



ارزیابی رفتار شالوده های دایره ای مستقر بر بستر ماسه ای مسلح شده با ژئوسل

پژمان فاضلی دهکردی^۱، محمود قضاوی^۲، نوید گنجیان^{۳*}

۱- گروه عمران، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران

۲- دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۳- دانشکده عمران، معماری و هنر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۳

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۰۱

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۲

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۱/۰۹

کلمات کلیدی:

شالوده دایره‌ای

ظرفیت باربری

ماسه

بستر صلب

ژئوسل

خلاصه: وجود بستر صلب نظیر سنگ سخت در زیر لایه‌های ماسه‌ای نسبتاً نازک و استفاده از مسلح‌کننده‌های سه بعدی (ژئوسل) می‌تواند سبب بهبود قابل توجه رفتار و ظرفیت باربری شالوده‌های سطحی گردد. در این مطالعه رفتار شالوده‌های دایره‌ای واقع بر خاک‌های ماسه‌ای نازک در حالت غیرمسلح و مسلح شده با ژئوسل مورد مطالعه قرار گرفته است. با انجام آزمون‌های بزرگ مقیاس، تأثیر ابعاد شالوده، ضخامت لایه ماسه‌ای و ژئوسل به صورت همزمان و مجزا بر میزان باربری و رفتار پی دایره‌ای بررسی شد. اثر تغییر در ضخامت لایه خاکی بر رفتار شالوده با ثابت در نظر گرفتن ابعاد و موقعیت بهینه برای ژئوسل ارزیابی گردید. بر طبق نتایج، بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست شالوده در هر دو حالت مسلح و غیرمسلح در شرایط با نسبت ضخامت لایه ماسه‌ای به عرض شالوده کمتر از دو مشاهده گردیده است. همچنین عمق اثرگذاری بستر صلب در هر دو حالت، حدود دو برابر عرض شالوده بوده است. ترکیب مسلح‌کننده ژئوسل و بستر صلب به ترتیب به عنوان عامل‌های محصورکنندگی جانبی و قائم، ظرفیت باربری را تا ۴۵٪ افزایش و نشست در نقطه گسیختگی را تا ۵۳٪ کاهش داده است. نتایج این آزمون‌ها در تعریف ضرایب جدید برای بسط روابط کلاسیک ظرفیت باربری برای شالوده‌های واقع بر خاک‌های با ضخامت کم در حالت مسلح و غیرمسلح مورد استفاده قرار گرفته و مقایسه دستاوردهای حاصل از این پژوهش با تحقیقات پیشین، سازگاری خوب آن‌ها را تأیید نموده است.

۱- مقدمه

کاهش نشست و همچنین کاهش دوران شالوده می‌گردد. برخی از پژوهش‌های در این زمینه با تمرکز بر اثر مسلح‌کننده‌های مسطح (دو بعدی) نظیر ژئوتکستایل و ژئوگرید بر رفتار شالوده‌ها صورت پذیرفته است [۲-۸]. ژئوسل به عنوان یک مسلح‌کننده سه بعدی در پایداری شالوده‌ها و خاکریزها در دهه‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است، زیرا علاوه بر محصورکنندگی در راستای قائم، می‌تواند موجب ایجاد محصورکنندگی افقی شده و مانع از حرکت جانبی خاک در زیر شالوده گردد. مطالعات صورت گرفته با استفاده از آزمایش بارگذاری صفحه بر روی شالوده‌های کوچک مقیاس واقع بر بستر مسلح شده با ژئوسل [۹-۱۲] حاکی از تأثیر سودمند آن بر افزایش باربری و کاهش نشست می‌باشد. نتایج آزمون‌های بزرگ‌مقیاس واقع بر بستر

رابطه ظرفیت باربری ارائه شده توسط ترزاقی [۱] برای شالوده واقع بر یک محیط همگن نیمه بینهایت بدون وجود هرگونه اثر محصورشدگی و یا شرایط مرزی قابل استفاده می‌باشد. در صورتی که خاک زیر شالوده تحت تأثیر محصورشدگی ناشی از وجود هرگونه مسلح‌کننده و یا یک لایه صلب در نزدیکی شالوده باشد این رابطه نیازمند اصلاحاتی خواهد بود. امروزه مسلح نمودن خاک به عنوان یک روش جایگزین مناسب به جای تثبیت نمودن خاک با روش‌های مختلف جهت افزایش توان باربری مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش با ایجاد محصورشدگی در خاک زیر شالوده منجر به افزایش باربری و

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: n.ganjian@sbiau.ac.ir



سطح زمین قرار دارد ضرایب ظرفیت باربری خاک زیر شالوده به واسطه تغییر در مکانیسم گسیختگی ایجاد شده در خاک، نیاز به اصلاح دارد. مندل و سالنسون [۱۷] رابطه (۱) را برای تعیین ظرفیت باربری شالوده نواری سطحی به عرض B و بدون عمق مدفون، واقع بر بستر ماسه‌ای به ازای $H/B \leq 1$ پیشنهاد نمودند:

$$q_{ult} = 0.5\gamma BN_{\gamma}^* \quad (1)$$

پس از آن مایرهورف [۱۸] با استفاده از نظریه مندل و سالنسون، ضریب شکل اصلاح شده (S_{γ}^*) را برای شرایط لایه‌های خاکی متکی بر بستر صلب تعریف نمود و برای شرایط $H/B \leq 1$ رابطه (۲) را جهت محاسبه S_{γ}^* پیشنهاد کرد:

$$S_{\gamma circle}^* = 1 - m_2 \left(\frac{B}{L} \right) \quad (2)$$

که در این رابطه ضریب m_2 به صورت نمودار بر حسب H/B و ϕ تعریف می‌شود و L طول شالوده می‌باشد. مایرهورف [۱۸] نشان داد که زمانی که نسبت $H/B \geq 1$ باشد آنگاه مقدار $N_{\gamma} = N_{\gamma}^*$ و $S_{\gamma}^* = 0.16$ در نظر گرفته می‌شود که این مقادیر برای شالوده‌های دایره‌ای با آنچه که ترزاقی برای بستر به ضخامت بینهایت ارائه نموده برابر می‌باشد. از این‌رو رابطه ظرفیت باربری می‌تواند به شکل زیر تعمیم داده شود :

$$q_{ult} = 0.5\gamma BN_{\gamma}^* S_{\gamma}^* \quad (3)$$

سراتو و لوتنگر [۲۳] با استفاده از آزمایش بارگذاری صفحه بر روی ماسه‌های با تراکم نسبی مختلف نشان دادند که زمانی که نسبت $H/B \approx 3$ باشد آنگاه $N_{\gamma} = N_{\gamma}^*$ می‌گردد و رابطه ظرفیت باربری ترزاقی معتبر و قابل استفاده خواهد بود. جهت در نظر گرفتن اثر بستر صلب زیر شالوده دایره‌ای در شرایط سه بعدی، سراتو و لوتنگر [۲۳] پیشنهاد نمودند که:

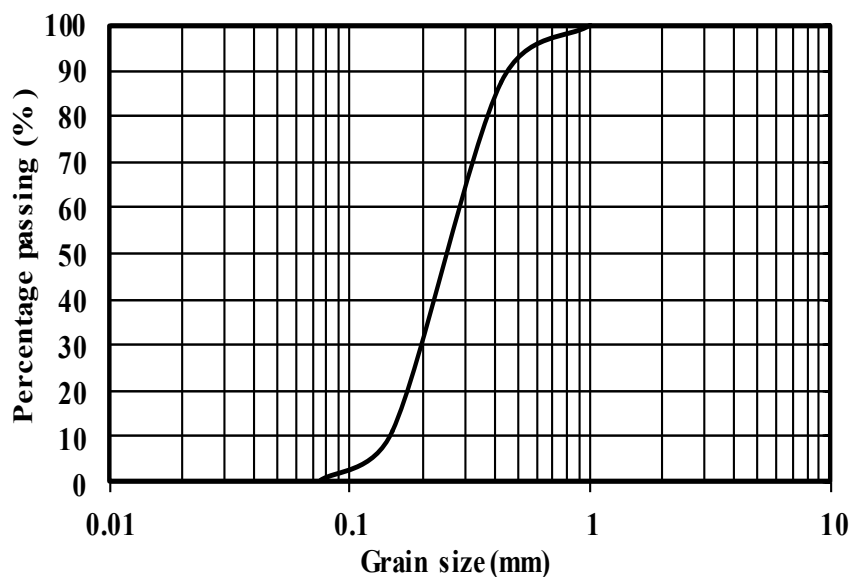
$$q_{ult} = 0.3\gamma BN_{\gamma}^* \quad (4)$$

بنابراین تأثیر وجود بستر صلب در شالوده دایره‌ای می‌تواند با استفاده از رابطه زیر ارزیابی شود:

مسلح شده با ژئوسل [۱۳-۱۶] نشان‌دهنده تأثیرپذیری ژئوسل ناشی از اندازه شالوده و تأثیر مقیاس در کارایی و راندمان ژئوسل می‌باشد. لازم به ذکر است در تمامی تحقیقات اشاره شده، اثر مسلح‌کننده بر میزان باربری شالوده‌های واقع بر محیط خاکی به ضخامت بینهایت و بدون هر گونه اثرات مرزی یا محصورشدگی دیگری مطالعه شده است. از سوی دیگر وجود یک لایه خاکی افقی صلب نظیر یک سنگ سخت در نزدیکی سطح زیر شالوده باعث تغییر در شکل مکانیسم گسیختگی، افزایش میزان باربری و کاهش نشست خاک زیر شالوده می‌گردد. مندل و سالنسون [۱۷] اولین بار با استفاده از تئوری پلاستیسیته، ظرفیت باربری خاک‌های به ضخامت محدود را مطالعه نمودند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که ضرایب ظرفیت باربری خاک‌های ماسه‌ای واقع بر بستر صلب (N_{γ}^*) تابعی از نسبت ضخامت لایه ماسه‌ای به عرض شالوده (H/B) و همچنین زاویه اصطکاک داخلی ماسه (ϕ) می‌باشد. تحقیقات آزمایشگاهی متعدد بر روی شالوده‌های سه بعدی واقع بر ماسه‌های به ضخامت محدود [۱۸-۲۶] حاکی از آن است که وجود بستر صلب می‌تواند بر هر دو پارامتر ضریب شکل (S_{γ}^*) و ضریب ظرفیت باربری (N_{γ}^*) تأثیر قابل ملاحظه‌ای اعمال نماید. وجود انواع مختلف محصورشدگی به صورت همزمان می‌تواند باعث باربری بیشتر و همچنین نشست کمتر شود. باش و جنر [۲۷] با انجام تحلیل خطوط لغزش، اثر همزمان بستر صلب و ژئوسل را بر ظرفیت باربری لایه رسی بررسی کردند و نشان دادند که ژئوسل می‌تواند اثر چشمگیری در کاهش میزان نشست داشته باشد. در هر حال بررسی اثر همزمان ژئوسل و بستر صلب به عنوان دو عامل مختلف محصورشدگی بر روی رفتار شالوده‌های واقع بر ماسه هنوز مورد مطالعه قرار نگرفته است. در این پژوهش با استفاده از انجام آزمون‌های بزرگ‌مقیاس، منحنی‌های بار-نشست شالوده‌های دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای به ضخامت محدود و مسلح با ژئوسل مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف از انجام این پژوهش (۱) بررسی توان باربری و نشست شالوده‌های واقع بر بستر مسلح در حضور و عدم وجود بستر صلب؛ (۲) بسط روابط ظرفیت باربری کلاسیک با در نظر گرفتن اثر همزمان و مجزای ژئوسل و بستر صلب می‌باشد.

