

تأثیر اندازه ذرات خاک و ابعاد چشمه‌های ژئوگرید بر اندرکنش خاک-ژئوگرید

محمودرضا عبدی^{۱*} و مهرداد اتفاق^۲

^۱ دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

^۲ کارشناس ارشد خاک و پی، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

abdi@kntu.ac.ir

چکیده: در این تحقیق آزمایش‌ها با استفاده از ۳ نوع خاک درشت‌دانه و ۴ نوع ژئوگرید با جنس یکسان و ابعاد چشمه‌های مختلف انجام گردیده است. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه برش مستقیم مقیاس بزرگ انجام شد و میزان افزایش مقاومت برشی نسبت به خاک غیرمسلح اندازه‌گیری شده و مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که برای هر خاک با دانه بندی مشخص یک چشمه با اندازه بهینه وجود دارد. همچنین برای هر خاک در یک نسبت منافذ مشخص مقاومت برشی افزایش بیشتری نسبت به سایر نسبت منافذ داشته است. تغییرات ضریب اتصال در تمامی حالات بررسی شد و مقادیر حداکثر و حداقل این ضریب برای هر نمونه خاک به دست آمد که بیانگر قویترین و ضعیف‌ترین پیوند خاک با ژئوگرید مربوطه است.

کلمات کلیدی: ژئوگرید، مقاومت برشی، ضریب اتصال، اندازه ذرات، خاک مسلح.

The Effect of Soil Particle Size and Reinforcement Aperture Size on the Soil-Geogrid Interaction

M. Abdi and M. Etefagh

Abstract: In the current research, three coarse grained soils and four geo-grids of the same material but of different aperture size have been used. Experiments have been conducted using large direct shear box. Results have been employed to assess the effects of grain and aperture size on the shear strength of reinforced soils and comparing these results with the shear strength of unreinforced soils. The obtained results show that for a soil with a specific grain size distribution, there is a geo-grid with a specific aperture size which produces the maximum increase in shear strength. In addition, for each particular soil there is a specific aperture ratio that results in the highest shear strength. The maximum and the minimum interaction coefficients for all samples have been determined, which is an indication of the best and the worst soil-geogrid interaction.

Keywords: Geo-Grid, Shear Strength, Interaction Coefficient, Dimension, Reinforced Soil.

۱- مقدمه

خاک مسلح، روش نسبتاً جدیدی است که نخستین بار توسط هنری ویدال، مهندس فرانسوی در سال ۱۹۶۳ ابداع شد. دیوار حایل نخستین نمونه خاک مسلح بود که در سال ۱۹۶۵ در فرانسه بنا شد و پس از آن در سال‌های ۶۹-۱۹۶۸ اجرای یک پروژه طولانی دیوارهای حایل بر روی شیب‌های ناپایدار در جنوب فرانسه، فرصت انجام بررسی‌های تحقیقاتی و پیشرفت‌های فنی را فراهم نمود. خاک مسلح مجموعه‌ای از خاکریز (نوع خاک آن معمولاً دانه‌ای است)، عناصر مسلح کننده (به صورت تسمه، میلگرد، شبکه و غیره) و اجزای پوسته می‌باشد. عناصر مسلح کننده به گونه‌ای در خاکریز جای داده می‌شوند که منجر به کاهش کرنش کششی حاصله شوند. خاک‌های دانه‌ای عموماً در برابر فشار مقاوم هستند؛ اما در مقابل کشش ضعیف می‌باشند. در خاک مسلح وجود عناصر مسلح کننده در جهت کرنش کششی باعث بهبود رفتار خاک می‌شود.

در چند دهه اخیر خصوصاً بعد از سال ۱۹۴۰ استفاده از مواد مصنوعی نیز معمول شده که معروف‌ترین آنها مواد پلیمری است. امروزه گروهی از مصالح که از پلیمرها ساخته شده و در مهندسی عمران به کار می‌روند؛ اصطلاحاً ژئوسنتتیک‌ها نامیده می‌شوند. ژئو به معنای زمین و قسمت دوم یعنی سنتتیک به این دلیل انتخاب شده که اغلب این مواد ساخته دست بشر و مصنوعی می‌باشند. ژئوسنتتیک‌ها در مهندسی عمران، زمین شناسی، معدن و محیط زیست بیشترین کاربرد را دارند و اغلب به همراه خاک و سنگ به کار می‌روند تا خصوصیات آن را اصلاح نمایند. برای مثال توسط ژئوسنتتیک‌ها می‌توان ظرفیت باربری خاک و قابلیت زهکشی آن را تقویت نمود [۱].

