



دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

بررسی تأثیر استفاده از ژئوسل برای تسلیح خاک

فرشاد کبیری^۱

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران - ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، دانشکده فنی و مهندسی

farshadkabiri@ymail.com

چکیده

هدف از این پژوهش بررسی استفاده از ژئوسل برای تسلیح خاک می‌باشد. ژئوسل یک سیستم محصور کننده سه بعدی قابل گسترش است. وجه تمایز این سیستم تسلیح با سایر موارد، ایجاد محصور شدگی جانبی علاوه بر محصور شدگی قائم ناشی از ساختار سه بعدی است. به همین دلیل، تسلیح با ژئوسل را تسلیح سه بعدی یا شبکه‌ای می‌نامند. این محصور شدگی جانبی در واقع، نتیجه تنش‌های کششی غشایی در دیواره‌های ژئوسل می‌باشد و بر مقاومت و سختی خاک داخل سلول‌ها تأثیر گذار است. بر اثر تسلیح با ژئوسل، زاویه اصطکاک داخلی خاک داخل سلول‌ها، ثابت می‌ماند ولی نوعی چسبندگی ظاهری القایی، در آن ایجاد می‌شود، به این معنی که چسبندگی نهایی خاک برابر مجموع چسبندگی واقعی و ظاهری ناشی از استفاده از تسلیح سه بعدی است. به کارگیری تسلیح سه بعدی باعث افزایش سختی و کاهش تغییر شکل خاک می‌گردد. شبکه سلولی ژئوسل، بار وارده را بین سلول‌ها تقسیم می‌نماید و بدین ترتیب توزیع بهتری از بارهای وارده به مجموعه مسلح شده به ژئوسل پدید می‌آید. طبق نتایج مطالعات، مشاهده می‌شود افزایش زاویه اصطکاک خاک مسلح، باعث کاهش تغییر مکان قائم می‌شود. و نیز با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک مسلح، اصطکاک مسلح کننده با خاک افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه نیروی بیشتری به مسلح کننده اعمال می‌شود. در جهت عکس با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک مسلح، مقاومت خاک افزایش پیدا کرده و نیروی مسلح کننده‌ها کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ضخامت (ارتفاع) لایه مسلح کننده، ضریب اطمینان و در نتیجه ضریب بهبود عملکرد افزایش می‌یابد، زیرا سطح تماس و اصطکاک خاک و ژئوسل بیشتر می‌شود. همینطور مشاهده می‌شود هر چه خاک داخل ژئوسل درشت‌تر باشد، تسلیح سه بعدی در مقابل بارهای لرزه‌ای بهتر عمل می‌کند.

کلمات کلیدی: ژئوسل، ژئوسینتتیک، تسلیح خاک، خاک مسلح

۱- مقدمه

تسلیح خاک به طور خلاصه، اضافه کردن المان‌هایی با قابلیت تحمل کششی به خاک است. در ابتدا از مسلح کننده‌های فلزی استفاده می‌شد. نگرانی عمده در مورد فلزات، زنگ زدگی این مصالح است. علاوه بر این، فلز محصول گران و پر کاربرد بوده و نیز سختی بالای فلزات در سیستم‌های خاک مسلح ضروری به نظر نمی‌رسد. کمبود، گرانی و مسئله خوردگی فلزات از یک سو و گسترش پلیمرها از سوی دیگر، باعث استفاده بیشتر از مصالح پلیمری در فعالیت‌های ژئوتکنیکی شد. ژئوسینتتیک‌ها دچار خوردگی نشده و صرفه اقتصادی بالایی دارند. یکی از انواع جدید ژئوسینتتیک‌ها، ژئوسل است که با توجه به هندسه و رفتار سه بعدی، نسبت به مسلح کننده‌های صفحه‌ای، عملکرد بهتری دارد.

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

۲- معرفی ژئوسل

ژئوسل یک سیستم محصور کننده سه بعدی قابل گسترش است. وجه تمایز این سیستم تسلیح با سایر موارد، ایجاد محصور شدگی جانبی (علاوه بر محصور شدگی قائم) ناشی از ساختار سه بعدی است. به همین دلیل، تسلیح با ژئوسل را تسلیح سه بعدی یا شبکه‌ای و تسلیح با مسلح کننده‌های دیگر مثل ژئوگرید و ژئوتکتایل را تسلیح دوبعدی (صفحه‌ای) می‌نامند. امروزه بیشتر ژئوسل‌ها از جنس پلی اتیلن با چگالی بالا ساخته می‌شوند (ویزیلو، ۲۰۰۴).

۲-۱- ویژگی‌های خاک مسلح به ژئوسل (با توجه به تئوری غشای الاستیک)

استفاده از تسلیح شبکه‌ای موجب ایجاد محصور شدگی جانبی علاوه بر محصور شدگی قائم، برای خاک پر کننده می‌شود. این محصور شدگی جانبی در واقع، نتیجه تنش‌های کششی غشایی در دیواره‌های ژئوسل می‌باشد و بر مقاومت و سختی خاک داخل سلول‌ها تأثیر گذار است که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۱-۱- مقاومت برشی

بر اثر تسلیح با ژئوسل، زاویه اصطکاک داخلی خاک داخل سلول‌ها (Φ)، ثابت می‌ماند ولی نوعی چسبندگی ظاهری القایی (C)، در آن ایجاد می‌شود. به این معنی که چسبندگی نهایی خاک مطابق رابطه (۱) برابر مجموع چسبندگی واقعی و ظاهری ناشی از استفاده از تسلیح سه بعدی است.

$$C_g = C + C_r \quad (1)$$

در این رابطه:

C_g : چسبندگی نهایی خاک مسلح

C : چسبندگی ذاتی خاک

C_r : چسبندگی ظاهری اضافه ناشی از تسلیح خاک

در ابتدا (باترست و کنایت، ۱۹۹۳: ۲۱۹-۲۰۵)، مقاومت برشی ناشی از چسبندگی ظاهری را با استفاده از تئوری غشای الاستیک در یک سلول تنه‌ای ژئوسل بررسی کردند. این روش توسط (راجاگوپال و همکاران، ۱۹۹۹: ۱۸۴-۱۷۱) با انجام مطالعاتی تأیید شد. بنابر مطالعات انجام شده با توجه به تئوری غشای الاستیک (هنکل و گیلبرت، ۱۹۵۲: ۲۹-۲۰)، تنش محصور کننده اضافی ناشی از تسلیح با ژئوسل (تئوری غشای الاستیک) برابر است با:

$$\Delta\sigma_3 = \frac{2M \varepsilon_c}{d} \frac{1}{(1 - \varepsilon_a)} \quad (2)$$

در رابطه بالا:

$\Delta\sigma_3$: تنش محصور کننده جانبی ناشی از تسلیح با ژئوسل

M : مدول سکانت ژئوسل در کرنش محوری ۵٪ (کرنش محوری نهایی) که از آزمایش کشش به دست می‌آید.

ε_c : کرنش برشی محیطی در لحظه گسیختگی

ε_a : کرنش برشی محوری در لحظه گسیختگی

d : قطر معادل سلول در لحظه‌ای که کرنش محوری برابر ε_a است. به قطر دایره هم مساحت با سلول ژئوسل اطلاق می‌گردد.

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

از طرفی رابطه بین کرنش محیطی و محوری در لحظه گسیختگی عبارت است از:

$$\varepsilon_c = \frac{1 - \sqrt{1 - \varepsilon_a}}{1 - \varepsilon_a} \quad (3)$$

از جایی که حجم نمونه در تمام طول آزمایش ثابت است:

$$\frac{\pi}{4} d_0^2 L_0 = \frac{\pi}{4} d^2 L \quad (4)$$

در رابطه بالا d_0 و L_0 به ترتیب قطر معادل اولیه و طول اولیه نمونه و d و L قطر معادل و طول نمونه در لحظه گسیختگی هستند.