۲- مرور ضرایب ظرفیت باربری

مطابق با تحقیقات پیشین زمانی که یک بستر صلب در نزدیکی



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی برای ماسه
Fig. 1. Grain size distribution curve of sand

بار آزمایش سه محوری و استخراج متوسط نتایج آزمایش در شرایط زهکشی شده بر روی نمونه با ۶۸٪ تراکم نسبی و نسبت تخلخل ۰/۶۵ حاصل گردیده است. طبقه بندی این ماسه و انجام آزمایش سه محوری به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM D2487-11 [۲۸] و [۲۹] ASTM D7181-11 صورت پذیرفته است. شکل ۱ نمودار دانه‌بندی خاک مذکور را نشان می‌دهد.

ژئوسل مورد استفاده در این مطالعه از نوع پلی اتیلن با چگالی بالا (HDPE) و ساخت شرکت مدیترانه‌ای PRS است که مشخصات آن در جدول ۱ خلاصه شده است. به جهت پیش ساخته بودن این نوع ژئوسل، مقاومت و پیوستگی یکنواخت و کاربرد بالای آن در مقاصد عملی، مورد استفاده این تحقیق قرار گرفت. مسلح‌کننده به صورت زبر و سوراخ دار بوده و قطر این سوراخ‌ها به میزان ۱۰ mm و فواصل مرکز به مرکز سوراخ‌ها برابر با ۱۲ mm می‌باشد. چشمه‌های ژئوسل با سطح مقطع 26200 mm^2 به یکدیگر جوش خورده و تشکیل یک لایه یکنواخت ژئوسل را می‌دهند. قطر معادل هر کدام از چشمه‌های ژئوسل برابر با ۱۸۳ mm می‌باشد. جهت تعیین مقاومت کششی ژئوسل از یک دستگاه آزمایش کششی کالیبره شده استفاده و آزمون با نرخ کرنش $10\%/min$ انجام شد. مقاومت کششی ژئوسل بر اساس استاندارد ASTM D۶۸۸۵-۱۱ [۳۰] تعیین و نتایج حاصل از آن در شکل شماره ۲ ارائه شده است.

$$q_{ult} = 0.3\gamma BK_{\gamma} N_{\gamma} \quad (۵)$$

که در این رابطه K_{γ} ضریب اصلاح ظرفیت باربری ناشی از بستر صلب معرفی می‌شود.

در مطالعه حاضر با توجه به وجود ژئوسل و همچنین بستر صلب به صورت همزمان یا مجزا در نزدیکی شالوده، اثرات وجود مسلح‌کننده با تعریف ضریب R_{γ} و اثر بستر صلب با اعمال ضریب K_{γ} به شکل زیر در روابط ظرفیت باربری کلاسیک وارد شده‌اند:

$$q_{ult} = 0.3\gamma BN_{\gamma}^* R_{\gamma} = 0.3\gamma BR_{\gamma} K_{\gamma} N_{\gamma} \quad (۶)$$

که در این رابطه در صورتی که هر کدام از اثرات مسلح‌کننده و بستر صلب وجود نداشته باشد، ضریب متناظر با آن برابر با یک در نظر گرفته می‌شود.

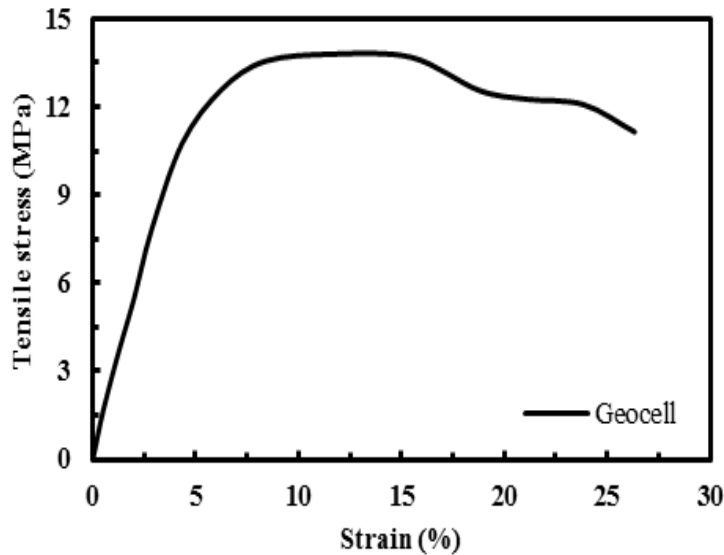
۳- مدل‌سازی فیزیکی

۳-۱- مشخصات مصالح

در این مطالعه از ماسه ریز با مشخصات ارائه شده در جدول شماره ۱ استفاده شده است. زاویه اصطکاک داخلی این ماسه از انجام سه

جدول ۱. مشخصات مواد مصرفی
Table 1. Materials characteristics

مشخصه	مقدار	پارامترها	کمیت
ماسه (SP)		ژئوسل	Polyethylene
ضریب یکنواختی منحنی دانه‌بندی C_u	۱/۶۵	Polymer	۲۵۰×۲۱۰
ضریب انحناء منحنی دانه‌بندی C_c	۰/۸۴	اندازه چشمه‌ها (mm)	۱۵۰
حداکثر نسبت تخلخل e_{max}	۰/۹۱	ارتفاع چشمه‌ها (mm)	۱۸۳
حداقل نسبت تخلخل e_{min}	۰/۵۳	قطر معادل چشمه‌ها (mm)	۱/۵
وزن مخصوص خشک γ_d (kN/m ³)	۱۵/۶۴	ضخامت نوارها (mm)	۰/۹۴
زاویه اصطکاک داخلی ϕ (degree)	۳۶	چگالی (gr/cm ³)	۲۱
توده ویژه G_s	۲/۶۳	مقاومت تسلیم (kN/m)	۲۷۰
تراکم نسبی D_r (%)	۶۸	مدول ارتجاعی (MPa)	

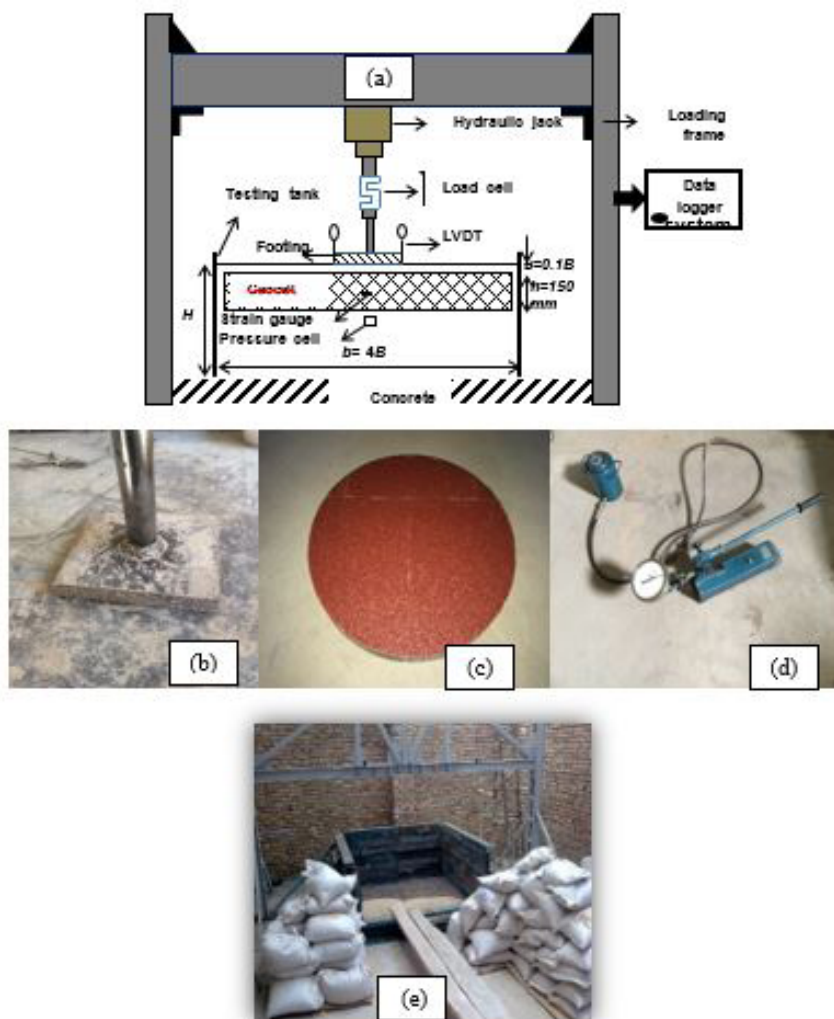


شکل ۲. منحنی تنش- کرنش مربوط به انجام آزمایش کشش بر روی ژئوسل
Fig. 2. Tensile stress- strain curve of geocell

۳-۲- مشخصات مدل

تنش قائم در عمق حدوداً $2B$ در زیر شالوده دایره‌ای به میزان کمتر از $0/1$ برابر شدت تنش اعمالی روی شالوده می‌رسد. در نتیجه عمق جعبه آزمایش نیز بزرگ‌تر از این مقدار پیش‌بینی شد. جعبه آزمایش از ورق فلزی ضخیم تشکیل شده که جداره جعبه توسط پشت بند و کمربندهای فولادی مهار و به یکدیگر متصل شده‌اند. این عملیات جهت حصول از میزان صلبیت جعبه آزمایش انجام پذیرفت. کف جعبه آزمایش از جنس بتن ضخیم کاملاً زیر در نظر گرفته شد. این جعبه به یک قاب فلزی صلب همراه با یک جک هیدرولیک دستی متصل گردید. به منظور مدل‌سازی شالوده در آزمون‌ها از یک ورق

در مطالعه حاضر مدل‌سازی فیزیکی جهت انجام آزمایش بارگذاری صفحه روی بستر غیرمسلح و مسلح شده با ژئوسل انجام پذیرفت. در ساخت مدل فیزیکی تلاش شد تا بار به صورت کاملاً عمودی و بدون خروج از مرکزیت بر روی شالوده اعمال گردد. همچنین ابعاد جعبه بارگذاری متناسب با ابعاد شالوده و به گونه‌ای انتخاب گردید که اثرات مرزی بر روی رفتار شالوده تحت بارگذاری قابل چشم‌پوشی باشد. به همین جهت ابعاد جعبه آزمایش برابر با 2400×2400 mm و ارتفاع 1400 mm انتخاب گردید. مطابق با نظریه کودتو و همکاران [۳۱]



شکل ۳. مدل سازی فیزیکی برای آزمون‌ها، (a) ابعاد مسلح کننده، موقعیت کرنش سنج و فشارسنج، سلول اندازه گیری بار و تغییر مکان سنج‌ها، (b) قاب عکس العمل، (c) چکش جهت تراکم خاک، (d) شالوده دایره‌ای زبر و کاغذ سمباده، (e) جک بارگذاری

Fig. 3. Experimental setup for tests, (a) geocell dimensions ranges, location of strain gauge and pressure cell, load cell and LVDTs used, (b) reaction frame, (c) hammer for generating density, (d) rough circular footing and rough sand paper, (e) loading jack

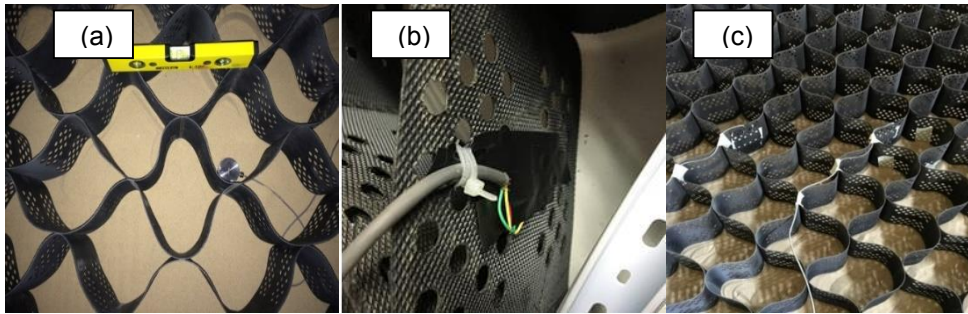
شکل یک نیمکره مقعر بوده و لبه محدب شفت در آن قرار می‌گیرد. دو لبه محدب شفت و لبه مقعر شالوده کاملاً صاف و صیقلی بوده و جهت جلوگیری از هر گونه اصطکاک، توسط گریس روغن کاری شده است. از این طریق در طول بارگذاری، اتصال شالوده به صورت مفصلی و شالوده آزادانه قابلیت دوران خواهد داشت. بار از طریق قاب صلب عکس العمل، به شالوده انتقال می‌یابد. جزئیات مربوط به مدل سازی فیزیکی و همچنین تصاویر جک بارگذاری، شالوده دایره‌ای، جعبه آزمون و چکش مورد استفاده جهت تراکم در شکل ۳ ارائه شده است.

