب تا ۱۵ ه تغییر مکان‌ها را در بازه‌های $2/5$ سانتی‌متری نشان می‌دهند. در شکل ۱۵ ب که نشان‌دهنده‌ی بردارهای تغییر مکان در بازه‌ی صفر الی $2/5$ سانتی‌متر جابه‌جایی افقی است، بیشینه‌ی تمرکز بردارها مشاهده می‌شود؛ که به دلیل شروع آزمایش، تشکیل گوه‌های گسیختگی اولیه در خاک و رسیدن به بیشینه‌ی مقاومت مقاوم خاک در برابر بیرون کشیدگی است. در شکل‌های ۱۵ ج تا ۱۵ ه، تعداد و طول بردارها کاهش پیدا کرده است؛ که بیانگر بیرون کشیده شدن ژئوگرید و رسیدن به شرایط پایدار یا حالت حدی است.

با دقت در نمودارهای شکل ۱۵ مشخص است که در هنگام حرکت عضو عرضی ژئوگرید، دانه‌هایی که در مقابل آن قرار دارند، ابتدا به سمت بالا و سپس سمت راست حرکت کرده‌اند. دانه‌های مذکور پس از تغییر مکان افقی در جهت راست به پایین تغییر جهت می‌دهند، که نشان‌دهنده‌ی حرکت چرخشی ذرات است. به عبارتی دیگر، با حرکت ژئوگرید، دانه‌های خاک واقع در جلوی المان‌های عرضی در حالت مقاوم قرار می‌گیرند و سبب جابه‌جایی دانه‌ها به سمت بالا می‌شوند. در همین حال ذرات خاک در پشت ژئوگرید در حالت فعال قرار می‌گیرند و تماس خاک با ژئوگرید قطع و این امر سبب ایجاد حفره در خاک پشت ژئوگرید می‌شود. حفره‌ی مذکور، مقصد نهایی دانه‌های جابه‌جا شده پس از چرخش است.

نکته‌ی حائز اهمیت دیگر، نامتقارن بودن مسیر حرکت دانه‌های ماسه حول محور طولی ژئوگرید است که با نتایج پژوهش‌های گزارش شده^[۷] هم‌سو است. در هنگام بیرون کشیده شدن عامل تسلیح، حرکت و جابه‌جایی ذرات عمدتاً روی سطح تماس فوقانی خاک و ژئوگرید صورت گرفته است، که مهم‌ترین دلیل آن را می‌توان حرکت



الف) تغییر مکان در طول 10 cm
ب) تغییر مکان در بازه‌ی صفر تا $2/5$ cm
ج) تغییر مکان در بازه‌ی $2/5$ تا $5/5$ cm
د) تغییر مکان در بازه‌ی $5/5$ تا $7/5$ cm

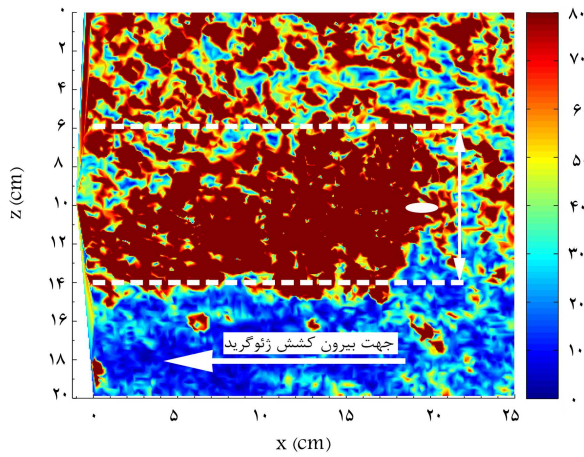
شکل ۱۵. بردارهای جابه‌جایی ماسه‌ی ۱ در اطراف المان عرضی ژئوگرید تحت سربار 50 کیلوپاسکال.

دانه‌های فوقانی مجاور به ژئوگرید دانست. به بیانی دیگر، ژئوگرید برای ذرات فوقانی خاک به صورت تکیه‌گاه عمل می‌کند و حرکت آن در داخل خاک سبب می‌شود که دانه‌های مجاور فوقانی جابه‌جا و از تراکم‌شان کاسته شود. بنابراین ذرات موجود در جلوی المان‌های عرضی ژئوگرید تمایل به حرکت به سمت بخش‌های خاک با تراکم پایین‌تر را دارند.