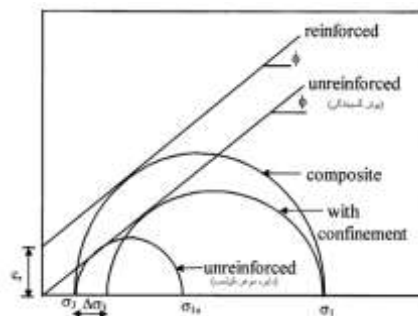
با استفاده از رابطه (4) می توان نوشت:

$$d = \frac{d_0}{\sqrt{\frac{L}{L_0}}} = \frac{d_0}{\sqrt{1 - \varepsilon_a}} \quad (5)$$

با ترکیب روابط (2)، (3) و (5) نتیجه می شود:

$$\Delta\sigma_3 = \left[\frac{1 - \sqrt{1 - \varepsilon_a}}{1 - \varepsilon_a} \right] \frac{2M}{d_0} \quad (6)$$

در شکل (1)، پوش گسیختگی موهر-کولمب برای خاک مسلح به ژئوسل بررسی می گردد:



شکل شماره (1): مقایسه پوش گسیختگی خاک مسلح به ژئوسل و خاک غیرمسلح

با استفاده از تئوری گسیختگی موهر-کولمب با در نظر گرفتن دایره بزرگ می توان نوشت:

$$\sigma_1 = k_p \sigma_3 + 2C_r \sqrt{k_p} \quad (7)$$

σ_1 : تنش اصلی بزرگتر

σ_3 : تنش اصلی کوچکتر

k_p : ضریب رانش غیرفعال

اگر همین رابطه برای خاک غیر مسلح با در نظر گرفتن اضافه تنش محصور کننده نوشته شود، نتیجه به صورت رابطه (8) خواهد بود.

$$\sigma_1 = k_p (\sigma_3 + \Delta\sigma_3) \quad (8)$$



دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

با ترکیب روابط (۷) و (۸) نتیجه می‌شود:

$$C_r = \frac{\Delta\sigma_3}{2} \sqrt{k_p} \quad (9)$$

در نهایت از جاگذاری رابطه (۶) در رابطه (۹) میزان چسبندگی ظاهری به دست می‌آید:

$$C_r = \frac{M}{d_0} \left[\frac{1 - \sqrt{1 - \varepsilon_a}}{1 - \varepsilon_a} \right] \sqrt{k_p} \quad (10)$$

ضمن اینکه طبق تحقیقات (راجاگوپال و همکاران، ۲۰۰۱: ۱۲۵۴-۱۲۵۱)، عموماً در حین گسیختگی متوسط کرنش محیطی حدود ۲/۵٪ و کرنش محوری ۲/۸٪ می‌باشد.

۲-۱-۲-۲- سختی

به کارگیری تسلیح سه بعدی باعث افزایش سختی و کاهش تغییر شکل خاک نیز می‌گردد. اما تا کنون روابط زیادی برای تعیین میزان دقیق اثر تسلیح بر سختی خاک پرکننده ارائه نشده است. بر اساس نتایج آزمایش‌های سه محوری فشاری روی خاک مسلح به ژئوسل توسط (راجاگوپال و همکاران، ۲۰۰۱: ۱۲۵۴-۱۲۵۱)، رابطه تجربی غیرخطی زیر برای تعیین پارامتر k در مدل هیپربولیک دانکن برای خاک مسلح بر حسب پارامتر k خاک غیر مسلح و مدول سکانت M در لحظه گسیختگی (کرنش محوری ۵٪) ارائه شد:

$$k_r = k_e + 200M^{0.16} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، پارامتر k_r در مدل هیپربولیک دانکن برای خاک مسلح، پارامتر k_e پارامتر مذکور برای خاک غیر مسلح و M مدول سکانت ژئوسل در کرنش محوری ۵٪ بر حسب kN/m می‌باشد.

این رابطه از آنالیز نتایج آزمایش‌های سه محوری بر خاک مسلح به تک سلول و سفره سلولی ژئوسل بدست آمده است. ژئوسل‌ها از ژئوگریدها و ژئوتکستایل‌های مختلف با خاک پرکننده نسبتاً متراکم تشکیل شده بودند. ضمناً تسلیح با ژئوسل تغییری در سایر پارامترهای مدل دانکن ایجاد نمی‌کند. به طور مجدد تأکید می‌شود از جایگاه رابطه (۱۱) یک رابطه تجربی است، برای استفاده از آن، پارامتر M الزاماً باید بر حسب kN/m باشد. ضمناً (راجاگوپال و مادهوی، ۲۰۰۷: ۹۲۷-۹۱۷)، رابطه (۱۲) را برای تعیین تأثیر تسلیح سه بعدی بر مدول یانگ خاک مسلح ارائه نمودند:

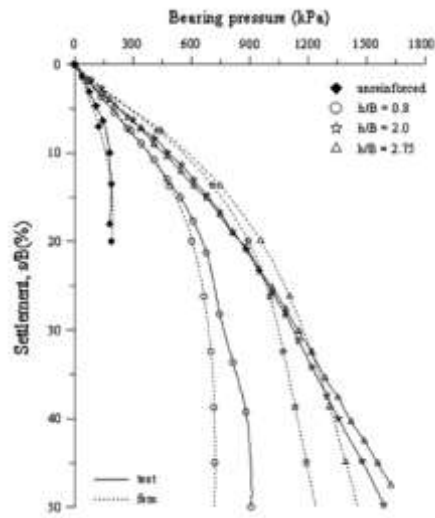
$$E_g = 4(\sigma_3)^{0.7} (k_e + 200M^{0.16}) \quad (12)$$

که در این رابطه E_g مدول یانگ و σ_3 تنش محصور کننده می‌باشد.

۲-۲-۲- روش مدل‌سازی به صورت ماده مرکب

در این روش مدل‌سازی، مجموعه ژئوسل و خاک پرکننده به صورت یک ماده ترکیبی (کامپوزیت) در نظر گرفته می‌شود که چسبندگی و سختی آن به ترتیب از روابط (۱۰) و (۱۱) یا (۱۲) محاسبه می‌گردد. در این روش، الزام به استفاده از پارامترهای مدل هیپربولیک دانکن (مطابق روابط ارائه شده در بالا) برای تخمین پارامترهای مدل رفتاری موردنظر می‌باشد. صحت استفاده از مدل مرکب تا کنون چندین بار تحقیق شده است. برای مثال (مادهوی و همکاران در سال ۲۰۰۸: ۳۹۸-۳۸۷) نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی خاک مسلح به ژئوسل را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرد (مطابق شکل (۲)) و دقت روش مدل‌سازی کامپوزیت (ماده مرکب) را اثبات نمود.