فلزی دایره‌ای به ضخامت ۳۰ mm و به قطر ۴۰۰ mm استفاده شد. لازم به ذکر است قطر شالوده به گونه‌ای انتخاب گردیده است که مقدار آن تقریباً دو برابر قطر معادل یک سلول ژئوسل باشد. بنابراین تمامی دیواره‌های یک سلول کاملاً توسط لبه‌های خارجی شالوده پوشیده شده و در زیر بارگذاری قرار می‌گیرند. به جهت تأمین زبری کف شالوده از یک کاغذ سمباده کاملاً زبر استفاده گردید و شالوده مستقیماً بر روی سطح ماسه قرار داده شد. جهت انتقال بار به شالوده، از یک شفت صلب با لبه نیمکره محدب استفاده شد. وسط شالوده به

جدول ۲. برنامه انجام آزمون‌ها

Table 2. Test series

هدف	تعداد آزمون‌ها	نوع مسلح‌کننده	H/B	اندازه شالوده	سری‌های آزمون
جهت بررسی اثر H/B	*۴+۱	غیرمسلح	۳, ۲, ۱, ۰/۵	mm۴۰۰B=	۱
جهت ارزیابی اثر ژئوسل و H/B	*۳+۱	مسلح شده با ژئوسل	۳, ۲, ۱	mm۴۰۰B=	۲



شکل ۴. نمایش (a) مسلح‌کننده ژئوسل، (b) کرنش‌سنج، (c) فشارسنج

Fig. 4. Schematic of; (a) geocell reinforcement, (b) strain gauge, (c) pressure cell

کوچکتر بوده و بتوان ماسه درون سلول‌های مسلح‌کننده را به راحتی متراکم نماید. در هر لایه سعی شد تا با قرار دادن ظروف کوچک آزمایشگاهی درون لایه‌های خاکی و اندازه‌گیری تراکم نسبی خاک درون این ظروف، از میزان تراکم ایجاد شده در لایه‌ها اطمینان حاصل شود. پس از متراکم شدن بستر تا تراز مسلح‌کننده، ژئوسل درون جعبه آزمایشگاهی به گونه‌ای قرار داده شد که تمامی چشمه‌های آن در حالت کاملاً باز قرار داشت. سپس با روش مشابه، عملیات متراکم کردن خاک درون سلول‌های ژئوسل انجام پذیرفت (شکل ۴a). در این مرحله تلاش شد ضربات چکش با احتیاط اعمال گردد تا منجر به آسیب رسیدن به لایه مسلح‌کننده نشود. به دلیل ابعاد چکش و همچنین عدم زوایای قائم در شکل سلول‌ها، عملیات تراکم خاک درون ژئوسل می‌تواند به نحو مناسبی انجام پذیرد. در انتها تلاش شد تا به وسیله یک ماله دستی و بدون اعمال هر گونه فشار اضافی، سطح بستر متراکم شده تراز و مسطح گردد. تراکم نسبی حاصل شده حدود $68 \pm 2\%$ متناظر با وزن واحد حجم $15/64 \text{ kN/m}^3$ بوده که این میزان تراکم در دامنه تراکم متوسط خاک می‌باشد. بر اساس پیشنهاد دس [۳۲] خاک‌های با تراکم متوسط می‌تواند برای مسلح کردن مناسب باشند. با توجه به مطالعات پیشین میزان کارایی ژئوسل

۳-۳- روش انجام آزمایش

جهت اندازه‌گیری تغییرمکان شالوده‌ها در زمان بارگذاری، از دو تغییرمکان‌سنج خطی^۱ در دو طرف شالوده در راستای یک قطر استفاده شد (شکل ۳). متوسط نشست شالوده توسط این دو تغییرمکان‌سنج اندازه‌گیری شد. تغییرمکان‌سنج‌ها به یک دستگاه ثبت اطلاعات دیجیتال^۲ متصل گردید. به دلیل حجم بالای جعبه آزمون، جهت تأمین تراکم خاک بستر از روش وزنی استفاده شد که در این روش وزن معینی از خاک با تراکم مورد نظر در یک حجم مشخصی قرار می‌گیرد. جهت ایجاد تراکم یکنواخت، جعبه آزمایش که چهار وجه آن از قبل مدرج شده است توسط لایه‌های به ضخامت ۱۰۰ mm پر شده است. به منظور تأمین دانسیته مورد نظر در سطح جعبه آزمایشگاهی در هر لایه، خاک مربوط به هر لایه که از قبل وزن شده است به صورت یکنواخت در هر لایه توزیع و سپس توسط یک چکش به ابعاد mm ۱۵۰×۱۵۰ متراکم شده تا در حجم مشخص شده و ضخامت مورد نظر و در نتیجه تراکم مورد نیاز تأمین گردد (شکل ۳c). ابعاد چکش جهت تراکم به گونه‌ای انتخاب شد که از ابعاد سلول‌های ژئوسل

1 LVDTs

2 Data logger

قبول است.

* جهت صحت‌سنجی تکرارپذیری آزمون‌ها، برخی از مدل‌های فیزیکی دو بار انجام شده است

۴- بررسی و تحلیل نتایج

۴-۱- مقادیر بی‌بعد

به منظور سهولت در ارائه نتایج آزمون‌ها و ارزیابی اثر مسلح‌کننده ژئوسل و بستر صلب (به صورت همراه با هم یا اثر جداگانه)، دو پارامتر نسبت ظرفیت باربری بی‌بعد (BCR_b و BCR)^۳ و درصد بهبود نشست (PRS)^۴ قابل تعریف می‌باشد. جهت بررسی اثر مسلح‌کننده و بستر صلب بر میزان باربری شالوده، مقادیر نسبت‌های ظرفیت باربری بی‌بعد به صورت دو رابطه زیر قابل تعریف است:

$$BCR = \frac{q_{u-Rein.b}}{q_{u-Unrein.b}} \quad (7)$$

$$BCR_b = \frac{q_{u-Rein.}}{q_{u-Unrein.b}} \quad (8)$$

که در این روابط $q_{u-Unrein.b}$ ظرفیت باربری شالوده واقع بر بستر غیرمسلح متکی بر بستر صلب، $q_{u-Rein.b}$ و $q_{u-Rein.}$ ظرفیت باربری همان شالوده واقع بر بستر مسلح به ترتیب در حضور و یا عدم حضور بستر صلب در همان میزان نشست می‌باشد.

جهت بررسی اثر مسلح‌کننده و بستر صلب بر روی بهبود میزان نشست شالوده، پارامتر بی‌بعد PRS به شکل زیر بیان می‌شود:

$$PRS = \left(\frac{S_{Unrein.} - S_{Rein.}}{S_{Unrein.}} \right) \times 100 \quad (9)$$

که در این رابطه $S_{unrein.}$ میزان نشست شالوده واقع بر بستر غیرمسلح و متناظر با ظرفیت باربری در حضور و یا عدم حضور بستر صلب، $S_{rein.}$ نشست همان شالوده واقع بر بستر مسلح متناظر با ظرفیت باربری بستر غیرمسلح.

جهت بررسی اثر بستر صلب بر روی ظرفیت باربری ماسه غیرمسلح و مسلح، ضریب اصلاح ظرفیت باربری به صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود:

زمانی حداکثر خواهد بود که نسبت عرض ژئوسل به قطر شالوده و همچنین نسبت عمق مدفون ژئوسل به قطر شالوده به ترتیب برابر با $b/B=4$ و $u/B=0.1$ باشد [۳۳]. به همین خاطر ژئوسل با ابعاد 1600×1600 mm در عمق $0.1B$ مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به قطر معادل ژئوسل (۱۸۳ mm)، نسبت ارتفاع (h) و اندازه چشمه ژئوسل (d) بر حسب تابعی از ابعاد شالوده به ترتیب برابر با $H/B=0.38$ ، $D/B=0.146$ می‌باشد. از آنجایی که ژئوسل مورد استفاده به صورت پیش‌ساخته و تجاری است، لذا ایجاد مقادیر بهینه برای نسبت‌های H/B و D/B مهیا نمی‌باشد. آزمون‌ها به گونه‌ای انجام پذیرفت که مرکز شالوده دقیقاً منطبق بر مرکز یک سلول ژئوسل قرار گیرد. میزان ظرفیت باربری برای لایه ماسه‌ای به ضخامت محدود متناظر با نشست معادل ۱۰٪ عرض شالوده ($S/B=10\%$) [۳۴] تعیین گردیده است. جهت اندازه‌گیری فشارهای منتقل شده به خاک، یک فشارسنج^۱ کوچک مقیاس کالیبره شده بلافاصله در زیر لایه مسلح‌کننده در زیر مرکز شالوده قرار داده شد تا بتوان میزان توزیع تنش در عمق مورد نظر را با وجود و بدون حضور مسلح‌کننده اندازه گرفت. این فشارسنج در عمق ۱۹۰ mm از سطح زمین قرار داده شد (شکل ۳). کرنش محوری ایجاد شده در ژئوسل ناشی از بارگذاری، توسط یک کرنش‌سنج^۲ کالیبره شده با مقاومت نرمال 120Ω اندازه‌گیری شد. کرنش‌سنج در جهت افقی بر روی سطح خارجی ژئوسل و در میانه ارتفاع دیواره چسبانده شد. اطلاعات مربوط به کرنش‌سنج و فشارسنج نیز توسط دستگاه ثبت اطلاعات اندازه‌گیری گردید. شکل ۴ جزئیات مربوط به نوع مسلح‌کننده و ابزار دقیق‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد.