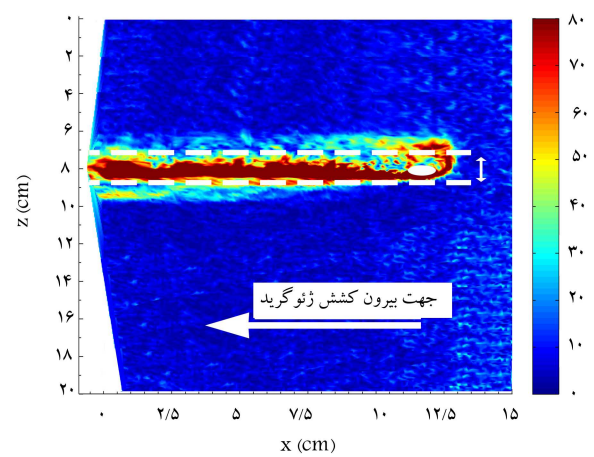
۲.۲.۶. کانتورهای کرنش برشی

کانتورهای کرنش برشی هر سه نمونه‌ی ماسه‌ی ۱، ماسه‌ی ۲ و شن تحت تنش قائم 50 کیلوپاسکال در بخش حاضر بررسی شده‌اند. در شکل ۱۶، تغییرات کرنش برشی ماسه‌ی ۱ با دانه‌بندی بکتواخت و $(D_{50} = 0.22 \text{ mm})$ ، تحت سربار 50 کیلوپاسکال نشان داده شده است. مقطع المان عرضی ژئوگرید به شکل بیضی با رنگ سفید و محدوده‌ی باند برشی به صورت خط چین روی شکل مذکور نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشینه‌ی کرنش‌های برشی در نزدیکی ژئوگرید رخ داده و با دور شدن از سطح تماس خاک - ژئوگرید به شدت از نرخ کرنش‌ها کاسته شده است. ضخامت باند برشی با توجه به شکل ۱۶ و با در نظر گرفتن بافت ریزدانه‌ی ماسه‌ی ۱، $1/3$ سانتی‌متر است. با توجه به جهت اعمال نیروی بیرون کشش می‌توان به وضوح مشاهده کرد که علت ریزدانه بودن ذرات خاک و پایین بودن زاویه‌ی اصطکاک داخلی، محدوده‌ی تحت تأثیر کرنش‌های برشی کم بوده و سبب ضخامت نازک باند برشی شده است. این رفتار تداعی‌کننده‌ی گسیختگی از نوع پانچ است، که در خاک‌های ریزدانه تحت نیروی بیرون کشش در سال ۲۰۱۲^[۷] نیز گزارش شده است.

در شکل ۱۷، کانتورکرنش‌های برشی ماسه‌ی ۲ مسلح شده تحت سربار 50 کیلوپاسکال ارائه شده است. به دلیل درشت‌دانه‌تر بودن ماسه‌ی ۲ با $D_{50} = 1.75 \text{ mm}$ ، محدوده‌ی عکس برداری شده به 20×20 سانتی‌متر افزایش یافته است. در شکل



شکل ۱۶. کرنش‌های برشی در سطح تماس ماسه ۱- ژئوگرید تحت سربار ۵۰ کیلوپاسکال.



شکل ۱۷. کرنش‌های برشی در سطح تماس ماسه ۲- ژئوگرید تحت سربار ۵۰ کیلوپاسکال.

جالب در مورد نمونه‌ی شنی، متقارن‌تر شدن شکل باند برشی حول محور طولی ژئوگرید و جابه‌جا شدن هم‌زمان ذرات در سطوح تماس فوقانی و تحتانی عامل تسلیح است که همین امر باعث مقاومت در برابر بیرون‌کشیدگی بیشتر نمونه‌های مذکور است. در نمونه‌ی شنی با توجه به بزرگ‌تر بودن ذرات، بیرون کشیده‌شدن ژئوگرید باعث شده است که ذرات موجود در جلوی المان‌های عرضی پس از بسیج شدن مقاومت مقاوم خاک و به دلیل قابلیت بروز رفتار اتساعی، بیشتر به سمت بالا و پایین جابه‌جا شده و بنابراین محدوده‌ی وسیع‌تری از خاک را تحت تأثیر قرار داده است.