۲- مروری بر پیشینه موضوع

در زمینه تسلیح خاک با ژئوسنتتیک، محققان اثر پارامترهای مختلف را روی رفتار خاک بررسی نموده‌اند. این پارامترها شامل دانه بندی، تنش‌های قائم، دانسیته، تراکم، مقاومت ژئوسنتتیک‌ها، شکل و اندازه حفرات آنها می‌باشد. در این زمینه دو آزمایش اصلی برش مستقیم و آزمایش بیرون کشش وجود دارد. Jewell و همکاران در ۱۹۸۵ مطالعاتی در زمینه اندرکنش بین خاک و ژئوگرید انجام داده‌اند. در این تحقیق مقاومت لغزشی مستقیم اندرکنش

خاک و ژئوگرید بصورت مجموعه‌ای از سطح مشترک خاک و ژئوگرید به علاوه خود خاک در درون حفرات ژئوگرید بیان شده است [۲]. Chi-Nan Liu و همکاران در سال ۲۰۰۹ اندرکنش ماسه و ژئوگرید را در حالت برش مستقیم ارزیابی کردند، که نتایج جامعی درباره برش مستقیم با در نظر گرفتن نوارهای عرضی ژئوگرید به دست آمد. نتایج آنها نشان داد که مقاومت برشی ناشی از اندرکنش ماسه ژئوگرید تحت برش مستقیم به‌طور قابل توجهی از مقاومت برشی ناشی از اندرکنش ماسه ژئوگرید بیشتر است. آنها دریافتند که اندرکنش خاک با ژئوسنتتیک شامل ۳ مکانیسم است که عبارتند از [۳]:

۱- مقاومت برشی بین خاک و ژئوسنتتیک

۲- مقاومت برشی داخلی خاک (داخل چشمه‌ها)

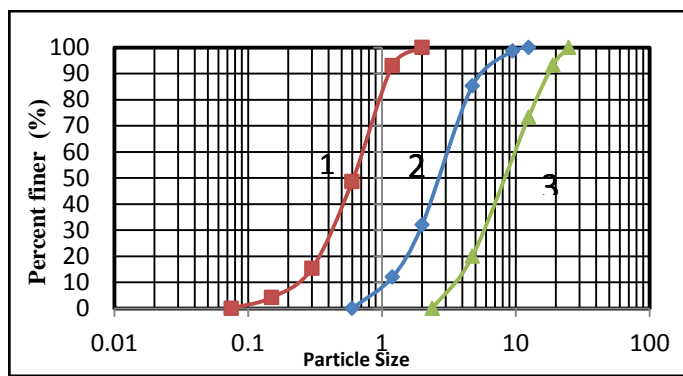
۳- مقاومت غیر فعال نوارهای عرضی.

عبدی و همکاران در سال ۲۰۱۰ جهت بررسی تاثیر مقدار مقاومت کششی ژئوگرید در مقاومت برشی سطحی تماس سه نوع ژئوگرید را با مقاومت‌های متفاوت در آزمایش استفاده کردند. نتایج آزمایشات نشان داد که بسیج کامل مقاومت ژئوگرید بستگی به مقدار فشار قائم دارد. مقاومت ژئوگریدی که مقاومت کششی کمتری دارد در فشارهای پایین و ژئوگریدی که مقاومت کششی بیشتری داشته باشد در فشارهای قائم بالاتر بیشتر بسیج شده‌اند [۴].

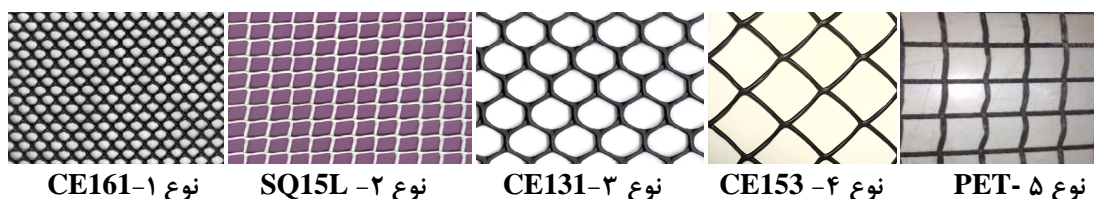
۳- مطالعات آزمایشگاهی

خاک مورد استفاده در این آزمایش از نوع درشت دانه و با سه دانه‌بندی متفاوت بوده است. توزیع دانه بندی خاک‌ها به روش الک کردن (Seive Analysis) و بر اساس ضوابط استاندارد ASTM D422-63 تعیین شد، و منحنی‌های مربوط در شکل ۱ و مشخصات دانه‌بندی آنها در جدول ۱ ارائه شده است.

در این تحقیق از ۵ نوع ژئوگرید با اندازه شبکه‌های متفاوت و از جنس پلی اتیلن استفاده گردیده که در شکل ۲ تصویر ژئوگریدها و در جدول ۲ مشخصات ارائه شده توسط شرکت سازنده ارائه شده است. برای تهیه نمونه‌ها خاک‌ها در ۴ لایه در جعبه دستگاه برش مستقیم متراکم و ژئوگرید مربوطه در بین دو جعبه قرار گرفته است. در انجام آزمایش‌ها از تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال و سرعت اعمال نیروی برشی ۱ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شد و آزمایش‌ها به‌صورت کنترل کرنش انجام شدند.