۴-۳- برنامه انجام آزمون‌ها

در این تحقیق ۹ آزمون آزمایشگاهی انجام شده است که ۵ آزمون در شرایط غیرمسلح و ۴ آزمون در شرایط مسلح صورت پذیرفته است. در هر آزمون، عمق بستر صلب به عنوان متغیر در نظر گرفته شده است. به منظور صحت‌سنجی و اطمینان از نتایج آزمون‌ها، تکرارپذیری بر روی برخی از آزمون‌ها صورت پذیرفته است (جدول ۲). تکرارپذیری در آزمون‌ها ۳-۶٪ انحراف در نتایج حاصل شده را نشان می‌دهد که این دامنه در مقاصد عملی مهندسی ژئوتکنیک قابل

3 Bearing Capacity Ratio
4 Percentage Reduction of Settlement

1 Pressure cell
2 Strain gauge

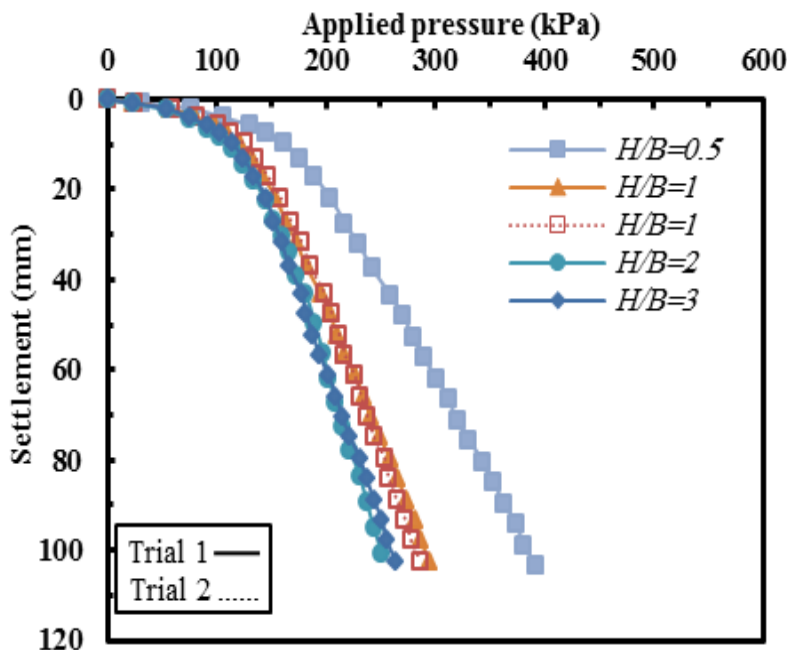
باربری کاهش می‌یابد و این روند کاهش تا نسبت $H/B=2$ ادامه دارد. این نسبت می‌تواند به عنوان مقدار بحرانی عمق بستر صلب در نظر گرفته شود. به عبارت دیگر در عمق بحرانی با افزایش بیشتر نسبت H/B ، تغییری در میزان ظرفیت باربری اتفاق نمی‌افتد. بنابراین انجام آزمایش‌ها با شرایط $H/B \geq 2$ معرف انجام آزمون‌های بدون حضور بستر صلب تلقی شده است. مرور ادبیات تحقیقاتی پیشین حاکی از آن است که در حالت کلی ظرفیت باربری شالوده دایره‌ای زمانی که $H/B=1/5-3$ باشد به سمت مقدار ثابت میل می‌نماید. این دامنه وابسته به میزان تراکم نسبی و مشخصات خاک زیر شالوده می‌باشد. تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که در شرایط ثابتی از مشخصات خاک و تراکم نسبی، با افزایش عرض شالوده‌ها، میزان عمق بحرانی کاهش می‌یابد. این مسأله می‌تواند ناشی از تغییر در مکانیسم گسیختگی و متوسط تنش ایجاد شده در زیر شالوده‌های با اندازه‌های مختلف باشد. در شالوده‌های بزرگتر پیش‌روندگی گسیختگی در طول سطوح لغزش دارای مقدار کوچکتری است و مقاومت برشی متوسط کمتری نسبت به شالوده‌های کوچکتر در طول این سطوح بسیج می‌شود. از سوی دیگر با افزایش عرض شالوده، مقدار ضریب ظرفیت باربری N_γ کاهش می‌یابد. این کاهش ناشی از افزایش سطح تنش زیر شالوده، کاهش

$$K_\gamma = \frac{N_\gamma^*}{N_\gamma} \quad (10)$$

که N_γ و N_γ^* به ترتیب ضرایب ظرفیت باربری شالوده واقع بر خاک غیرمسلح در حضور و غیاب بستر صلب می‌باشد.

۲-۴- تأثیر بستر صلب بر باربری لایه ماسه‌ای غیرمسلح

اطلاعات مربوط به منحنی تنش-نشست برای آزمون‌های سری اول در شکل شماره ۵ نشان داده شده است. منظور از Trial در این شکل، تکرارپذیری برخی از آزمون‌ها بوده (مطابق جدول شماره ۲) که در دو مرتبه انجام شده است. نقطه گسیختگی واضحی بر روی این منحنی‌ها دیده نمی‌شود و این مسأله می‌تواند ناشی از مکانیسم گسیختگی در زیر شالوده و تأثیر ابعاد شالوده بر روی رفتار خاک باشد. جهت تعیین ضریب ظرفیت باربری N_γ^* مقادیر ظرفیت باربری متناظر با $S/B=10\%$ از روی منحنی‌ها تعیین و در رابطه (۴) جایگزین شده است. مقدار ظرفیت باربری نهایی بر اساس تعریف اشاره شده در محدوده ۱۷۲ تا ۲۵۱ KPa به ازای تمامی مقادیر H/B اتفاق می‌افتد. حداکثر میزان ظرفیت باربری در آزمون‌های سری اول در شرایط $H/B=0/5$ به وقوع پیوسته است و با افزایش نسبت H/B مقدار ظرفیت



شکل ۵. تغییرات منحنی‌های تنش-نشست برای شالوده دایره‌ای واقع بر بستر غیرمسلح برای نسبت‌های مختلف H/B

Fig. 5. Pressure-settlement variation for circular footing on unreinforced bed for various H/B ratios



شکل ۶. نمایش تغییرمکان و بالازدگی خاک اطراف شالوده به واسطه بارگذاری تا نقطه گسیختگی در شرایط $H/B=3$

Fig. 6. Schematic of displacement and upward deformation around footing due to loading up to failure point at $H/B=3$

جدول ۳. مقایسه ضریب ظرفیت باربری N_{γ}^* برای شالوده دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای غیرمسلح به ضخامت محدود

Table 3. Comparison of N_{γ}^* for circular footing on limited unreinforced sand layer

مرجع	قطر شالوده (mm)	دامنه H/B	دامنه N_{γ}^*	H_{cr}	توضیحات
میرهوف [۱]	۷۶	۰/۲۵-۲/۱	۱۳۵۰-۶۴	-	$\phi=38^{\circ b}$
هانا [۲]	۵۰	۰-۲	۲۰۷-۵۹	-	$\phi=38^{\circ b}$, $D_f=78\%$
سیراج آلدین و بوترو [۳]	۵۰	۰/۵-۲/۱	۸۲۴-۱۱۷	۲	$\phi=35^{\circ a}$, $D_f=71\%$, $D_{\Delta}=0/7$ mm
	۵۶	۰/۵-۲/۲	۷۸۴-۱۱۱	۲	$\phi=35^{\circ b}$, $D_f=71\%$, $D_{\Delta}=0/7$ mm
سراتو و لوتنگر [۴]	۱۰۲	۰/۵-۴	۳۰۷۵-۳۷۸	۳	$\phi=40/8^{\circ b}$, $D_f=24\%$, $D_{\Delta}=0/7$ mm
	۱۰۲	۰/۵-۴	۴۷۳۰-۵۶۸	۳	$\phi=44/5^{\circ b}$, $D_f=57\%$, $D_{\Delta}=0/7$ mm
	۱۰۲	۰/۵-۴	۴۹۵۸-۶۸۲	۳	$\phi=46^{\circ b}$, $D_f=87\%$, $D_{\Delta}=0/7$ mm
مطالعه حاضر	۱۵۲	۳	۲۵۲	۳	$\phi=46^{\circ b}$, $D_f=87\%$, $D_{\Delta}=0/7$ mm
	۳۰۵	۰/۲۵-۱/۵	۱۱۴۱-۱۹۵	۳	$\phi=46^{\circ b}$, $D_f=87\%$, $D_{\Delta}=0/7$ mm
	۴۰۰	۰/۵-۳	۱۳۶-۹۳	۲	$\phi=36^{\circ}$, $D_f=68\%$, $D_{\Delta}=0/25$ mm

[۳۶، ۳۵].

شکل شماره ۶ تغییرمکان خاک زیر شالوده را در نقطه گسیختگی به واسطه بارگذاری در ماسه غیرمسلح در شرایط $H/B=3$ نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این شکل مشخص است بالازدگی در خاک اطراف شالوده در سطح بستر مشاهده می‌شود که این مسأله حاکی از وقوع احتمالی گسیختگی برشی کلی در خاک تحت بارگذاری می‌باشد. میزان عرض بالازدگی در سطح خاک با کاهش نسبت H/B کاهش یافت که این مسأله با نتایج حاصل از محققین پیشین نیز تطبیق دارد. [۱۹]

جدول ۳ نتایج مقادیر N_{γ}^* حاصل از تحلیل برگشتی در رابطه (۴)

زاویه اصطکاک داخلی خاک به واسطه انحنای مربوط به خط معیار گسیختگی موهر- کلمب و تغییر در مکانیسم گسیختگی می‌باشد. برای خاک‌های ماسه‌ای میزان N_{γ} با افزایش یافتن عرض شالوده (B) کاهش می‌یابد و برای مقادیر عرض بزرگتر، این میزان به سمت مقدار ثابتی میل می‌نماید. کاهش میزان N_{γ} برای شالوده‌های بزرگتر می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه در ظرفیت باربری بشود. این نکته مهمی در بسط نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی جهت مقاصد عملی با در نظر گرفتن اثرات مقیاس است. همچنین ترکیب عواملی مانند تنش متوسط، تراکم نسبی، فشردگی پذیری، شکل و اندازه دانه‌بندی می‌تواند اثر مهمی بر روی ظرفیت باربری داشته باشد

جدول ۴. خلاصه نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی برای شالوده دایره‌ای واقع بستر ماسه‌ای به ضخامت محدود در شرایط غیرمسلح و مسلح

Table 4. Summary of laboratory test results for circular footing on limited unreinforced and geocell-reinforced sand

نوع مسلح‌کننده	H/B	ظرفیت باربری (kPa)	$R_f N_f^*$ یا N_f^* رابطه (۶ یا ۴)	$R_f K_f$ یا K_f رابطه (۱۰)	BCR رابطه (۷)	PRS (%) رابطه (۹)
غیرمسلح	۰/۵	۲۵۱	۱۳۶	۱/۴۶	-	-
	۱	۱۸۹	۱۰۳	۱/۱۱	-	-
	۲	۱۷۲	۹۳	۱	-	-
	۳	۱۷۲	۹۳	۱	-	-
مسلح شده با ژئوسل	۰/۵	-	-	-	-	-
	۱	۲۷۴	۱۴۹	۱/۶۰	۱/۴۵	۵۳
	۲	۲۳۶	۱۲۸	۱/۳۸	۱/۳۷	۴۷
	۳	۲۳۶	۱۲۸	۱/۳۸	۱/۳۷	۴۷

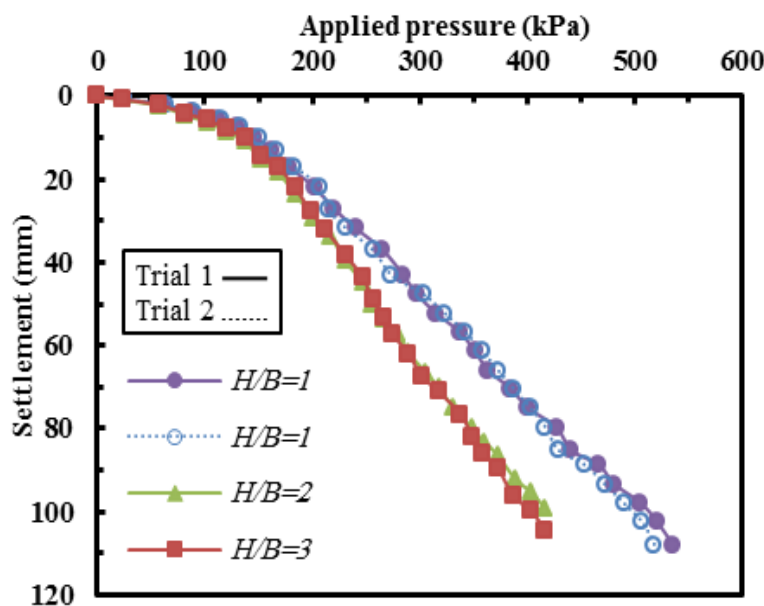
تأثیری بر مقادیر ظرفیت باربری ندارد.