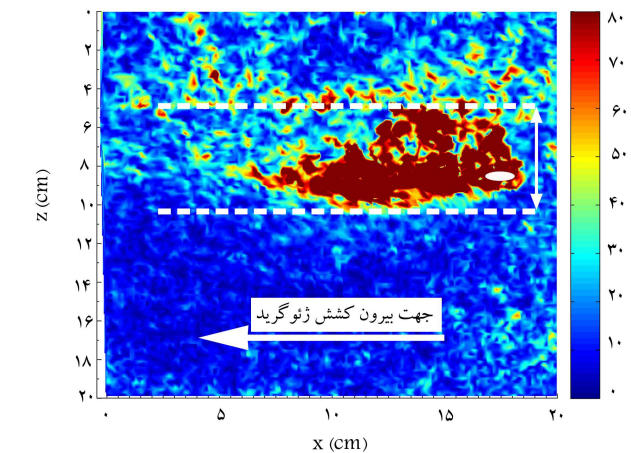
۷. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، براساس آزمایش‌های بیرون کشش انجام شده بر روی نمونه‌های ماسه‌ی ۱، ماسه‌ی ۲ و شن به منظور بررسی اثر اندازه‌ی ذرات در ضخامت باند برشی با استفاده از روش پردازش تصویر، این نتایج به دست آمده است:

-- مقایسه‌ی کانتورهای کرنش برشی نشان می‌دهد که با افزایش اندازه‌ی دانه‌ها ضخامت باند برشی در اطراف ژئوگرید افزایش می‌یابد. حالت گسیختگی در ماسه‌ی ۱ به دلیل ریزدانه بودن از نوع پانچ و در ماسه‌ی ۲ و شن از نوع گسیختگی کلی است، که محدوده‌ی وسیع‌تری از خاک را شامل می‌شود.

-- گسترش محدوده‌ی باند برشی ناشی از بروز رفتار اتساعی بیشتر با افزایش اندازه‌ی متوسط ذرات است. به دلیل جابه‌جایی المان‌های عرضی ژئوگرید، ابتدا مقاومت مقاوم خاک در جلوی اعضاء مذکور، بسیج و باعث افزایش مقاومت در برابر بیرون‌کشیدگی می‌شود. با افزایش جابه‌جایی المان‌های عرضی و رسیدن به بیشینه‌ی مقاومت مقاوم خاک، ذرات تمایل به بلندشدن و سپس غلتیدن روی یکدیگر دارند. این امر محدوده‌ی وسیع‌تری از خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد و نهایتاً باعث کاهش و یا ثابت شدن مقاومت در برابر بیرون کشیده شدن می‌شود.

-- با افزایش اندازه‌ی دانه‌ها، محدوده‌ی باند برشی به خاک بخش‌های تحتانی و فوقانی در مجاورت ژئوگرید نفوذ و محدوده‌ی وسیع‌تری را تحت تأثیر قرار داده است که باعث بسیج بیشتر مقاومت خاک‌های مذکور در برابر بیرون‌کشیدگی شده است. رفتار مذکور ناشی از درشت‌دانه‌تر بودن ذرات،



شکل ۱۸. کرنش‌های برشی در سطح تماس ماسه‌ی ۱- ژئوگرید تحت سربار ۵۰ کیلوپاسکال.

مذکور نیز به خوبی مشاهده می‌شود که بیشترین کرنش‌ها در نزدیکی سطوح تماس خاک و ژئوگرید رخ داده و با فاصله گرفتن از سطوح تماس تغییرشکل‌های ناشی از جابه‌جایی ذرات به شدت تقلیل یافته است. ضخامت باند برشی ماسه‌ی ۲ با دانه‌بندی بهتر و درشت‌تر، ۵ سانتی‌متر یعنی تقریباً به ۴ برابر ماسه‌ی ۱ افزایش یافته است. در خاک درشت‌دانه‌تر با زاویه‌ی اصطکاک داخلی بزرگ‌تر، بیرون کشیده شدن ژئوگرید سبب تغییر مکان بازه‌ی وسیع‌تری از ذرات به خصوص در قسمت فوقانی ژئوگرید شده است، به طوری که محدوده‌ی خاک بسیج شده نسبت به ماسه‌ی ریزدانه‌تر افزایش یافته است. افزایش ضخامت باند برشی به دلیل گسیختگی از نوع برش کلی است و مشاهده می‌شود که با افزایش اندازه‌ی ذرات و توزیع بهتر دانه‌بندی باند برشی در خاک در سطح تماس تحتانی خاک - ژئوگرید نیز بیشتر نفوذ کرده است.