شکل ۱: خاک‌های مورد استفاده با دانه‌بندی ریز، متوسط و درشت



شکل ۲- تصاویر ژئوگریدهای مورد استفاده در آزمایش‌ها

جدول ۱: مشخصات دانه‌بندی خاک‌ها

مشخصات دانه بندی	۱	۲	۳
$D_{50}(mm)$	0.6	2.2	9
C_c	2.3	1.17	1.02
C_u	3.4	2.81	2.85

جدول ۲: مشخصات ژئوگریدهای مورد استفاده [۵]

مشخصات	۱	۲	۳	۴	۵
نام تجاری	CE161	SQ15L	CE131	CE153	PET
اندازه چشمه (mm)	10×10	15×15	27×27	35×35	42×27
مقاومت کششی (kN/m)	7.6	5.5	5.8	6.1	5
ضخامت (mm)	2.2	2.4	3.5	3.8	1.8

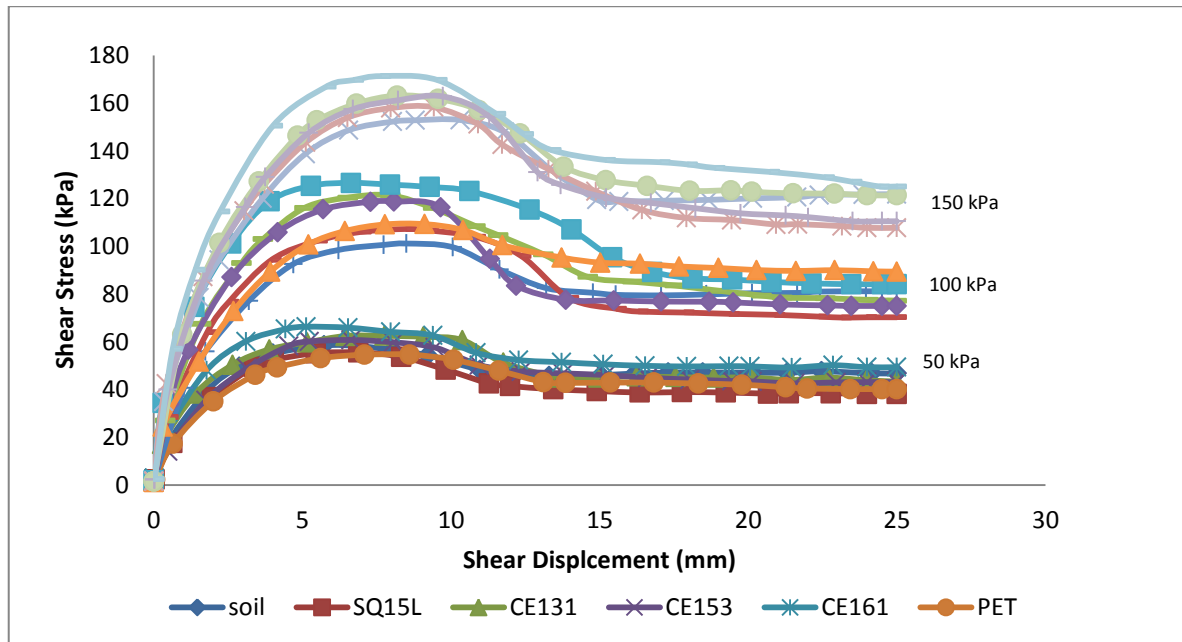
نمودن نمونه‌ها باعث افزایش مقاومت برشی گردیده است. در منحنی تنش برشی- جابجایی افقی مسلح و غیر مسلح خاک ۱ در همه حالات تنش‌های برشی در کرنش ۲۵ میلی‌متر به مقدار ثابتی (تنش نهایی) می‌رسند. همچنین ملاحظه می‌شود که در این خاک ژئوگرید CE161 بیشترین مقاومت برشی را ایجاد کرده است. با توجه به ریز بودن ذرات خاک ۱ و اینکه ژئوگرید مذکور کوچک‌ترین چشمه را در بین ژئوگریدهای بکار رفته دارد، به نظر می‌رسد که ذرات خاک ۱ در چشمه‌هایی با این اندازه، بهترین قفل و بست را با هم ایجاد کرده و قوی‌ترین اندرکنش را با ژئوگرید مذکور داشته‌اند.