۳-۴- تأثیر بستر صلب و ژئوسل بر باربری لایه ماسه‌ای

نتایج منحنی تنش-نشست برای بستر ماسه‌ای مسلح شده با ژئوسل در شکل ۷ ارائه شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود ظرفیت باربری در شرایط بستر مسلح بزرگتر از ظرفیت باربری در شرایط غیرمسلح در نسبت H/B مشابه می‌باشد. در خاک‌های مسلح نیز هیچ‌گونه نقطه گسیختگی واضحی بر روی منحنی‌های تنش-نشست دیده نمی‌شود. یک کاهش شیب ملایم بر روی منحنی‌ها می‌توان ملاحظه نمود که این مسأله ناشی از توزیع بار توسط لایه ژئوسل بر روی یک سطح وسیع‌تر و همچنین رفتار خطی ژئوسل حتی در مقادیر شدت تنش بالا می‌باشد. روند مشابهی در منحنی تنش-نشست نیز توسط هج و سیت‌حرم [۳۷] در تعیین ظرفیت باربری شالوده‌های مربعی دیده شده است. در واقع سختی برشی و مقاومت خمشی ژئوسل باعث بهبود باربری ماسه زیر شالوده حتی پس از گسیختگی می‌شود. زمانی که بستر صلب به سطح زیرین شالوده نزدیک می‌شود، ظرفیت باربری به واسطه اثر محصورکنندگی همزمان ناشی از بستر صلب و ژئوسل افزایش یافته و میزان نشست‌ها کاهش می‌یابد. شکل ۷ نشان می‌دهد که عمق بحرانی مربوط به بستر صلب در شرایط ماسه مسلح برابر با $H/B=2$ می‌باشد که این نسبت نشان‌دهنده کم‌تأثیر بودن ژئوسل بر روی عمق بحرانی است. تغییرات

را با نتایج بدست آمده توسط سایر محققین مقایسه می‌نماید. جهت تعیین ظرفیت باربری نهایی (q_{ult}) و N_f^* مربوط به مطالعه حاضر، مقادیر تنش متناظر با نشست معادل $0.1 B$ استفاده شده است. سراتو و لوتنگر [۲۳] نیز همین روش را جهت محاسبه q_{ult} جهت تعیین فشار باربری لایه‌های ماسه‌ای به ضخامت محدود به کار بردند. در سه مطالعه دیگری که در این جدول دیده می‌شود روش تعیین ظرفیت باربری از روی منحنی‌های بار-نشست گزارش نشده است و مقدار N_f^* از رابطه (۳) ظرفیت باربری تعیین گردیده و همچنین مقدار S_f^* بر اساس نظریه مایرهوف [۱۸] بدست آمده است. اختلاف بین نتایج حاصل از مطالعه حاضر با نتایج سایر پژوهشگران می‌تواند ناشی از روش تعیین ظرفیت باربری، فرض مربوط به تعیین S_f^* مشخصات خاک و عرض شالوده باشد.

جدول ۴ نشان می‌دهد که تغییر در مقادیر H/B تأثیر بسیار مهمی بر ضریب K_f تعریف شده در رابطه (۵) مربوط به بستر غیرمسلح دارد. با کاهش نسبت H/B، مقدار K_f به صورت قابل توجه افزایش می‌یابد. با کاهش مقدار H/B، افزایش K_f ابتدا با شیب کند و سپس با شیب تند اتفاق می‌افتد. با ملاحظه نتایج آزمون‌ها در شرایط بستر غیرمسلح، قابل استنباط است که زمانی که بستر صلب در موقعیت $H/B=0.5$ قرار دارد نسبت K_f می‌تواند بیش از ۴۵٪ ظرفیت باربری نهایی (در نقطه گسیختگی تعیین شده) حاصل شده با روابط کلاسیک را بهبود دهد. همچنین برای نسبت‌های بزرگتر از $H/B=2$ بستر صلب دیگر



شکل ۷. تغییرات منحنی تنش-نشست برای شالوده دایره‌ای واقع بر ماسه مسلح شده با ژئوسل در مقادیر مختلف H/B
 Fig. 7. Pressure-settlement variation for circular footing on geocell-reinforced sand for various H/B

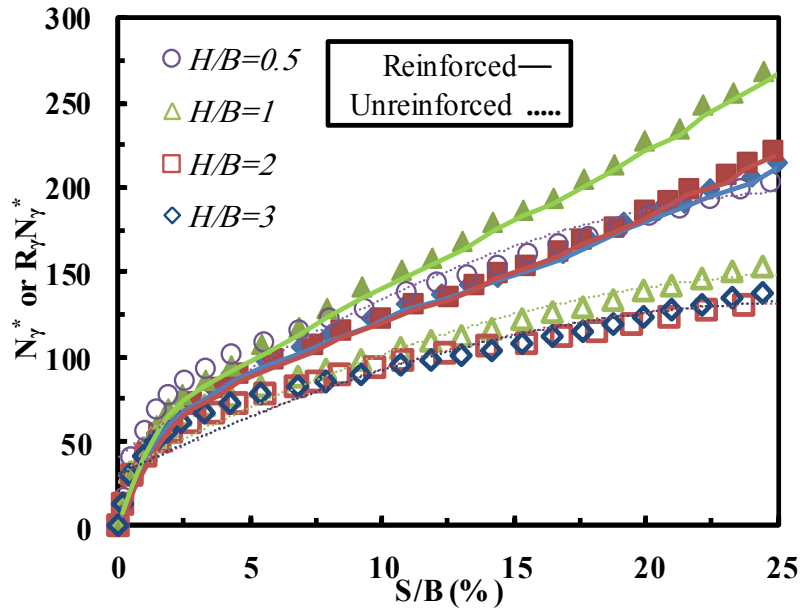
۵-۴- اثر بستر صلب و ژئوسل بر روی BCR و BCRb و PRS

شکل ۱۰ تغییرات نسبت ظرفیت باربری (BCR) را بر حسب S/B برای مقادیر مختلف H/B نشان می‌دهد. با افزایش نسبت S/B در دامنه ۰ تا ۲۵٪ مقدار BCR در تمامی حالت‌ها بین ۱/۱۹ تا ۱/۷۷ تغییر می‌نماید. همان‌طور که مشاهده می‌شود مسلح‌کننده ژئوسل اثر مهمی بر روی ظرفیت باربری به خصوص برای مقادیر بزرگتر S/B دارد. نتایج مشابهی از تغییرات BCR توسط قضاوی و علیمردانی لواسان [۳۸] برای شالوده‌های مربعی واقع بر مسلح‌کننده ژئوگرید حاصل گردید. منحنی BCR تقریباً به ازای تمامی مقادیر S/B دارای شیب یکنواخت می‌باشد. این مسأله می‌تواند ناشی از وجود دیواره‌های سلول ژئوسل در زیر شالوده و عملکرد رفتار خطی ژئوسل تحت بارگذاری باشد. وجود دیواره‌های ژئوسل در زیر شالوده باعث افزایش بیشتر سختی و صلبیت خمشی ژئوسل می‌گردد. ترکیب اثر بستر صلب و ژئوسل منجر به افزایش ۴ تا ۱۳٪ در مقدار BCR نسبت به حالت بدون حضور بستر صلب می‌باشد.

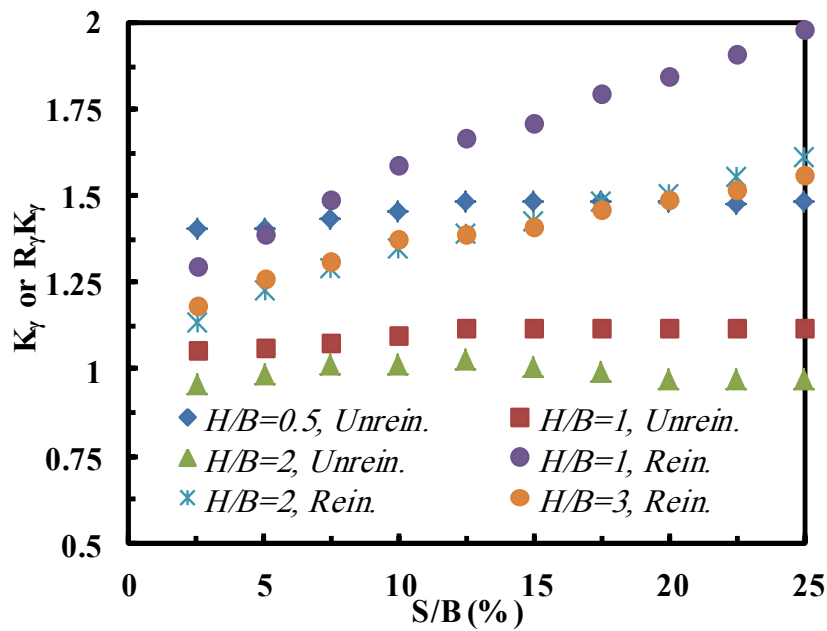
در این تحقیق مقدار درصد کاهش نشست شالوده (PRS)

افزایش می‌یابد. در مقادیر بزرگتر نشست، شیب منحنی‌ها در حالت غیرمسلح کاهش می‌یابد. در حالت بستر مسلح، ضرایب $R_p N_p^*$ متناسب با افزایش S/B افزایش می‌یابد به خصوص زمانی که ترکیب بستر صلب و مسلح‌کننده با هم وجود دارند. وجود دو اثر محصورشدگی به صورت همزمان باعث افزایش قابل ملاحظه $R_p N_p^*$ می‌گردد. کاهش یافتن H/B منجر به افزایش $R_p N_p^*$ برای مقادیر مختلف S/B می‌شود.