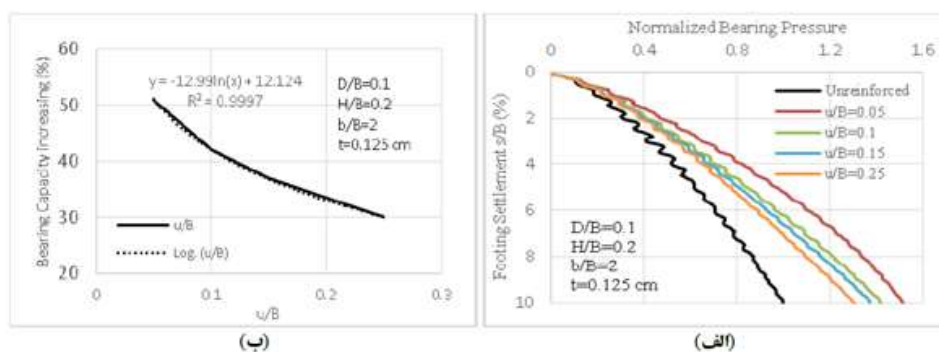
دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست



شکل شماره (۲): صحت سنجی استفاده از مدل کامپوزیت جهت مدل سازی خاک مسلح به ژئوسل

۳- تسلیح خاک با ژئوسل

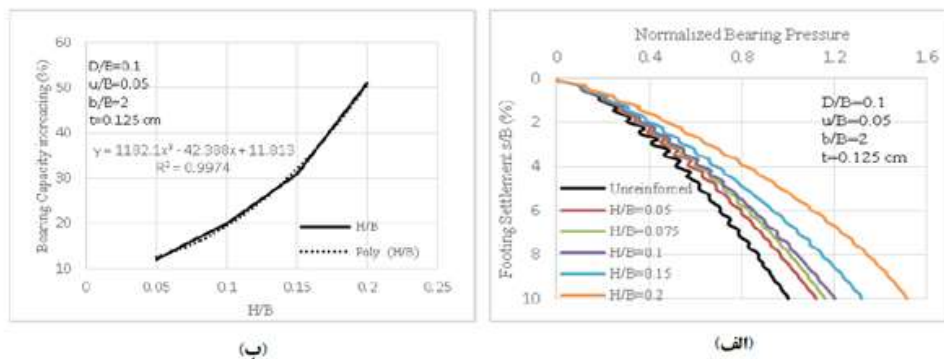
با گسترش استفاده از ژئوسینتتیک‌ها در پروژه‌های مختلف عمرانی، به تدریج تحقیقات مختلفی نیز در زمینه‌های گوناگون استفاده از این دسته از محصولات انجام شده است. بسیاری از تحقیقات انجام شده بر خاک مسلح به ژئوسل، در زمینه ظرفیت باربری است. مثلاً (غفارپور و همکاران، ۱۳۹۳) به بررسی عددی عوامل تأثیرگذار بر ظرفیت باربری خاک‌های دانه‌ای مسلح شده با ژئوسل پرداختند. بدین جهت با استفاده از نرم‌افزار سه بعدی، یک مدل کامپیوتری ساخته شد و عوامل موثر بر ظرفیت باربری پی نواری واقع بر خاک مسلح به یک لایه تسلیح کننده سه بعدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مربوط به مطالعات در زمینه عمق قرارگیری لایه ژئوسل زیر پی در شکل (۳) آمده است. در شکل زیر u عمق دفن، B عرض پی، H ارتفاع ژئوسل، D قطر سلول‌های ژئوسل و t ضخامت ژئوسل می‌باشد.



شکل شماره (۳): نتایج مربوط به عمق قرارگیری لایه ژئوسل (غفارپور و شبانی، ۱۳۹۳)

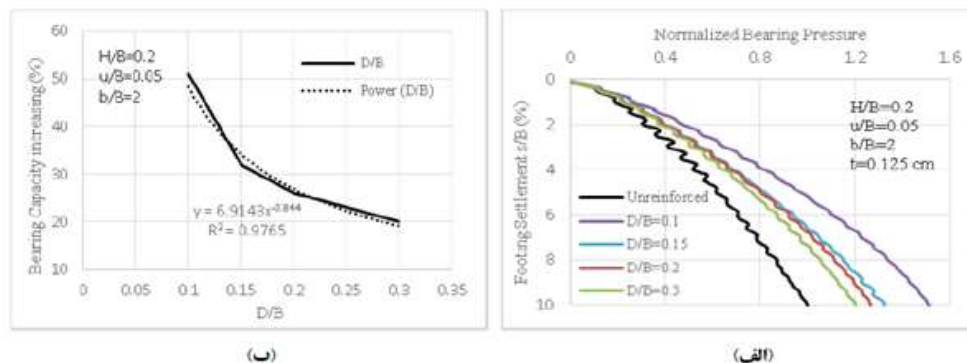
مطابق اشکال بالا، ظرفیت باربری پی نواری واقع بر خاک مسلح به ژئوسل، با افزایش عمق دفن به صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد. نتایج مربوط به ارتفاع لایه ژئوسل در شکل (۴) آمده است.

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست



شکل شماره (۴): نتایج مربوط به ضخامت لایه ژئوسل (غفارپور و شیبانی، ۱۳۹۳)

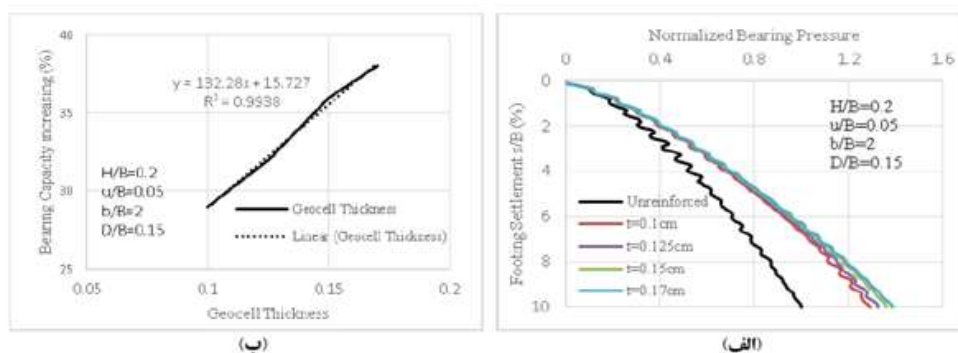
مطابق شکل بالا، با افزایش ضخامت لایه تسلیح سه بعدی، ظرفیت باربری خاک به صورت تابع چند جمله‌ای درجه دو افزایش می‌یابد. نمودارهای مربوط به تأثیر قطر بازشو بر عملکرد مسلح کننده در شکل زیر ارائه شده است.



شکل شماره (۵): نتایج مربوط به قطر بازشو لایه ژئوسل (غفارپور و شیبانی، ۱۳۹۳)

مطابق شکل (۵)، ظرفیت باربری پی واقع بر خاک دانه‌ای مسلح به ژئوسل، با افزایش قطر بازشو به صورت تابع نمایی کاهش می‌یابد.

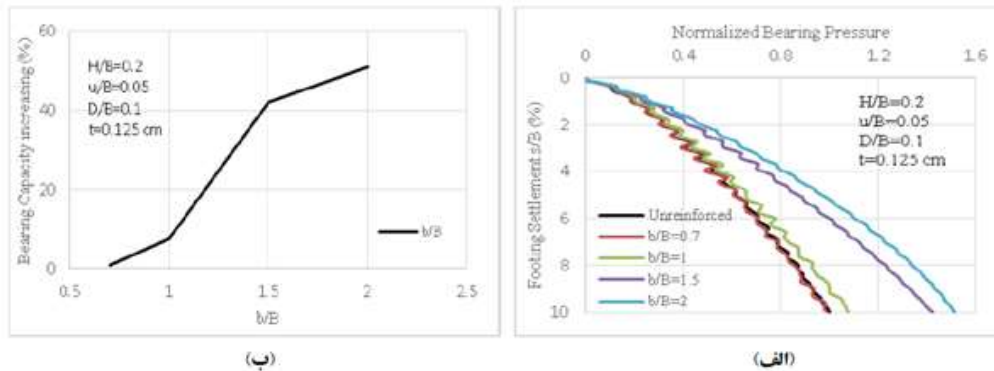
برای بررسی تأثیر ضخامت دیواره لایه ژئوسل از نتایج شکل (۶) استفاده شده، مطابق با این شکل، با افزایش ضخامت دیواره، ظرفیت باربری به صورت خطی افزایش می‌یابد.