۴- ارائه نتایج

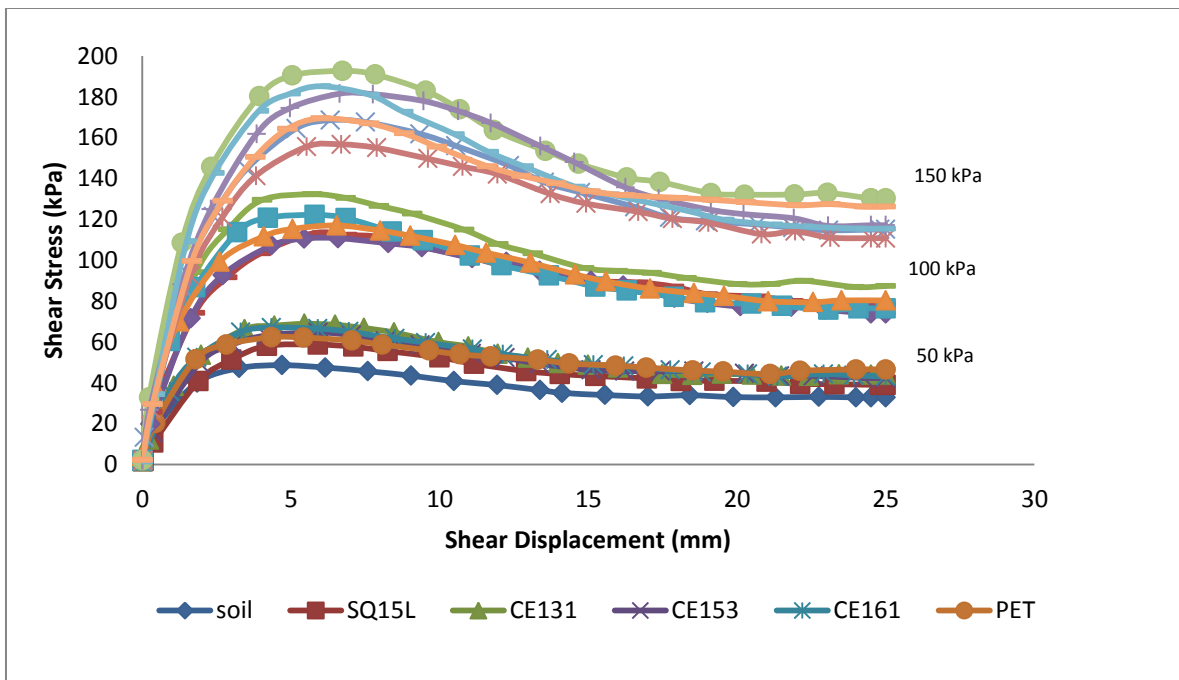
منحنی‌های تنش برشی - جابجایی افقی حاصل از انجام آزمایش‌ها تحت تنش‌های قائم مختلف برای خاک‌های ریزدانه، متوسط و درشت‌دانه به ترتیب در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ نشان داده شده است. شکل کلی منحنی‌ها همانند منحنی تنش برشی- جابجایی افقی ماسه متراکم است. در کرنش‌های کوچک، تنش برشی به شدت افزایش یافته و پس از رسیدن به تنش برشی حداکثر و شکست نمونه‌ها با افزایش کرنش، تنش برشی کاهش می‌یابد. با توجه به شکل‌های مذکور به وضوح مشاهده می‌شود که مسلح

تنش‌های نهایی و تنش حداکثر بیشتر می‌گردد. بطوریکه در تنش ۵۰ کیلو پاسکال اختلاف بین تنش‌های حداکثر و نهایی کم بوده، ولی در تنش ۱۵۰ کیلو پاسکال پس از تنش حداکثر، مقاومت برشی کاهش چشمگیری در حدود ۵۰ الی ۶۰ کیلو پاسکال دارد که نشان دهنده رفتار نرم شوندگی است.

شکل ۴ منحنی‌های تنش برشی - جابجایی افقی نمونه‌های مسلح و غیرمسلح خاک ۲ را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در این نمونه‌ها نیز همانند نمونه‌های خاک ۱ با افزایش تنش قائم، شاهد افزایش قابل ملاحظه‌ای در تنش برشی هستیم. بیشترین مقاومت برشی توسط نمونه خاک ۲ مسلح شده با ژئوگرید CE131 به نمایش گذاشته شده است. همانند خاک ۱ با افزایش تنش قائم، اختلاف بین