مقادیر K_p و $R_p K_p$ حاصل از بستر غیرمسلح و مسلح بر اساس تعریف اشاره شده در رابطه (۱۰) در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود با افزایش نسبت S/B میزان K_p و $R_p K_p$ نیز افزایش می‌یابد و این مسأله به ازای تمامی مقادیر H/B صادق می‌باشد. با افزایش نسبت S/B اختلاف بین مقادیر در حالت مسلح و غیرمسلح بیشتر می‌گردد که این نتیجه می‌تواند ناشی از مشارکت بیشتر ژئوسل در مقادیر فشارهای بالاتر باشد. به ازای تغییر مقدار S/B در دامنه بین ۰ تا ۲۵٪ مقدار $R_p K_p$ در دامنه بین ۱ تا ۱/۹۸ تغییر می‌نماید. این مقدار در نقطه گسیختگی تعریف شده می‌تواند در حدود ۶۰٪ ظرفیت باربری حاصل از روابط کلاسیک را بهبود دهد.



شکل ۸. تغییرات ضریب ظرفیت باربری (N_{γ}^* یا $R_{\gamma}N_{\gamma}^*$) بر حسب S/B برای مقادیر مختلف H/B
 Fig. 8. Variation of the BC factors (N_{γ}^* or $R_{\gamma}N_{\gamma}^*$) in term of S/B at different H/B

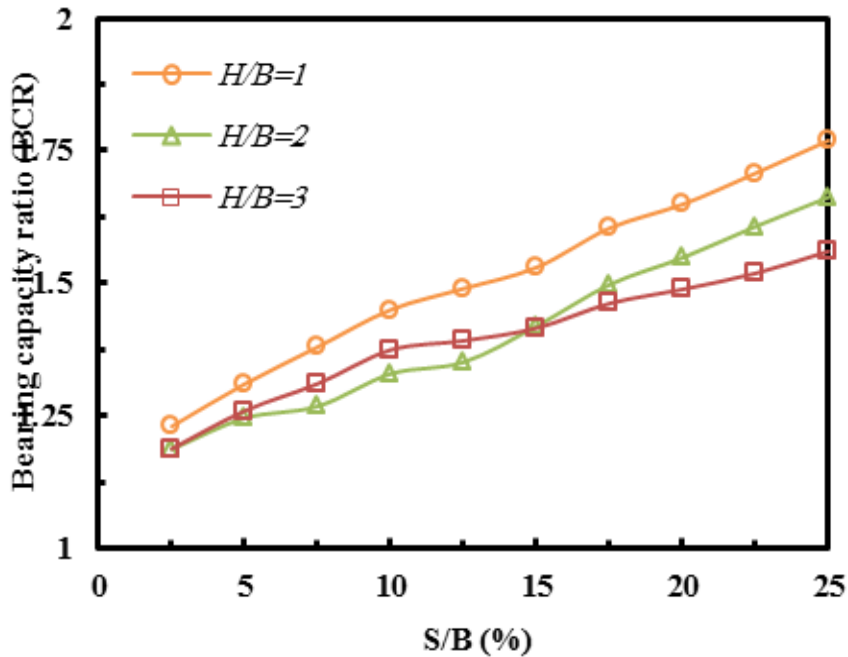


شکل ۹. تغییرات ضریب K_{γ} و $R_{\gamma}K_{\gamma}$ بر حسب S/B به ازای مقادیر مختلف H/B در حالت ماسه غیرمسلح و مسلح
 Fig. 9. Variation of K_{γ} and $R_{\gamma}K_{\gamma}$ in term of S/B at different H/B for unreinforced and geocell-reinforced sand

تغییرات N_{γ}^* و $R_{\gamma}N_{\gamma}^*$ برای شالوده دایره‌ای واقع بر بستر مسلح و غیرمسلح ماسه‌ای برای دامنه ۲۵٪-۰٪ S/B به ازای نسبت‌های مختلف H/B در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که از این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش S/B مقدار N_{γ}^* نیز متناظر با آن

در مقادیر مختلف H/B برای شالوده‌های PRC ، BCR ، $R_{\gamma}N_{\gamma}^*$ واقع بر مسلح نیز در جدول ۴ ارائه شده است.

۴-۴- تأثیر بستر صلب و ژئوسل بر N_{γ}^* ، R_{γ} و K_{γ}



شکل ۱۰. تغییرات BCR بر حسب نشست برای شالوده دایره‌ای در مقادیر مختلف H/B
 Fig. 10. Variation of BCR with footing settlement for circular footing at different H/B values

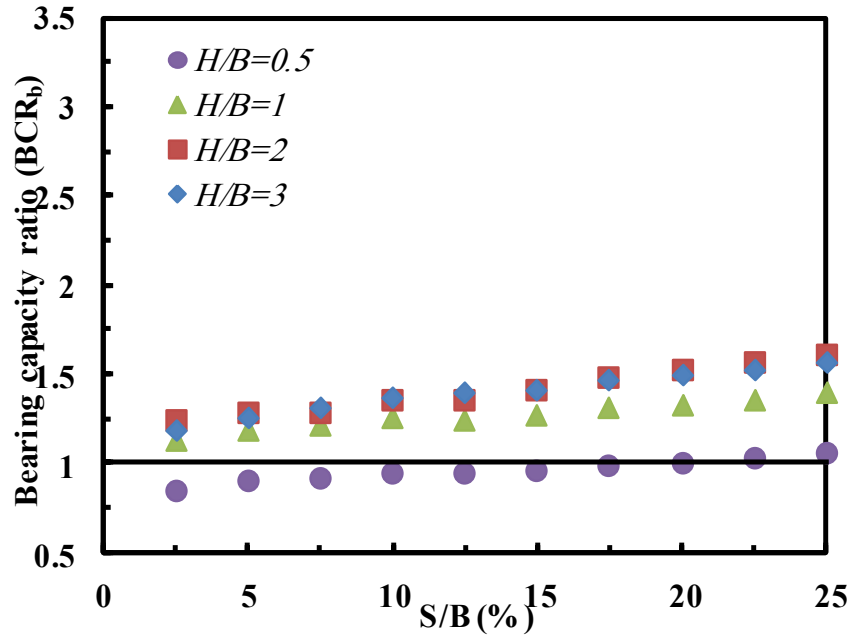
بستر صلب عمل می‌نماید.

۴-۶- رفتار ژئوسل

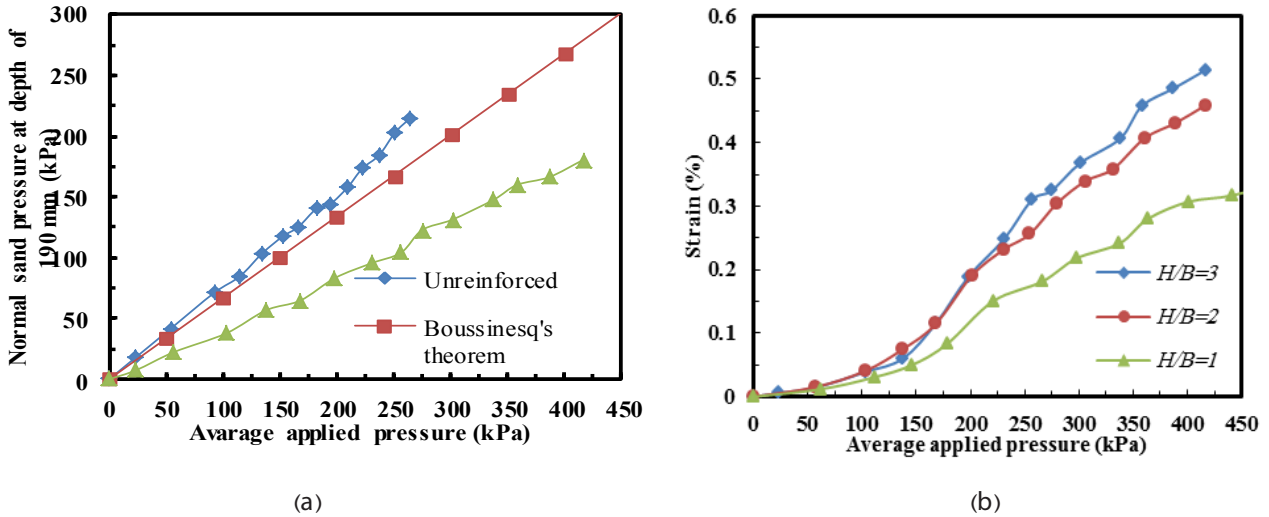
شکل a ۱۲ کرنش اندازه‌گیری شده در جهت افقی در طول دیواره ژئوسل ناشی از اعمال بار بر روی شالوده برای مقادیر مختلف H/B را نشان می‌دهد. کرنش‌ها در دامنه ۰ تا ۵۳٪ برای تنش‌های اعمالی متناظر با نشست ۰ تا ۲۵٪ تغییر می‌نمایند. در مقادیر پایین تنش‌ها، منحنی کرنش‌ها دارای شیب ملایم و در مقادیر بالاتر تنش‌ها، شیب منحنی‌ها تندتر می‌گردد. این مسأله می‌تواند ناشی از مشارکت بیشتر مسلح‌کننده ژئوسل در مقادیر بالاتر تنش باشد. همچنین این شکل نشان می‌دهد که ارتباط بین فشار اعمال شده و کرنش به وجود آمده در ژئوسل تقریباً دو خطی با دو شیب تفکیک شده است که نشان‌دهنده رفتار خطی مسلح‌کننده در طول بارگذاری حتی در مقادیر بالای فشارهای اعمال شده می‌باشد. از استخراج ژئوسل پس از بارگذاری مشاهده گردید که انحنای اندکی در دیواره ژئوسل در زیر بار اتفاق افتاده است که این انحنا می‌تواند بر روی نتایج ثبت شده مربوط به کرنش‌سنج تأثیر گذار باشد. میزان این انحنا در مقادیر کوچکتر H/B بزرگتر بوده است. در واقع حضور بستر صلب می‌تواند

به واسطه وجود مسلح‌کننده و بستر صلب مطابق با رابطه (۹) در نسبت‌های مختلف از H/B اندازه‌گیری شده است. میزان PRS حالتی که ترکیب هر دو نوع محصورشدگی وجود دارد برابر با ۵۳٪ می‌باشد. این نتیجه نشان می‌دهد که ترکیب هر دو نوع محصورشدگی تقریباً به میزان ۱۳٪ مقدار PRS را در مقایسه با شرایط عدم حضور بستر صلب افزایش می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب اثر بستر صلب و مسلح‌کننده نه تنها ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد بلکه منجر به کاهش چشمگیر نشست نیز می‌شود.