شکل شماره (۶): نتایج مربوط به ضخامت دیواره لایه ژئوسل (غفارپور و شیبانی، ۱۳۹۳)

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

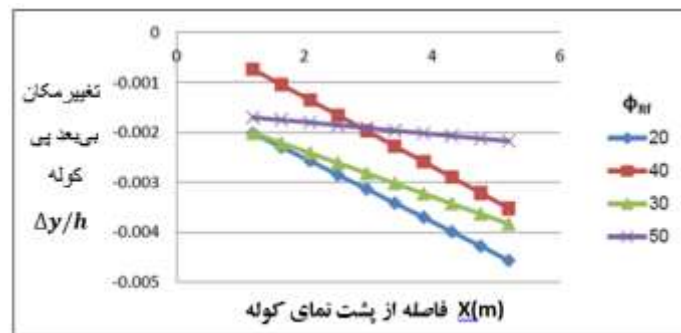
در آخر، نتایج مربوط به عرض ناحیه تسلیح سه بعدی نیز در شکل زیر آمده است:



شکل شماره (۷): نتایج مربوط به عرض ناحیه تسلیح (غفارپور و شیبانی، ۱۳۹۳)

مطابق نمودارهای بالا، در عرض‌های تسلیح برابر یا کمتر از عرض پی، تسلیح با ژئوسل تأثیر چندانی بر ظرفیت باربری خاک دانه‌ای ندارد، در حالیکه با افزایش این سطح مسلح شده تا دو برابر عرض پی، مقدار ظرفیت باربری تا ۵۰٪ زیاد می‌شود. (عنایتی و قضاوی، ۱۳۹۳) به بررسی رفتار لرزه‌ای کوله‌های مسلح به ژئوسل پرداختند. در این پژوهش تأثیر زاویه اصطکاک خاک مسلح بر کوله خاک مسلح با ژئوسل همراه با عرشه با استفاده از نرم افزار تفاضل محدود فلک مورد بررسی قرار گرفته است. کوله مورد بررسی مربوط به پروژه فاندرا/میداو است که در سال ۱۹۹۹ در شهر دنور ایالت کلرادو آمریکا ابزارگذاری و مورد بهره برداری قرار گرفته است.

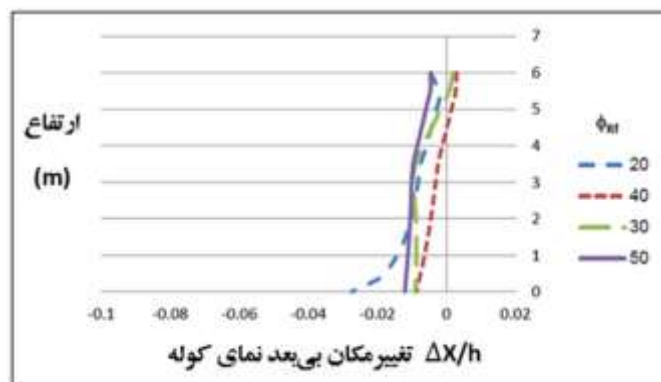
مطابق نتایج به دست آمده از این پژوهش، تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک مسلح بر حداکثر نیروی مسلح کننده‌ها در دو جهت مخالف است. با افزایش این زاویه، اصطکاک مسلح کننده با خاک افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه نیروی بیشتری به مسلح کننده اعمال می‌شود. در جهت عکس با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک مسلح، مقاومت خاک افزایش پیدا کرده و نیروی مسلح کننده‌ها کاهش می‌یابد. همچنین در تنش‌های قائم پایین‌تر که در سطوح بالای مدل وجود دارد تنش محصور کننده کم می‌باشد و ژئوسل راحت‌تر می‌تواند در اثر اصطکاک، نیرو جذب کند و باعث تغییرمکان جانبی شود، این فرآیند خود را بیشتر نشان می‌دهد. برای در نظر گرفتن اصطکاک بین ژئوسل و خاک این مقدار را در جهت اطمینان برابر با ۳/۴ زاویه اصطکاک داخلی خاک مسلح در نظر گرفته شده است. شکل (۸) تغییرات تغییرمکان پی دیوار کوله را نشان می‌دهد.



شکل شماره (۸): تغییرات تغییرمکان پی دیوار کوله به نسبت فاصله از دیوار (عنایتی و قضاوی، ۱۳۹۳)

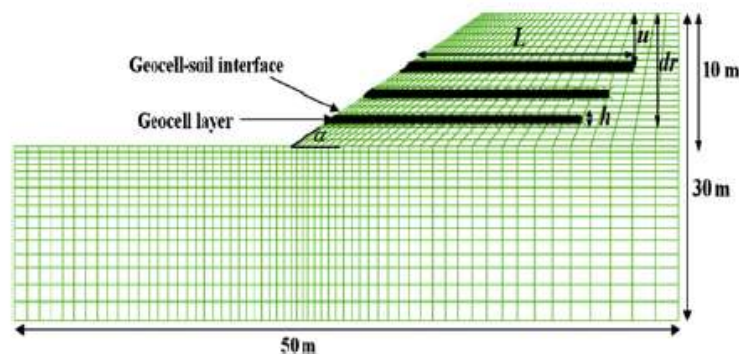
دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش زاویه اصطکاک خاک مسلح تغییرمکان قائم پی کوله در حال کاهش می‌باشد، ولی از مقداری به بعد به علت افزایش نیرو در ژئوسل مخصوصاً در نزدیکی نمای کوله تغییرمکان جانبی نمای کوله نیز همانطور که در شکل (۸) مشخص است افزایش می‌یابد. در نتیجه‌ی این اتفاق زیر پی کوله که به نما نزدیکتر است، تغییرمکان بیشتر داده و خاکش میل به جلو آمدن دارد که این باعث می‌شود که حتی در زاویه اصطکاک‌های بالاتر، دوران پی به صورت پادساعتگرد در بیاید (علامت منفی در نمودارها نشانگر جهت روبه پایین یا روبه بیرون بودن جابه‌جایی‌ها است).



شکل شماره (۹): جابه‌جایی دیوار در ارتفاع (عنایتی و قضاوی، ۱۳۹۳)

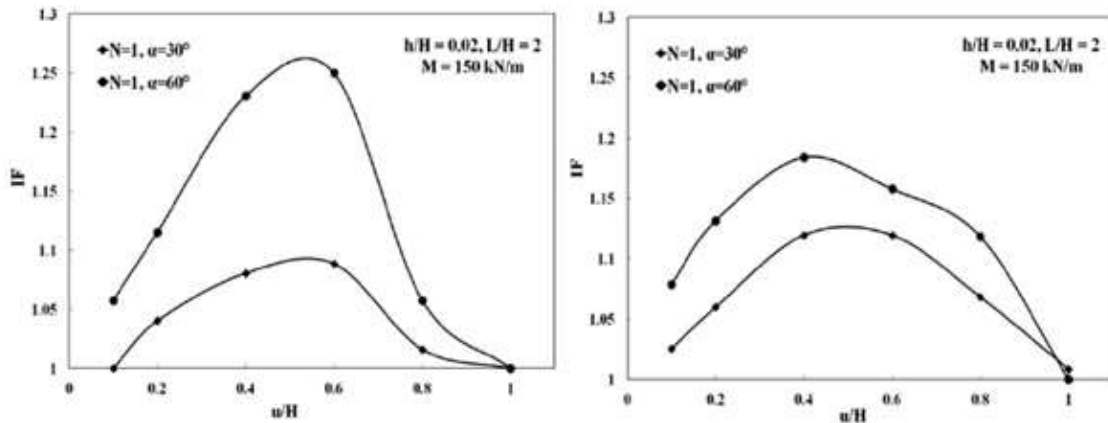
در تحقیق دیگری (مهدی پور و همکاران، ۲۰۱۳: ۲۳-۳۴) مطالعاتی در زمینه شیروانی مسلح به ژئوسل تحت رفتار استاتیکی داشتند. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار دو بعدی فلک یک شیروانی مسلح به ژئوسل با شیب ۴۵ درجه، طول ۷ متر از لبه شیب، ارتفاع ۴ متر و با مدل رفتاری موهر-کولمب شبیه‌سازی شده است. مدل کامپیوتری ساخته شده در شکل (۱۰) ارائه گردیده:



شکل شماره (۱۰): مدل پژوهش مهدی پور و همکاران (۲۰۱۳)

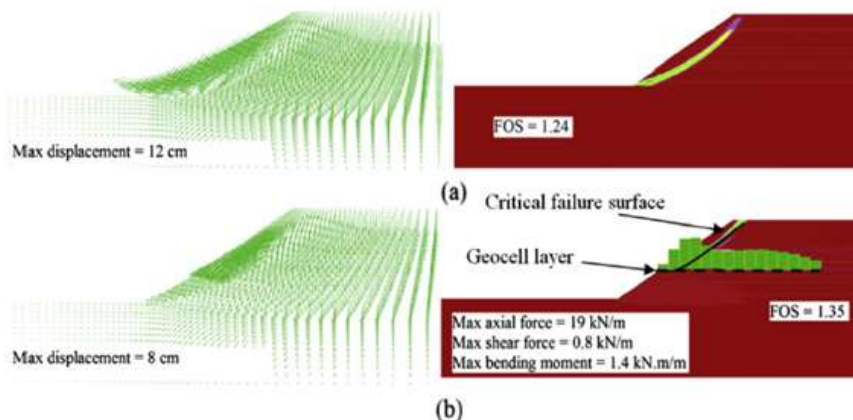
در این تحقیق، مدول یانگ و چسبندگی خاک مسلح با ژئوسل با استفاده از روش کامپوزیت (مرکب) محاسبه شده است. برای بررسی تأثیر لایه ژئوسل از ضریب بهبود (IF) استفاده شده که به صورت نسبت ضریب اطمینان پایداری شیروانی در حالت‌های مسلح و غیرمسلح بیان می‌شود. نتایج مربوط به عمق قرارگیری لایه ژئوسل برای شیروانی‌های ماسه‌ای و رسی در شکل (۱۱) آمده است.

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست



شکل شماره (۱۱): ضریب بهبود عملکرد برای خاک‌های ماسه‌ای و رسی در پژوهش مهدی پور و همکاران (۲۰۱۳)

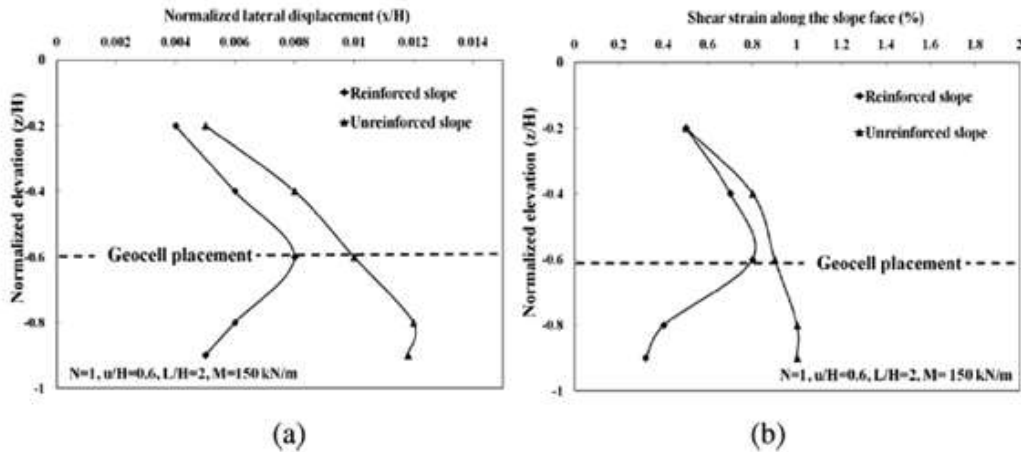
مطابق نمودارهای بالا، تا عمق مشخصی، با افزایش فاصله لایه مسلح کننده، ضریب بهبود عملکرد افزایش می‌یابد. دلیل این امر در درجه اول آن است که لایه اولیه ژئوسل، تنش‌های قائم را به صورت یکنواخت‌تر توزیع می‌کند. ضمناً مقاومت خمشی لایه تسلیح و نیز توانایی لایه مسلح کننده در تحمل تنش‌های کششی از دلایل افزایش پایداری شیروانی مسلح است، اما با افزایش عمق جاگذاری لایه مسلح کننده، ضریب اطمینان پایداری شیروانی مسلح و در نتیجه ضریب بهبود عملکرد کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش فاصله لایه اول از سطح شیروانی، توزیع یکنواخت نیرو با کیفیت قبل (فاصله کمتر لایه اول ژئوسل) صورت نمی‌گیرد. به نظر می‌رسد در هر دو نوع خاک ماسه‌ای و رسی، نسبت 0.4 ارتفاع شیروانی، بهترین مکان برای جاگذاری لایه اول ژئوسل می‌باشد. سطوح گسیختگی و بردارهای تغییر مکان مربوط به شیروانی‌های ماسه‌ای و رسی مسلح در شکل (۱۲) آمده است.



شکل شماره (۱۲): سطوح گسیختگی و بردارهای تغییر مکان برای خاک‌های دانه‌ای و رسی در تحقیق مهدی پور و همکاران (۲۰۱۳)

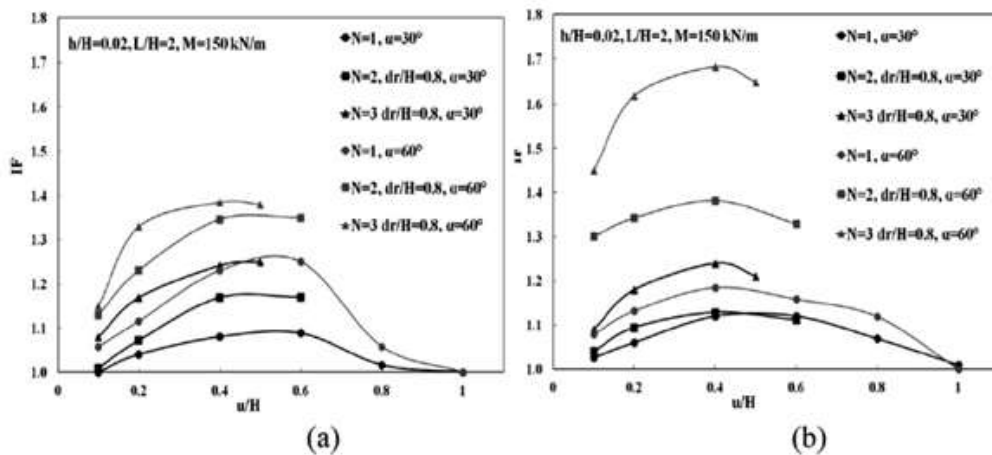
مطابق نمودارهای بالا، لایه تسلیح سه بعدی همانند یک دال عمیق عمل کرده و می‌تواند سطح شکست را کنترل کند. بدین صورت، گسیختگی فقط در ناحیه بالا به وجود می‌آید. علاوه بر آن کشش ایجاد شده در لایه ژئوسل باعث افزایش مقاومت برشی تماسی می‌گردد. بدین ترتیب ضریب اطمینان و تغییر شکل جانبی شیروانی بهبود می‌یابد. نمودارهای مربوط به تغییرات تغییر مکان جانبی شیروانی ماسه‌ای و نیز کرنش برشی در نمای آن در شکل زیر آمده است:

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست



شکل شماره (۱۳): تغییر مکان جانبی شیروانی ماسه‌ای و نیز کرنش برشی در نمای آن در تحقیق مهدی پور و همکاران (۲۰۱۳)

مطابق اشکال بالا ناحیه‌ای که در آن حداکثر تغییر مکان جانبی اتفاق می‌افتد، در شیروانی‌های مسلح و غیرمسلح متفاوت است. در شیروانی‌های غیرمسلح این حداکثر تغییر مکان جانبی عموماً در ارتفاع 0.8 ارتفاع شیروانی از بالا روی می‌دهد. اما در شیروانی‌های مسلح بسته به عمق قرارگیری لایه ژئوسل متفاوت است. در واقع در اینگونه از شیروانی‌ها، تغییر مکان از تاج شیروانی زیاد شده و در عمق لایه مسلح کننده به حداکثر می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد. دلیل آن هم این است که در پایین لایه تسلیح سه بعدی، مقاومت در برابر حرکت جانبی خاک افزایش می‌یابد و در نتیجه تغییر مکان جانبی شیروانی کم می‌گردد. تأثیر تعداد لایه مسلح کننده در پایداری شیروانی در اشکال شماره (۱۴) ارائه شده است.

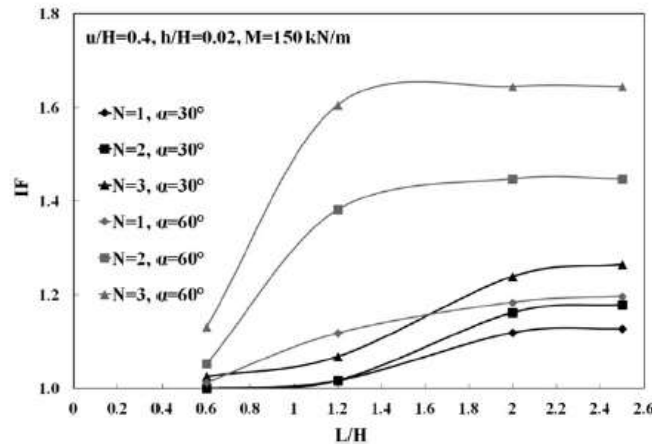


شکل شماره (۱۴): تأثیر تعداد لایه مسلح کننده در پایداری شیروانی (a) برای خاک ماسه‌ای و (b) برای خاک رسی در پژوهش مهدی پور و همکاران (۲۰۱۳)

مطابق اشکال بالا و مطابق انتظار، با افزایش تعداد لایه تسلیح، ضریب بهبود عملکرد افزایش می‌یابد. دلیل این مسئله این است که سطح تماس بیشتری بین خاک و ژئوسل به وجود می‌آید. در نتیجه مقاومت برشی بیشتری در مقابل سطح گسیختگی بسیج می‌شود و لایه مسلح کننده مانع از تغییر مکان جانبی می‌گردد. ضمناً مطابق اشکال مذکور، تعداد لایه مسلح کننده در

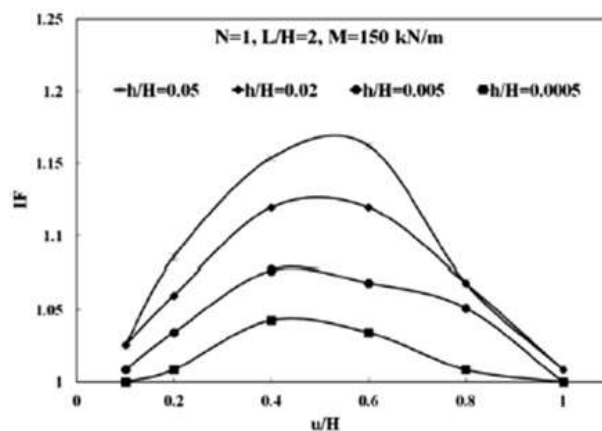
دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

هر مورد متفاوت است و بستگی به عمق قرار گیری لایه اول دارد. در واقع لایه اول صفحات گسیختگی محتمل را کنترل می‌کند و بارها را یکنواخت‌تر توزیع می‌نماید. بدین صورت با توزیع بار توسط لایه اول، بار به صورت یکنواخت اما تا اعماق بیشتر توزیع می‌شود. سپس نوبت لایه‌های زیرین است که وظیفه آن‌ها، کاهش تغییر مکان جانبی است. نتایج مربوط به تأثیر طول لایه مسلح کننده در شکل زیر آمده است.



شکل شماره (۱۵): تأثیر طول لایه مسلح کننده برای خاک رسی در پژوهش مهدی پور و همکاران (۲۰۱۳)

مطابق نمودار بالا، طبق انتظار با افزایش طول لایه مسلح کننده و به دنبال آن افزایش سطح تماس، ضریب بهبود عملکرد افزایش می‌یابد، گرچه از طول حدود ۱/۲ ارتفاع شیروانی به بعد، شیب افزایشی کم است. نمودارهای مربوط به ضخامت لایه مسلح کننده در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل شماره (۱۶): تأثیر ضخامت لایه مسلح کننده برای خاک ماسه‌ای در پژوهش مهدی پور و همکاران (۲۰۱۳)

مطابق شکل مذکور، با افزایش ضخامت (ارتفاع) لایه مسلح کننده، ضریب اطمینان و در نتیجه ضریب بهبود عملکرد ابتدا افزایش می‌یابد، زیرا سطح تماس و اصطکاک خاک و ژئوسل بیشتر می‌شود. اما در ارتفاع‌های کم بیشتر به دلیل تداخل عملکرد لایه‌های ژئوسل و توزیع بد تنش وارده، ضریب بهبود عملکرد کم می‌گردد.

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

(لشچینسکی و همکاران، ۲۰۰۹: ۱۸-۹) با استفاده از آزمایش میز ویبره به مدل‌سازی فیزیکی شیروانی‌های مسلح به ژئوسل پرداختند. آزمایش‌ها در کشور ژاپن انجام شد. باکس (جعبه) آزمایش به ابعاد ۶ متر طول، ۲ متر عرض و ۳ متر ارتفاع بود. برای کاهش بازخورد و برگشت امواج به داخل توده خاک در کف و صفحات کناری، مابین خاک و جداره باکس صفحات پلی استایرن به ضخامت ۵ میلی‌متر استفاده شده بود تا انرژی را جذب کند. ضمن اینکه برای کاهش اصطکاک بین خاک و صفحات مذکور، از صفحات گریسکاری شده استفاده شده بود. برای انجام آزمایش، تاریخچه زمانی زلزله کوبه ژاپن به شیروانی مسلح شده اعمال شد. راستای شتاب مذکور در دو جهت شمال-جنوب و بالا-پایین بوده است.