شکل ۳: منحنی‌های تنش برشی - جابجایی افقی برای نمونه‌های مسلح و غیر مسلح خاک ۱

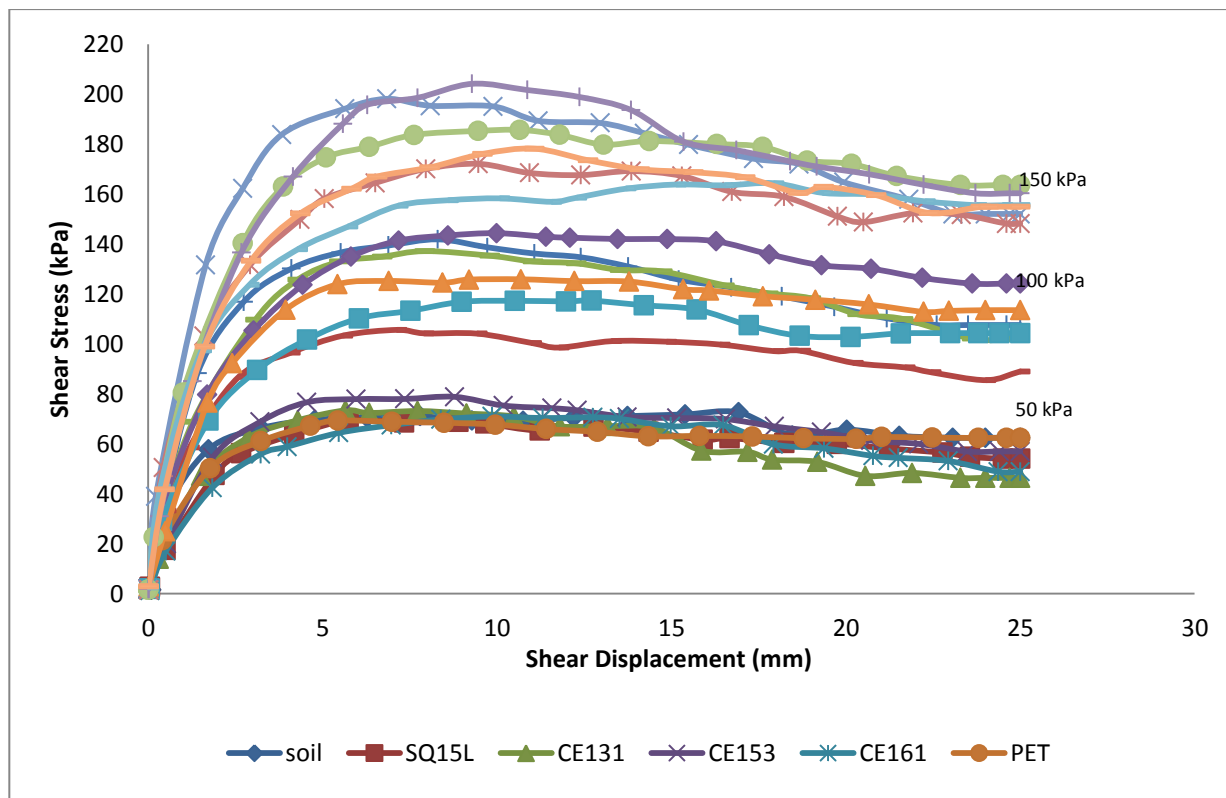


شکل ۴: منحنی‌های تنش برشی - جابجایی افقی برای نمونه‌های مسلح و غیر مسلح خاک ۲

مسلح و غیرمسلح، اختلاف نسبتاً کمی دارند و با افزایش میزان تنش قائم به ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال این تفاوت‌ها مشهودتر گردیده است. این رفتار بیانگر آن است که تحت تنش‌های قائم کم، اندرکنش بین ژئوگرید و ذرات خاک بطور موثر ایجاد نشده و ژئوگریدها نقش چندانی در رفتار مصالح کامپوزیت ایفا نمی‌کند. با افزایش تنش قائم ذرات خاک و ژئوگرید بهتر با یکدیگر اندرکنش داشته و باعث افزایش قابل ملاحظه‌تری در تنش‌های برشی شده اند.

در خاک ۳ ژئوگرید CE153 بیشترین مقاومت برشی را ایجاد کرده است. سایر ژئوگریدها با ابعاد چشمه بزرگتر و کوچکتر اثر کم و حتی منفی روی مقاومت برشی خاک داشته اند. این طور به نظر می‌رسد که ذرات خاک ۳ که شنی هستند برای قفل و بست قوی و اندرکنش حداکثر با ژئوگرید نیازمند میزان فضای درون چشمه ای خاص هستند، بطوریکه که در میزان فضای بیشتر و کمتر از آن، قفل و بست قوی و اندرکنش حداکثر با ژئوگرید رخ نمیدهد.

شکل ۵ منحنی‌های تنش برشی - جابجایی افقی را برای نمونه‌های مسلح و غیر مسلح خاک ۳ نشان می‌دهد. همانند نمونه‌های خاک ۱ و ۲ با افزایش تنش برشی مقاومت برشی افزایش می‌یابد و مقادیر تنش برشی در تغییر شکل‌های کم با شیب تند افزایش یافته و پس از رسیدن به تنش برشی حداکثر مقدار تنش رو به کاهش گذاشته و در تنش نهایی ثابت می‌گردد. با توجه به نمودارها مشاهده می‌شود که حداکثر تنش برشی نمونه‌های خاک ۳ به صورت غیر مسلح به استثنای ژئوگرید CE153، تحت تنش‌های قائم مورد مطالعه از نمونه‌های مسلح این خاک بیشتر بوده است. این بدان معنی است که تحت شرایط برش مستقیم با افزایش اندازه ذرات نقش مسلح کننده ژئوگرید بسیار کم و حتی منفی بوده است، چرا که باعث کاهش تنش‌های برشی حداکثر شده است. نکته مهم دیگر این است که در نمونه‌های خاک ۳ به صورت مسلح و غیر مسلح، نقاط حداکثر تنش‌های برشی و سپس کاهش شدید در این پارامترها مشاهده نمی‌شود. تحت تنش قائم ۵۰ کیلوپاسکال، تنش برشی حداکثر تمامی نمونه‌ها به صورت