توزیع کرنش‌های برشی ناشی از بیرون کشیده شدن ژئوگرید در برگرفته شده با شن با $D_{50} = 8 \text{ mm}$ تحت سربار ۵۰ کیلوپاسکال در شکل ۱۸ نشان داده شده است. محدوده‌ی عکس‌برداری در نمونه‌ی شنی به طول ۲۵ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر بوده است. ضخامت باند برشی در سطح تماس ذرات شن با ژئوگرید به طور قابل ملاحظه‌ی افزایش و به حدوداً ۸ سانتی‌متر بالغ شده است. نکته‌ی

به دلیل بزرگ‌تر بودن ذرات و اندرکنش بیشتر خاک با ژئوگرید، علاوه بر محدوده‌ی باندهای برشی، بخش فوقانی نمونه نیز متأثر از تغییر مکان ژئوگرید بوده است.

-- اندازه‌ی ذرات و توزیع دانه‌بندی خاک، تأثیر قابل ملاحظه‌ی در ضخامت باندهای برشی و مقاومت در برابر بیرون کشیده شدن و بنابراین پایداری کلی سازه‌های خاک مسلح خواهد داشت.

بزرگ‌تر بودن زاویه‌ی اصطکاک داخلی و قابلیت رفتار اتساعی بیشتر خاک‌های ذکر شده است.

-- در ماسه‌ها با اندازه‌ی متوسط، ذرات کوچک‌تر جهت حرکت دانه‌ها حول المان‌های عرضی ژئوگرید نامتقارن‌تر بوده و محدوده‌ی کمتری از خاک تحت تأثیر بیرون‌کشیدگی ژئوگرید قرار گرفته است. این در حالی است که در شن

پانوشتها

1. pullout
2. plexiglas

منابع (References)

1. Ziegler, M. and Timmers, V. "A new approach to design geogrid reinforcement", In Proceedings of the 3rd European Geosynthetics Conference, Munich, Germany, pp. 661-667 (1-3 March, 2004).
2. Palmeira, E.M. "Soil-geosynthetic interaction: Modelling and analysis", *Geotextiles and Geomembranes*, **27**(5), pp. 368-390 (2009).
3. 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).
4. Bao, C.G. "Study on interface behavior of geosynthetics and soil", *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **25**(9), pp. 1735-1744 (2006).
5. 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).
6. Abdi, M.R. and Zandieh, A.R. "Experimental and numerical analysis of large scale pull out tests conducted on clays reinforced with geogrids encapsulated with coarse material", *Geotextiles and Geomembranes*, **42**(5), pp. 494-504 (2014).
7. 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).
8. 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).
9. Bathurst, R.J. and Ezzein, F.M. "Geogrid and soil displacement observations during pullout using a transparent granular soil", *Geotechnical Testing Journal*, **38**(5), pp. 1-13 (2015).
10. Hajjaliloue Bonab, M., Katebi, H. and Sarand, F.B. "Behavior investigation of reinforced and unreinforced sand below strip foundation using PIV", *Journal of Civil Engineering Ferdowsi University of Mashhad*, **23**(2), pp. 103-114 (2012).
11. Michelland, S., Schiborr, B. and Coster, M. "Size distribution of granular materials from unthresholded image", *Journal of Microscopy*, **156**(3), pp. 301-311 (1989).
12. Ghalib, A.M. and Hryciw, R. "Soil particle size distribution by mosaic imaging and watershed analysis", *J. Comput. Civil Eng.*, **13**(2), pp. 80-87 (1999).
13. Al-Shibli, K.A. and Sture, S. "Sand shear band thickness measurements by digital imaging techniques", *J. Comput Civil Eng.*, **13**(2), pp. 103-108 (1999).
14. Tenax Corporation, "Geosynthetics division", 4800 Pulaski Highway, Baltimore, MD 21224, USA (Web site: www.tenax.net).
15. Jewell, R.A., Milligan, G.W.E., Sarsby, R.W. and et al. "Interaction between soil and geogrids", *Polymer Grid Reinforcement*, Thomas Telford, London, UK, pp. 18-30 (1984).
16. 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).