این آزمایش در پنج حالت روی شیروانی صورت گرفت. شیروانی‌ها جز در مورد آزمایش شماره ۵، دارای ۲/۸ متر ارتفاع بودند، که روی فونداسیون به ضخامت ۰/۲ متر قرار داشتند. در تست شماره ۵، ارتفاع شیروانی ۲/۷ متر بود و از ژئوسل به ضخامت ۰/۰۵ متر استفاده شده بود. در تمام موارد شیب شیروانی تقریباً ۶۴ درجه بوده است. ضمناً در تمامی موارد لایه بالایی ژئوسل ۲/۵۲ متر طول داشت که از لایه‌های زیرین بلندتر بوده است. تست‌های اول و سوم کاملاً شبیه هم بوده‌اند و اختلاف آن‌ها در ماده پرکننده ژئوسل‌ها است. بدین ترتیب که در تست اول، ژئوسل از شن متراکم پر شده اما در تست سوم از ماسه ریز پر گردیده است. بدین صورت این دو آزمایش را می‌توان نمونه‌ای از دیوارهای وزنی قلمداد کرد. در تست دوم، ژئوسل با شن پر شده و در آن از تقویت مضاعف ژئوگرید نیز بهره گرفته شده، طول لایه‌های ژئوگرید ۱/۸ متر و فاصله آن‌ها از هم ۰/۴ متر بوده است. در آزمایش چهارم، ژئوسل از ماسه‌ای شبیه ماسه شیروانی پر شده است. در تمامی موارد، خاک شیروانی، ماسه ریز یکنواخت با زاویه اصطکاک ۳۰ درجه بوده است. تست پنجم به عنوان یک تست اقتصادی مطرح بوده و حجم تسلیح آن نصف آزمایش چهارم بوده است. در این تست نیز ژئوسل نما از شن متراکم پر شده ولی ژئوسل‌های دیگر که تا درون شیروانی امتداد داشته‌اند، با ماسه‌ای همانند ماسه موجود در شیروانی پر شده‌اند. در جدول زیر، شتاب‌های وارد شده در هر تست آمده است.

جدول شماره (۱): حداکثر شتاب‌های وارد شده در هر آزمایش لشچینسکی و همکاران در سال (۲۰۰۹)

Recorded PGA in field (Fig. 1)	Test	Applied peak acceleration at base of shake table					
		Horizontal PGA at each loading stage (g)			Vertical PGA at each loading stage (g)		
		1	2	3	1	2	3
Horizontal: 0.59g, vertical: 0.34g	1	0.46	0.92	N/A	0.21	0.42	N/A
	2	0.46	0.94	1.21	0.20	0.39	0.47
	3	0.48	0.94	N/A	0.20	0.39	N/A
	4	0.47	0.95	1.22	0.20	0.37	0.48
	5	0.41	0.87	1.21	0.18	0.34	0.50

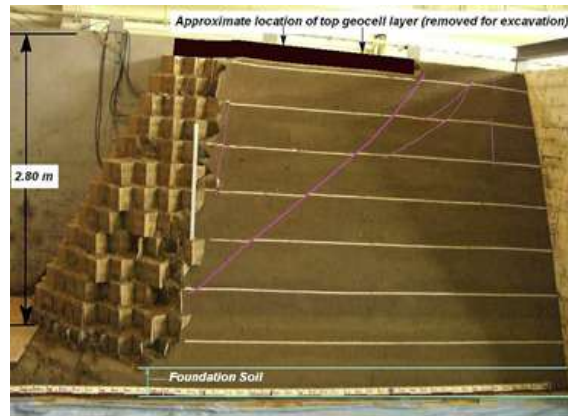
مطابق جدول بالا، در آزمایش‌های ۱ و ۳، شتاب مورد نظر در دو مرحله و با وقفه یک ساعته به شیروانی وارد شده است. در حالیکه در آزمایش‌های ۲، ۴ و ۵، شتاب مذکور در سه مرحله به شیروانی وارد شده است. پس از انجام لرزه، مقادیر حداکثر تغییرمکان دائمی نما و نیز حداکثر نشست تاج شیروانی، در هر مورد قرائت شده که نتایج آن در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول شماره (۲): حداکثر تغییرمکان دائمی نما و نیز حداکثر نشست تاج شیروانی لشچینسکی و همکاران در سال (۲۰۰۹)

Test	Maximum permanent displacement of face (mm)	Maximum settlement of crest (mm)
1	31	27
3	47	40
2	95	115
4	150	150
5	95	85

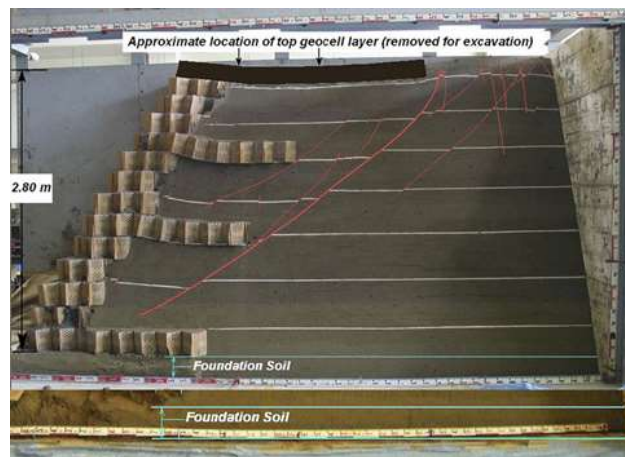
دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

مطابق جدول بالا، برای مقایسه تست‌های اول و سوم در می‌یابیم که در آزمایش اول، حداکثر تغییر مکان دائم نما و نیز حداکثر تغییر مکان تاج سد به ترتیب ۳۱ و ۲۷ میلیمتر بوده است در حالیکه همین ابعاد برای تست سوم به ترتیب ۴۷ و ۴۰ میلیمتر قرائت گردیده. در واقع استفاده از شن به عنوان خاک پر کننده به جای ماسه، باعث شده تسلیح بسیار قدرتمندتری انجام شود. می‌توان نتیجه گرفت که هر چه خاک داخل ژئوسل درشت‌تر باشد، تسلیح سه بعدی در مقابل بارهای لرزه‌ای بهتر عمل می‌کند. علاوه بر آن، در آزمایش اول که ژئوسل با شن پر شده بود، هیچ سطح گسیختگی خاصی پدید نیامد و فقط تعدادی ترک به وجود آمد که در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل شماره (۱۷): سطوح گسیختگی به وجود آمده در آزمایش سوم لشچینسکی و همکاران در سال (۲۰۰۹)

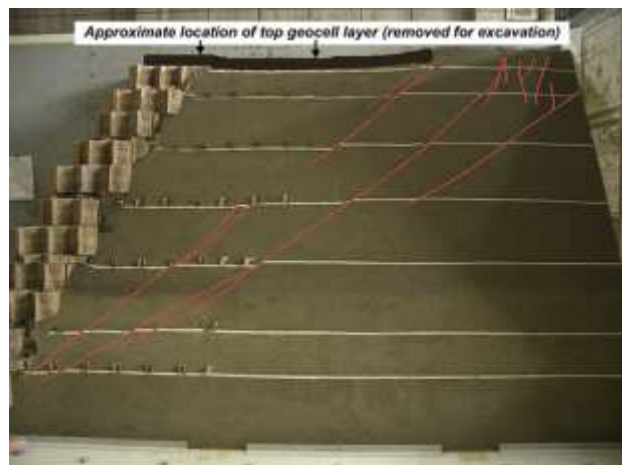
با بررسی آزمایش‌های ۲، ۴ و ۵ به نتایج جالبی دست می‌یابیم، در تست دوم، حداکثر تغییر مکان نما و نیز حداکثر تغییر مکان جانبی شیب، به ترتیب ۹۵ و ۱۱۵ میلیمتر است، در صورتی که همین ابعاد برای تست چهارم، ۱۵۰ و ۱۵۰ میلیمتر است. به علاوه در آزمایش دوم هیچ سطح گسیختگی واضحی دیده نمی‌شود و فقط ناپیوستگی‌های جزئی و ریز نزدیک به خاک سطح و پشت لایه ژئوسل مشاهده می‌گردد. اما در آزمایش چهارم (مطابق شکل (۱۸))، سطوح گسیختگی واضح مشاهده شده، این سطوح گسیختگی از زیر لایه ژئوسل شروع به گسترش می‌کند. البته در همین حالت نیز گوه گسیختگی ایجاد نشده و فقط برخی تغییر مکان‌های بزرگ، آن هم در بیشترین شتاب وارده به وجود آمده است.