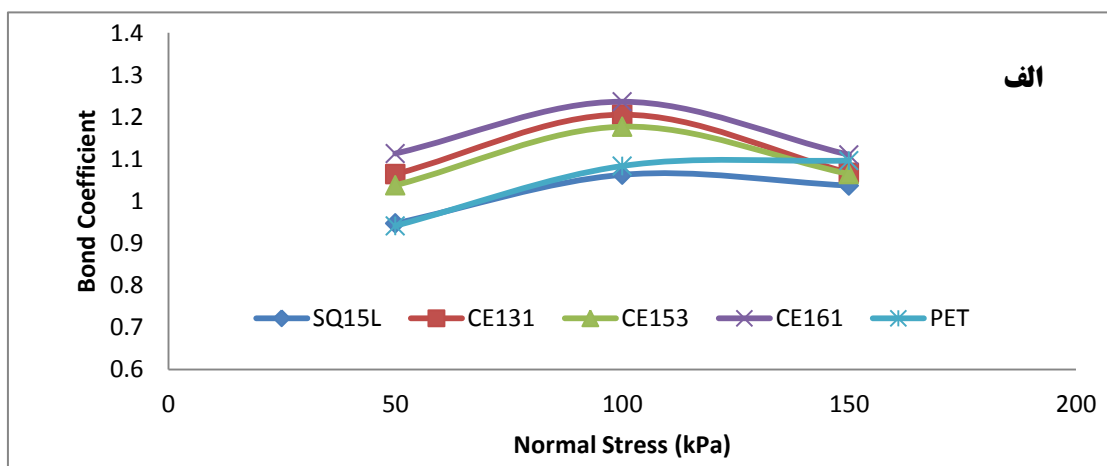
شکل ۵: منحنی‌های تنش برشی - جابجایی افقی برای نمونه‌های مسلح و غیر مسلح خاک ۲

پژوهش، مقدار این ضریب بین ۰/۸۲ الی ۱/۲۶ به دست آمده است. در شکل ۶ تغییرات ضریب اتصال ۳ نمونه خاک در تنش‌های قائم مختلف نشان داده شده است. در خاک ۱ (شکل ۶-الف) روند تغییرات ضریب اتصال ابتدا افزایشی بوده و با افزایش تنش از ۱۰۰ به ۱۵۰ روند کاهشی می‌شود. در این خاک مشاهده شد که پس از ژئوگرید CE161 ژئوگریدهای CE131، CE153 و PET قرار می‌گیرند، که ابعاد چشمه ژئوگریدهای مذکور به ترتیب از کوچک به بزرگ افزایش می‌یابند. علت این امر آن است که با بزرگتر شدن اندازه ابعاد چشمه‌ها قفل و بست مناسب بین ذرات صورت نمی‌گیرد. کمترین مقادیر ضریب اتصال برای این خاک ۰/۹۴ و بیشترین آن ۱/۲۳ می‌باشد.

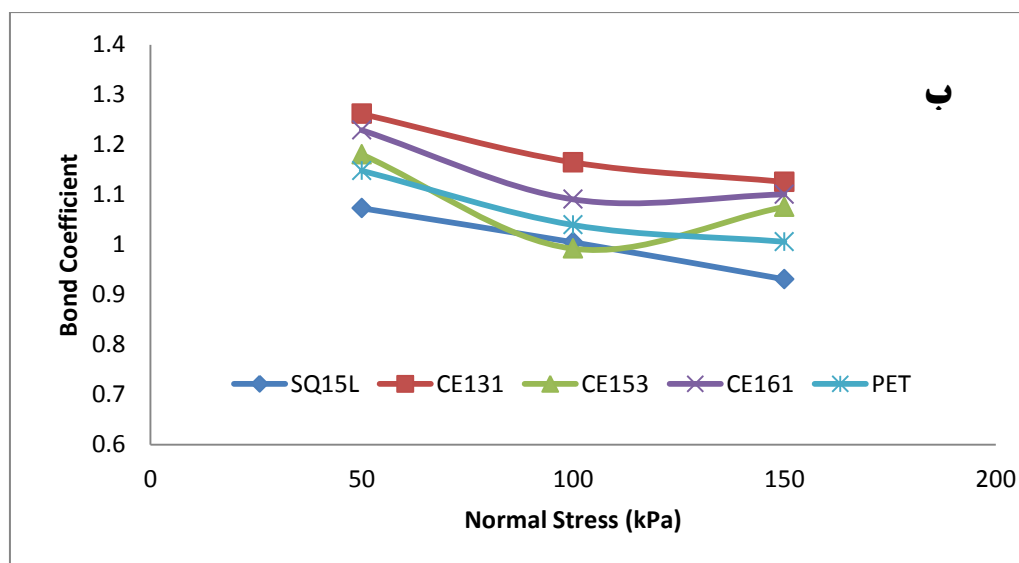
Tatlisoz و همکاران در سال ۱۹۹۸ پارامتری به نام ضریب اتصال را ارائه نمودند. این پارامتر از حاصل تقسیم مقاومت برشی خاک - مسلح کننده به مقاومت برشی خاک- خاک به دست می‌آید.