تغییرات BCR_b بر حسب S/B برای مقادیر مختلف H/B در شکل ۱۱ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که زمانی که نسبت $H/B=0/5$ می‌باشد ظرفیت باربری به دست آمده از شرایط بستر غیرمسلح در مقدار نشست برابر با $S/B=12\%$ تقریباً برابر با ظرفیت باربری حاصل شده از بستر مسلح با ژئوسل در همان میزان نشست بدون حضور بستر صلب است. به عبارت دیگر در این شرایط اثر بستر صلب معادل با اثر مسلح‌کننده ژئوسل بر ظرفیت باربری است. زمانی که $H/B=0/5$ باشد اثر بستر صلب می‌تواند از اهمیت بیشتری نسبت به اثر مسلح‌کننده برخوردار باشد و این موضوع در مقادیر کوچکتر S/B بهتر دیده می‌شود. در مقادیر بزرگتر H/B اثر ژئوسل مؤثرتر از اثر



شکل ۱۱. تغییرات BCR_b با نشست شالوده در مقادیر مختلف H/B
 Fig. 11. Variation of BCR_b with footing settlement at different H/B values



شکل ۱۲. نتایج ابزار گذاری در مدل آزمایش بزرگ مقیاس؛ (a) تغییرات کرنش دیواره ژئوسل در زیر شالوده برای تمامی حالت‌های H/B ، (b) تغییرات تنش قائم در عمق ۱۹۰ mm برای ماسه غیرمسلح و مسلح به ازای $H/B=3$

Fig. 12. Result of instrumentation in large scale model test; (a) Variation of geocell wall strain below footing for all H/B cases, (b) Variation of vertical pressure at depth of 190 mm for unreinforced and geocell-reinforced sand for $H/B=3$

جدول ۵. مقایسه مقادیر BCR حاصل از تحقیقات مختلف بر روی ماسه
Table 5. Comparison of BCR values obtained from different researchers on sand

مرجع	شکل شالوده	ابعاد شالوده (mm)	مشخصات ژئوسل	BCR (S/B=10%)	شرح
دش و همکاران [۹]	دایره	۱۵۰	$u/B=1/4-4, u/B=0/1, H/B=0/18, D/B=0/17$	۲/۲۱-۳/۲۹	$\phi=41^\circ, D_r=70\%$
هج و سبتحرم [۳۷]	مربع	۱۵۰	$u/B=5/9, u/B=0/1, H/B=1, D/B=1/22$	۱/۲۸	$\phi=30^\circ, D_r=65\%$
شادمند و همکاران [۱۵]	مربع	۵۰۰	$u/B=5, u/B=0/1, H/B=0/13, D/B=0/44$	۱/۵۷	$\phi=41^\circ, D_r=65\%$
مطالعه حاضر (H/B=۳)	دایره	۴۰۰	$u/B=4, u/B=0/1, H/B=0/138, D/B=0/46$	۱/۳۷	$\phi=36^\circ, D_r=68\%$

حاصل شد. زمانی که از ژئوسل استفاده می‌شود حدود ۴۷٪ کاهش در مقادیر تنش قائم در عمق ۱۹۰ mm اتفاق می‌افتد.

۴-۷- مقایسه نتایج با پژوهش‌های پیشین

جدول ۵ مقدار BCR حاصل از مطالعه حاضر را با نتایج برگرفته از تحقیقات گذشته بر روی ژئوسل در نسبت $S/B=10\%$ مقایسه می‌نماید. این مقایسه صرفاً در نسبت $H/B=3$ انجام پذیرفته است، زیرا مطابق با توضیحات جدول ۴ در نسبت $H/B=3$ صرفاً اثر ژئوسل بر BCR دیده می‌شود و حضور بستر صلب تأثیری بر نتایج ندارد. از سوی دیگر پژوهش پیشین مشابهی در خصوص بررسی اثر همزمان ژئوسل و بستر صلب جهت مقایسه وجود ندارد. نتایج حاکی از آن است که تناسب خوبی بین نتایج تحقیق حاضر با سایر کارهای مشابه وجود دارد. علت مقداری اختلاف در بین نتایج می‌تواند ناشی از در نظر گرفتن مشخصات هندسی و ابعادی متفاوت، میزان مقاومت‌های مختلف برای ژئوسل و استفاده از مصالح بستر با مشخصات مکانیکی متفاوت در تحقیقات باشد. به عنوان مثال در مطالعه دش و همکاران، از یک ژئوسل دست‌ساز با آرایش مثلث‌گونه^۱ استفاده شده و نسبت عرض ژئوسل به پهناي شالوده (u/B) در سه حالت متفاوت مطالعه شده است. بنابراین نسبت BCR حاصل از آن نیز با سایر تحقیقات فاصله بیشتری دارد.

باعث خمش در دیواره ژئوسل شود و منجر به نشست موضعی بیشتر و کاهش کارایی لایه ژئوسل گردد. به عبارت دیگر بستر صلب می‌تواند مانع از ایجاد خمش بیشتر به واسطه اعمال بار در لایه ژئوسل شود. تنش اندازه‌گیری شده ناشی از فشارسنج قرار گرفته در عمق ۱۹۰ mm (بلافاصله در زیر لایه ژئوسل) برای شرایط ماسه مسلح و غیرمسلح در حالت $H/B=3$ و برای $S/B=0-25\%$ در شکل ۱۲ b نشان داده شده است. به جهت مقایسه، تنش قائم ایجاد شده بر اساس تئوری بوسینسک [۳۹] در ماسه الاستیک ایزوتروپ واقع در محیط نیمه بینهایت در همان عمق نیز ارائه شده است. همان‌گونه که از این شکل مشخص می‌باشد توزیع تنش قائم در ماسه غیرمسلح در مقادیر فشارهای پایین به تئوری بوسینسک نزدیک و در مقادیر فشارهای بالا از نتایج تئوری بوسینسک فاصله می‌گیرد. دلیل این اختلاف می‌تواند ناشی از رفتار غیرخطی خاک در مقادیر فشارها و تغییر شکل‌های بزرگتر باشد. استفاده از ژئوسل می‌تواند باعث کاهش قابل توجه شدت تنش قائم اعمال شده بر بستر گردد. در واقع لایه ژئوسل همانند یک تیر عمل کرده، فشارها را بر روی یک سطح وسیع‌تر توزیع می‌نماید و باعث افزایش محصورشدگی بیشتر، افزایش سختی خاک و ممانعت از حرکت جانبی خاک می‌گردد.

نتایج ثبت شده مربوط به فشارسنج‌ها (P_u) در حالت $H/B=3$ برای هر دو نوع آزمون مسلح و غیرمسلح با فشار متناظر با ظرفیت باربری در حالت غیرمسلح ($q_u=172$ kPa) نرمالیزه شد. نسبت P_u/q_u در حالت مسلح برابر با ۰/۴ و برای حالت غیرمسلح برابر با ۰/۷۶

1 Chevron pattern

۵- محدودیت‌های کاربرد و اثر مقیاس

این مطالعه بررسی رفتار ماسه‌های با ضخامت نازک مسلح شده با ژئوسل را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این آزمون‌ها صرفاً برای یک نوع مسلح‌کننده، یک عرض (b) و عمق مدفون (u)، یک مشخصات هندسی ($H/B, D/B, h/D$) معین برای ژئوسل، یک نوع ماسه با تراکم مشخص (D_r) و نهایتاً یک شکل و عرض شالوده (B) بدست آمده است. در نتیجه بسط نتایج این تحقیق برای شرایط کلی و حالت‌های مختلف منوط به در نظر گرفتن محدودیت‌های فوق می‌باشد. بنابراین جهت حصول به یک نتیجه کلی، نیاز به انجام آزمون‌های بیشتر بر روی شالوده‌های با شکل و ابعاد مختلف، ژئوسل با ابعاد و مشخصات هندسی متفاوت و همچنین ماسه‌های با مشخصات فیزیکی و مکانیکی و تراکم‌های مختلف می‌باشد.

منظور بررسی رفتار شالوده‌ها و دسترسی به پارامترهای کلیدی طراحی نزدیک به واقعیت نیازمند انجام آزمون با مقیاس واقعی بوده و انجام آزمون با مقیاس منطبق بر واقعیت نیازمند وقت و هزینه بالایی می‌باشد. آزمون‌های با مقیاس کوچکتر می‌تواند اطلاعات تقریبی خوبی در خصوص رفتار شالوده‌های با مقیاس واقعی نشان دهد؛ ولی به واسطه فاکتورهای پیچیده مؤثر در عامل مقیاس، نتایج حاصل از آزمون‌های با مقیاس کوچکتر نمی‌تواند به صورت مستقیم در مقاصد عملی به کار گرفته شود. هر چقدر میزان کوچک شونده‌گی مدل آزمون کمتر باشد رفتار آزمون به واقعیت می‌تواند نزدیکتر باشد. در مدل آزمون تلاش می‌گردد تا درصد کوچک شونده‌گی برای تمامی اجزای مدل به یک نسبت صورت پذیرد ولی در برخی موارد این امکان وجود ندارد. مثلاً کوچک کردن دانه‌های خاکی در مدل آزمون از جمله این موارد می‌باشد. مطابق با نظر کوزاکابه [۴۰] در صورتی که $B/D_s \leq 50-100$ (که D_s متوسط اندازه دانه‌های خاکی است) باشد اثر اندازه دانه‌های خاکی در اثر مقیاس قابل صرف‌نظر می‌باشد. در این مطالعه با توجه به ابعاد شالوده ($B=400$ mm) و همچنین متوسط اندازه دانه‌های ماسه ($D_s=0/25$ mm) این نسبت رعایت می‌گردد. در واقع ضریب مقیاس (N) که از نسبت عرض شالوده در مدل واقعی به عرض شالوده در مدل‌های آزمون حاصل می‌گردد، جهت تبدیل پارامترهای طراحی از مدل آزمون به مدل واقعی به کار می‌رود. مطابق با نظر لفقار [۴۱] مقاومت کششی مسلح‌کننده در مدل واقعی می‌بایست N^2 برابر مقاومت کششی مسلح‌کننده در مدل آزمون

باشد. از آنجایی که مقاومت کششی ژئوسل مورد استفاده در این مطالعه برابر با 21 kN/m بوده و حداکثر مقاومت کششی ژئوسل‌های تجاری موجود در بازار برابر با 30 kN/m [۳۰] می‌باشد لذا $N^2=1/43$ و در نتیجه $N=1/2$ به دست می‌آید. لذا با استفاده از ژئوسل تجاری با مقاومت 30 kN/m و با معادل نمودن سختی شالوده فولادی به بتنی می‌توان در عمل می‌توان نتایج حاصل از این تحقیق را برای شالوده‌ای به عرض $400 \times 2/1 = 480 \approx 500$ mm بسط داد.

۶- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، تعدادی آزمون مدل فیزیکی بر روی شالوده دایره‌ای واقع بر بستر مسلح و غیرمسلح ماسه‌ای به ضخامت محدود انجام شده است. جهت تسلیح بستر از ژئوسل پیش ساخته تجاری استفاده شد که ابعاد و عمق مدفون آن به صورت ثابت و بهینه در آزمون‌ها در نظر گرفته شد. با تغییر عمق استقرار بستر صلب در آزمون‌ها، تأثیر همزمان بستر صلب و مسلح‌کننده ژئوسل بر روی پاسخ منحنی تنش-نشست شالوده مطالعه گردیده است. نتایج اصلی زیر از این پژوهش حاصل شده است:

- ۱- ترکیب ژئوسل و بستر صلب به صورت همزمان می‌تواند ظرفیت باربری (در نسبت $S/B=10\%$) را از 37 تا 45% نسبت به حالت شالوده واقع بر بستر غیرمسلح نیمه بی‌نهایت افزایش و نشست‌ها را 47 تا 53% کاهش دهد. این تغییر در میزان افزایش باربری و کاهش نشست تابعی از موقعیت بستر صلب می‌باشد.
- ۲- عمق بحرانی جهت بستر صلب تقریباً برابر با $2B$ می‌باشد که زمانی که بستر صلب در عمقی بیشتر از عمق بحرانی قرار می‌گیرد اثر مهمی بر روی ظرفیت باربری ندارد. این مقدار تقریباً در شرایط بستر مسلح نیز معتبر است.
- ۳- با توجه به نتایج حاصل شده می‌توان عنوان نمود که ابعاد شالوده و مشخصات فیزیکی و مکانیکی بستر خاکی در میزان عمق بحرانی تأثیر بسیار زیادی دارد. وجود ژئوسل تأثیر قابل توجهی بر میزان عمق بحرانی ندارد.
- ۴- زمانی که $H/B \geq 0/5$ باشد اثر مسلح‌کننده ژئوسل مؤثرتر از اثر بستر صلب در افزایش باربری و کاهش نشست عمل می‌نماید. این در حالی است که در مقادیر $H/B \leq 0/5$ اثر بستر صلب به ازای S/B کوچکتر بر اثر مسلح‌کننده حاکم است و در مقادیر بزرگتر S/B اثر

u	(mm)	عمق مدفون ژئوسل،	ژئوسل نسبت به بستر صلب حاکم بوده و مشارکت بیشتر ژئوسل در افزایش باربری در مقادیر نشست‌های بزرگتر دیده می‌شود.
			۵- با افزایش میزان بار اعمالی از سوی شالوده، عملکرد ژئوسل در افزایش باربری و کاهش نشست بهبود می‌یابد. این در حالی است که حتی در مقادیر بزرگتر نشست و شدت بارهای بیشتر، رفتار ژئوسل به صورت دو خطی می‌باشد.
φ	(درجه)	زاویه اصطکاک داخلی خاک،	
γ	(kN/m ³)	وزن واحد حجم خاک،	
γ_d	(kN/m ³)	وزن واحد حجم خاک خشک،	
			۶- ضرایب پیشنهاد شده جهت اصلاح روابط کلاسیک ظرفیت باربری می‌تواند به بسط این روابط جهت استفاده آن‌ها در شرایطی از جمله وجود بستر صلب در نزدیکی شالوده و همچنین وجود مسلح‌کننده در خاک کمک نماید.
BCR, BCR_b		نسبت ظرفیت باربری در یک نشست مشخص	
PRS		(%)، درصد کاهش نشست	
SP		ماسه بد دانه‌بندی شده	

علائم یونانی

مخفف‌ها

فهرست علائم

علائم اختصاری

زیر نویس‌ها

Data logger	دستگاه ثبت اطلاعات	b	(mm)	عرض لایه ژئوسل،
LVDT	تغییر مکان سنج خطی	B	(mm)	عرض شالوده،
Load cell	سلول اندازه‌گیری بار	L	(mm)	طول شالوده،
Strain gauge	کرنش سنج	C_c	(-)	ضریب انحنای،
Pressure cell	فشارسنج	C_u	(-)	ضریب یکنواختی،
		D	(mm)	قطر چشمه ژئوسل،
		D_{50}	(mm)	متوسط اندازه دانه‌های خاک،
		D_r	(%)	تراکم نسبی،
		e_{max}	(-)	حداکثر نسبت تخلخل،
		e_{min}	(-)	حداقل نسبت تخلخل،
		G_s	(-)	چگالی ویژه دانه‌های خاک،
		h	(mm)	ارتفاع ژئوسل،
		H	(mm)	ضخامت لایه خاک،
		H_{cr}	(mm)	عمق بحرانی لایه خاک،
		K_γ	(-)	ضریب اصلاح ناشی از بستر صلب،
		m_2	(-)	ضریب ثابت،
		N_γ^*	(-)	ضریب ظرفیت باربری اصلاح شده،
		P_u	(kPa)	فشار ثبت شده توسط فشارسنج،
		q_u	(kPa)	ظرفیت باربری نهایی خاک،
		S	(mm)	نشست شالوده،
		S_γ^*	(-)	ضریب شکل اصلاح شده،

مراجع

- [1] K. Terzaghi, Theoretical Soil Mechanics, John Wiley, NY. (1943)
- [2] H.J. Boushehrian, N. Hataf, Experimental and numerical investigation of the bearing capacity of model circular and ring footings on reinforced sand, Geotextiles and Geomembranes, 21 (2003) 241-256.
- [3] T.G. Sitharam, S. Sireesh, Model studies of embedded circular footing on geogrid-reinforced sand beds, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 8(2) (2004) 69-75.
- [4] P.K. Basudhar, S. Saha, K. Deb, Circular footings resting on geotextile-reinforced sand bed, Geotextiles and Geomembranes, 25(6) (2007) 377-384.
- [5] J. Lovisa, S.K. Shukla, N. Sivakugan, Behaviour of prestressed geotextile-reinforced sand bed supporting a loaded circular footing, Geotextiles and Geomembranes, 28(1) (2010) 23-32.

- [16] Shadmand, M. Ghazavi, N. Ganjian, Scale effects of footings on geocell reinforced sand using large-scale tests, *Civil Engineering Journal*, 4(3) (2018) 497-508.
- [17] J. Mandel, J. Salençon, Force portante d'un sol sur une assise rigide (étude théorique), *Géotechnique*, 22(1) (1972) 79-93.
- [18] G.G. Meyerhof, Ultimate bearing capacity of footings on sand layer overlying clay, *Canadian Geotechnical Journal*, 11(2) (1974) 223-229.
- [19] J.P. Tournier, D.M. Milović, Étude expérimentale de la capacité portante d'une couche compressible d'épaisseur limitée, *Géotechnique*, 27(2) (1977) 111-123.
- [20] A.M. Hanna, Experimental study on footings in layered soil, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 107(8) (1981) 1113-1127.
- [21] K. Siraj-Eldine, A. Bottero, Étude expérimentale de la capacité portante d'une couche de sol pulvérulent d'épaisseur limitée, *Canadian Geotechnical Journal*, 24(2) (1987) 242-251.
- [22] R. Brown, A.J. Valsangkar, A.B. Schriver, Centrifuge modeling of surface footings on a sand layer underlain by a rigid base, *Geotechnical and Geological Engineering*, 22(2) (2004) 187.
- [23] A.B. Cerato, A.J. Lutenege, Bearing capacity of square and circular footings on a finite layer of granular soil underlain by a rigid base, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(11) (2006) 1496-1501.
- [24] H.T. Eid, O.A. Alansari, A.M. Odeh, M.N. Nasr, H.A. Sadek, Comparative study on the behavior of square foundations resting on confined sand, *Canadian Geotechnical Journal*, 46(4) (2009) 438-453.
- [25] T.W. Pfeifle, B.M. DAs, Bearing capacity of surface footings on sand layer resting on a rigid rough base, *Soils and Foundations*, 19(1) (1979) 1-11.
- [26] M. Ghazavi, A.H. Eghbali, A simple limit equilibrium approach for calculation of ultimate bearing capacity of shallow foundations on two-layered granular soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, 26(5) (2008) 535-542.
- [6] A. Alimardani Lavasan, M. Ghazavi, Behavior of closely spaced square and circular footings on reinforced sand, *Soils and Foundations*, 52(1) (2012) 160-167.
- [7] E. Badakhshan, A. Noorzad, Effect of footing shape and load eccentricity on behavior of geosynthetic-reinforced sand bed, *Geotextiles and Geomembranes*, 45(2) (2017) 58-67.
- [8] A. Alimardani Lavasan, M. Ghazavi, T. Schanz, Analysis of interfering circular footings on reinforced soil by physical and numerical approaches considering strain-dependent stiffness, *International Journal of Geomechanics, ASCE*, 17(11) (2017) 04017096.
- [9] S.K. Dash, S. Sireesh, T.G. Sitharam, Behaviour of geocell-reinforced sand beds under circular footing, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 7(3) (2003) 111-115.
- [10] T.G. Sitharam, S. Sireesh, Behaviour of embedded footings supported on geocell reinforced foundation beds, *Geotechnical Testing Journal, ASTM 28* (2005) 452-463.
- [11] S.K. Pokharel, J. Han, D. Leshchinsky, R.L. Parsons, I. Halahmi, Investigation of factors influencing behavior of single geocell-reinforced bases under static loading, *Geotextiles and Geomembranes*, 28(6) (2010) 570-578.
- [12] A. Hegde, T.G. Sitharam, Joint strength and wall deformation characteristics of a single-cell geocell subjected to uniaxial compression, *International Journal of Geomechanics, ASCE*, 15(5) (2015) 04014080
- [13] S.N. Moghaddas Tafreshi, T. Shaghghi, G. Tavakoli Mehrjardi, A.R. Dawson, M. Ghadrnan, A simplified method for predicting the settlement of circular footings on multi-layered geocell-reinforced non-cohesive soils, *Geotextiles and Geomembranes*, 43(4) (2015) 332-344.
- [14] S.N. Moghaddas Tafreshi, O. Khalaj, A.R. Dawson, Pilot-scale load tests of a combined multilayered geocell and rubber-reinforced foundation, *Geosynthetics International*, 20(3) (2013) 143-161.
- [15] A. Shadmand, M. Ghazavi, N. Ganjian, Load-settlement characteristics of large-scale square footing on sand reinforced with opening geocell reinforcement, *Geotextiles and Geomembranes*, 46(3) (2018) 319-326.

- and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, ASCE, 40(2) (1994) 1602-1610.
- [35] K. Been, M.G. Jefferies, A state parameter for sands, *Géotechnique*, 35(2) (1985) 99-112.
- [36] A.B. Cerato, A.J. Lutenegeger, Scale effects of shallow foundation bearing capacity on granular material, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(10) (2007) 1192-1202.
- [37] A.M. Hegde, T.G. Sitharam, Three-dimensional numerical analysis of geocell-reinforced soft clay beds by considering the actual geometry of geocell pockets, *Canadian Geotechnical Journal*, 52(9) (2015) 1396-1407.
- [38] M. Ghazavi, A. Alimardani Lavasan, Interference effect of shallow foundations constructed on sand reinforced with geosynthetics, *Geotextiles and Geomembranes*, 26(5) (2008) 404-415.
- [39] J. Boussinesq, Application des potentiels a l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques, Albert Blanchard, Paris (in French). [Reprinted, 1969 with an introduction by A. Caquot, Gauthier-Villars, Paris.], (1885).
- [40] O. Kusakabe, Geotechnical centrifuge technology, Taylor & Francis (Ed.1), Chapter 6: Foundations. Blackie Academic & Professional, London, (1995).
- [41] J.L. Langhaar, Dimensional Analysis and Theory of Models, John Wiley & Sons, New York, NY, (1951).
- [27] D.I. Bush, C.G. Jenner, R.H. Bassett, The design and construction of geocell foundation mattresses supporting embankments over soft grounds, *Geotextiles and Geomembranes*, 9(1) (1990) 83-98.
- [28] ASTM D2487, Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System) ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, (2011).
- [29] ASTM D7181, Method for consolidated drained triaxial compression test for soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, (2011).
- [30] ASTM D4885, Standard test method for determining performance strength of Geomembranes by wide strip tensile method, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, (2011).
- [31] P.D. Coduto, M.R. Yeung, , A.W. Kitch, Geotechnical engineering: principles and practices, New Jersey: PHI publication, (1999).
- [32] S.K. Dash, Influence of relative density of soil on performance of geocell-reinforced sand foundations, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(5) (2010) 533-538.
- [33] S.K. Dash, N.R. Krishnaswamy, K. Rajagopal, Bearing capacity of strip footings supported on geocell-reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 19(4) (2001) 235-256.
- [34] S. Amar, F. Baguelin, Y. Canépa, R. Frank, Experimental study of the settlement of shallow foundations. Vertical

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

P. Fazeli Dehkordi, M. Ghazavi, N. Ganjian, (2021). Evaluation Behavior of Circular Footings Located on Sand Bed Reinforced with Geocell. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(5): 1801-1820

DOI: [10.22060/ceej.2020.17159.6479](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17159.6479)