شکل شماره (۱۸): سطوح گسیختگی به وجود آمده در آزمایش چهارم لشچینسکی و همکاران در سال (۲۰۰۹)

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

با مقایسه آزمایش‌های دوم و چهارم مشخص است که اولاً، به کارگیری تسلیح سه بعدی، در پایداری لرزه‌ای شیروانی‌ها موثر است به طوری که فقط در شتاب بالا می‌توان تقریباً سطوح گسیختگی را مشاهده کرد. در همین حال هم گوه گسیختگی به طور کامل تشکیل نمی‌شود و دوران رخ نمی‌دهد و فقط تغییر مکان‌های نسبتاً بزرگ پدید می‌آید، اما در صورتیکه ژئوسل با خاک دانه‌ای تر پر شود و ضمناً تسلیح مضاعف دو بعدی نیز انجام گردد. گسیختگی تقریباً به طور کامل قابل کنترل است. در تست پنجم (مطابق شکل (۱۹)) دو سری سطح گسیختگی دیده می‌شود. در ابتدا و در عمق کم، یک سطح تشکیل شده و سپس در عمق بیشتر سطح گسیختگی دوم پدید می‌آید. سطح گسیختگی اول از چهار لایه ژئوسل به ضخامت ۰/۰۵ متر گذشته است. یعنی این ضخامت کم بوده و لایه ژئوسل به قدر کافی تغییر شکل داده و خم شده تا سطح گسیختگی به وجود بیاید. این مسئله بدین معنی است که علاوه بر آنکه حجم تسلیح در پایداری شیروانی موثر است، نحوه توزیع آن هم می‌بایست بررسی گردد.



شکل شماره (۱۹): سطوح گسیختگی به وجود آمده در آزمایش پنجم لشچینسکی و همکاران در سال (۲۰۰۹)

۴- نتیجه گیری

ژئوسل یک سیستم محصور کننده سه بعدی قابل گسترش است. ژئوسل، فشار محصور کننده همه جانبه به وجود می‌آورد. این فشار محصور کننده، مقاومت غیرفعال خاک پر کننده در سلول‌های مجاور را زیاد می‌کند و اصطکاک بین خاک و دیواره ژئوسل را افزایش می‌دهد. همچنین شبکه سلولی، بار وارده بر هر سلول را بین سلول‌های دیگر تقسیم می‌نماید و بدین ترتیب توزیع بهتری از انواع بارهای وارده به مجموعه مسلح شده به ژئوسل پدید می‌آید. در نتیجه ظرفیت باربری خاک بیشتر می‌گردد. طبق مطالعات ذکر شده نتایج زیر حاصل می‌شود:

- با افزایش ضخامت لایه تسلیح سه بعدی، ظرفیت باربری خاک به صورت تابع چند جمله‌ای درجه دو افزایش می‌یابد.
- ظرفیت باربری پی واقع بر خاک دانه‌ای مسلح به ژئوسل، با افزایش قطر باز شو به صورت تابع نمایی کاهش می‌یابد.
- با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک مسلح، اصطکاک مسلح کننده با خاک افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه نیروی بیشتری به مسلح کننده اعمال می‌شود. در جهت عکس با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک مسلح، مقاومت خاک افزایش پیدا کرده و نیروی مسلح کننده‌ها کاهش می‌یابد.
- افزایش زاویه اصطکاک خاک مسلح باعث کاهش تغییر مکان قائم می‌شود.
- لایه تسلیح سه بعدی می‌تواند سطح شکست را کنترل کند، علاوه بر آن کشش ایجاد شده در لایه ژئوسل باعث افزایش مقاومت برشی تماسی می‌گردد. بدین ترتیب ضریب اطمینان و تغییر شکل جانبی بهبود می‌یابد.



دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

- با افزایش تعداد لایه تسلیح، ضریب بهبود عملکرد افزایش می‌یابد.
- با افزایش طول لایه مسلح کننده و به دنبال آن افزایش سطح تماس، ضریب بهبود عملکرد افزایش می‌یابد.
- با افزایش ضخامت (ارتفاع) لایه مسلح کننده، ضریب اطمینان و در نتیجه ضریب بهبود عملکرد افزایش می‌یابد، زیرا سطح تماس و اصطکاک خاک و ژئوسل بیشتر می‌شود.
- هر چه خاک داخل ژئوسل درشت‌تر باشد، تسلیح سه بعدی در مقابل بارهای لرزه‌ای بهتر عمل می‌کند.

مراجع

۱. غفارپور، سعید، چهرمی، شیما، "بررسی عددی عوامل تأثیرگذار بر ظرفیت باربری خاک‌های دانه‌ای مسلح شده با ژئوسل." نهمین سمپوزیم پیشرفت‌های تکنولوژی، مشهد، ۱۳۹۳.
۲. عنایتی، میلاد، قضاوی، محمود، "بررسی زاویه اصطکاک خاک مسلح در رفتار لرزه‌ای کوله‌های مسلح شده با ژئوسل با وجود عرشه." اولین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، پاییز ۱۳۹۳.
۳. Wesseloo, J. (۲۰۰۴). "The strength and stiffness of geocell support packs." Ph.D. Dissertation, University of Pretoria, Pretoria, South Africa.
۴. Bathurst, R.J., and Knight, M. A. (۱۹۹۸). "Analysis of Geocell Reinforced-Soil Covers over large Span Conduits." Computers and Geotechnics, ۲۲, ۲۰۵-۲۱۹.
۵. Rajagopal, K., Krishnaswamy, N. R., and Latha, G. M. (۱۹۹۹). "Behavior of sand confined with single and multiple geocells." Geotextiles and Geomembranes, ۱۷, ۱۷۱-۱۸۴.
۶. Henkel, D. J., and Gilbert, G. D. (۱۹۵۲). "The effect of the rubber membrane on the measured triaxial compression strength of clay samples." Geotechnique, ۳(۱), ۲۰-۲۹.
۷. Rajagopal, K., Krishnaswamy, N. R., and Madhavi Latha, G. (۲۰۰۱). "Finite element analysis of embankments supported on geocell layer using composite model." Computer methods and advances in geomechanics, C. S. Desai, T. Kundu, S. Harpalani, D. Contractor, and J. Kemeny, eds., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, ۱۲۵۱-۱۲۵۴.
۸. Madhavi Latha, G., and Rajagopal, K. (۲۰۰۷). "Parametric finite element analyses of geocell-supported embankment." Canadian Geotechnical Journal, ۴۴(۸), ۹۱۷-۹۲۷.
۹. Madhavi Latha, G., Dash, S. K., and Rajagopal, K. (۲۰۰۸). "Equivalent continuum simulations of geocell reinforced sand beds supporting strip Footings." Geotechnical and Geological Engineering, ۲۶, ۳۸۷-۳۹۸.
۱۰. Mehdipour, I., Ghazavi, M., and Ziaie Moaye, R. (۲۰۱۳). "Numerical study on stability analysis of geocell reinforced slopes by considering the bending effect." Geotechnical and Geological Engineering, ۳۷, ۲۳-۳۴.
۱۱. Leshchinski, D., Wan, J., Mohri, Y., and Rosen, A. (۲۰۰۹). "Equivalent seismic coefficient in geocell retention systems." Geotextiles and Geomembrane, ۲۶, ۹-۱۸.