$$C_i = \frac{C_a + \sigma_n \tan \delta_a}{C + \sigma_n \tan \phi} \quad (1)$$

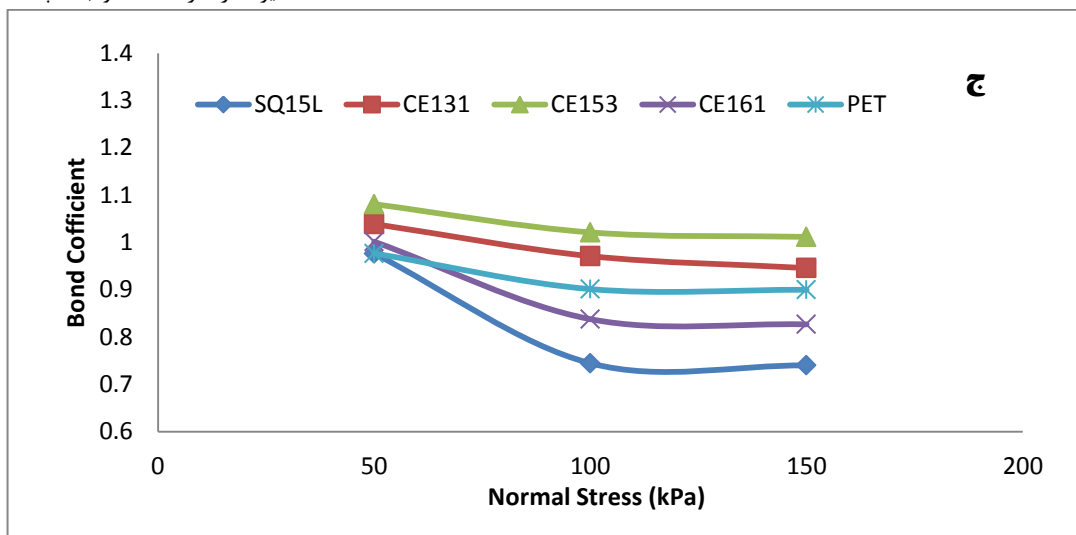
بطوریکه C_a ، δ_a ، C ، σ_n و ϕ به ترتیب چسبندگی بین خاک و ژئوسنتتیک، زاویه اصطکاک بین خاک و ژئوسنتتیک، چسبندگی خاک، تنش قائم و ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌باشد. مکانیزم برش در سطح تماس ترکیبی از مقاومت برش مستقیم خاک-خاک و مقاومت برشی خاک-ژئوگرید است. در صورتی که ضریب اتصال کمتر از ۰/۵ باشد، بدین معنی است که پیوند بین خاک و ژئوسنتتیک ضعیف و اگر بیشتر از ۱ باشد اتصال قوی بین خاک و ژئوسنتتیک حاکم است [۶]. در این



شکل ۶-الف: تغییرات ضریب اتصال خاک ۱ نسبت به تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال



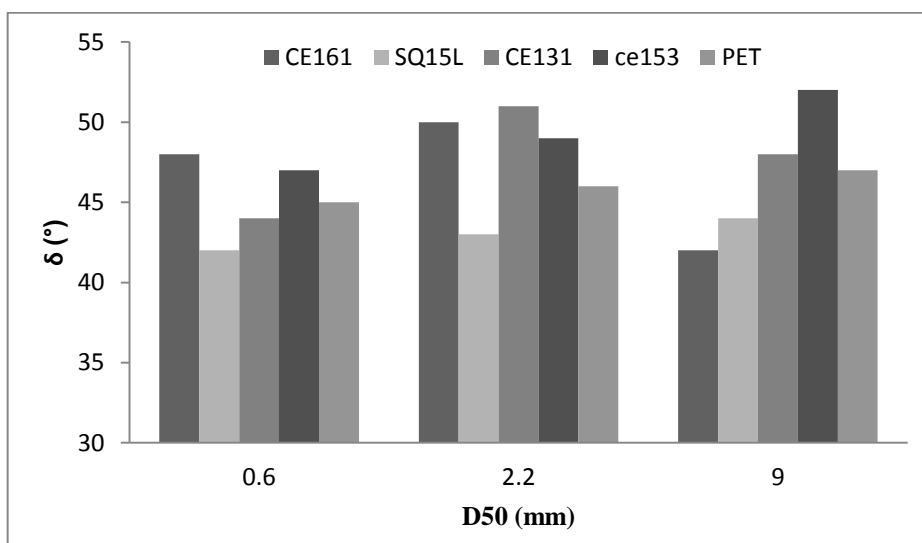
شکل ۶-ب: تغییرات ضریب اتصال خاک ۲ نسبت به تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال



شکل ۶-ج: تغییرات ضریب اتصال خاک ۳ نسبت به تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال

است که با افزایش تنش قائم پیوند خاک و ژئوگرید در سطح تماس ضعیف‌تر شده است. با توجه به شکل ۵-۷-ج در می‌یابیم در تمامی ژئوگریدها به غیر از CE153 مقادیر ضریب اتصال در تنش ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال، کمتر از یک می‌باشد که نشان دهنده این است که افزایش تنش و تسلیح، اثر منفی روی مقاومت برشی داشته است. همچنین مشاهده می‌شود که ژئوگریدهای SQ15L و CE161 که اندازه ابعاد چشمه‌های آنها از اندازه متوسط ذرات کمتر می‌باشد، کمترین مقادیر ضریب اتصال را دارند.

همان‌طور که در شکل ۶-ب نشان داده شده، در خاک ۲ ضرایب اتصال با افزایش تنش قائم کاهش یافته است. این امر نشان دهنده این است که با افزایش تنش قائم پیوند خاک و ژئوگرید در سطح تماس ضعیف‌تر شده، به طوری که در ژئوگرید SQ15L این مقدار به کمتر از یک (۰/۹۳) رسیده است، که نشان دهنده اثر منفی این ژئوگرید در مقاومت برشی خاک مسلح می‌باشد. در این خاک کمترین ضریب اتصال ۰/۹۳ و بیشترین آن ۱/۲۶ می‌باشد. در خاک ۳ همانند خاک ۲ ضرایب اتصال با افزایش تنش قائم کاهش می‌یابند (شکل ۶-ج). این امر نشان دهنده این



شکل ۷: مقادیر زاویه اندرکنش برای نمونه خاک های مسلح

میلی‌متر ژئوگرید CE161، در خاک ۲ با اندازه متوسط ۲/۲ میلی‌متر ژئوگرید CE131 و در خاک ۳ با اندازه متوسط ۹ میلی‌متر ژئوگرید CE153 بیشترین مقاومت برشی را ایجاد کرده اند. می‌توان گفت با بزرگ تر شدن اندازه متوسط ذرات خاک ابعاد ژئوگرید بهینه نیز افزایش می‌یابد. ضریب اتصال به دست آمده در این تحقیق نشان دهنده پیوند قوی بین خاک و ژئوگرید می‌باشد. در هر نمونه خاک، ژئوگریدی که بیشترین مقدار مقاومت را نشان داده، بیشترین ضریب اتصال را به خود اختصاص داده است.

مراجع

- [1] حدادی، ا.، نعمتی، س.، امیری حسینی، ح. ر.، ژئوسنتتیک‌ها و کاربرد آنها در پروژه‌های عمرانی و زیست محیطی، انتشارات فدک ایستاتیس، ۱۳۸۶.
- [2] Jewell, R.A., Milligan, G.W.E., Sarsby, R.W., Dubois, D., *Interaction between soil and Geogrids*. Proc, Conference on Polymer Grid Reinforcement, London, pp. 18-29, 1985.
- [3] Nan Liu, C., Zornberg, J.G., M.ASCE., Chen. T.C., Hsien Ho, Y. and Lin, B.H., *Behavior of Geogrid-sand Interface In Direct Shear Mode*, Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering, ASCE., Vol. 135, pp. 1863-1869, 2012.
- [4] عبدی، م. ر.، ارجمند، م. ع. و سیاوش نیا، م. *ارزیابی تاثیر مقدار مقاومت کششی ژئوگرید در اندرکنش خاک و ژئوگرید*، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران، ۱۴-۱۶ اردیبهشت ۱۳۹۰.
- [5] Specification Data for NETLON, Meshiran Co, No.40, 13th Alley, Miremad Alley, Motahari St, Tehran, Iran, 2004.
- [6] Tatlisoz, N., Edil, T.B., Benson, C.H., *Interaction between Reinforcing Geosynthetics and soil-Tire Chip Mixture*, Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 11, pp. 1109-1119, 1998.

بطور کلی می‌توان گفت که مقادیر ضریب اتصال در خاک ۳ از هر دو نمونه خاک قبلی کمتر است. شاید علت این باشد که با بزرگتر شدن ذرات خاک و ثابت ماندن ابعاد چشمه ژئوگریدها فضای لازم برای قفل و بست موثر ذرات با یکدیگر و درون چشمه‌ها کاهش می‌یابد. با بررسی شکل ۶ مشاهده می‌شود که برای هر خاک یکی از ژئوگریدها ضریب اتصال بیشتری نسبت به سایر ژئوگریدها داشته است. این امر نشان دهنده این موضوع است که اندرکنش خاک و ژئوگرید بهتر از سایر نمونه‌ها بوده و ژئوگرید مربوطه برای آن خاک با آن اندازه ذرات مناسب‌ترین انتخاب برای تسلیح می‌باشد.

شکل ۷ مقادیر زاویه اندرکنش را در برابر نسبت منافذ (نسبت ابعاد چشمه ژئوگرید به اندازه متوسط ذرات خاک) برای ۳ نمونه خاک مسلح نشان می‌دهد. مقادیر زاویه‌ها بین ۴۲ تا ۵۲ درجه بوده و مقادیر این پارامتر با افزایش اندازه متوسط ذرات قدری افزایش نشان می‌دهد. با توجه به شکل ژئوگریدی که در هر خاک بیشترین مقاومت برشی را ایجاد کرده، بالاترین مقدار زاویه اندرکنش خاک-ژئوگرید را نیز به خود اختصاص داده است. به طوری که در خاک ۱ ژئوگرید CE161، در خاک ۲ ژئوگرید CE131 و در خاک ۳، ژئوگرید CE153 بیشترین مقادیر زاویه اندرکنش را به خود اختصاص داده‌اند. علت این امر آن است که افزایش میزان زاویه اندرکنش رابطه مستقیم با مقاومت برشی خاک دارد.

۵- نتیجه‌گیری

بطور کلی می‌توان نتیجه گرفت که اندازه دانه بندی نسبت مستقیم با مقاومت برشی داشته و با افزایش اندازه متوسط ذرات مقاومت برشی نیز افزایش می‌یابد. تنش قائم نسبت مستقیم با مقاومت برشی داشته و با افزایش تنش قائم مقاومت برشی نیز افزایش می‌یابد. مشخص شد که برای هر دانه بندی یک ژئوگرید با اندازه بهینه چشمه برای تسلیح وجود دارد. به طوری که در خاک ۱ با اندازه متوسط ۰/۶