



رفتار استاتیکی پی رینگی بر بستر ماسه ای مسلح شده با ترکیب خرده لاستیک و ژئوگرید

محمدحسین کیقبادی، عادل عساکره*، بهزاد کلانتری، مسعود دهقانی

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۹-۲۰
بازنگری: ۱۳۹۷-۱۱-۲۵
پذیرش: ۱۳۹۷-۱۲-۱۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۲-۲۱

کلمات کلیدی:

پی رینگی
خرده لاستیک
ژئوگرید، ظرفیت باربری
نشست

خلاصه: از پی های رینگی در صنایع مختلف از جمله نفت و گاز، استفاده می شود. بنابراین، این گونه از پی ها از اهمیت بالایی برخوردار بوده و اقداماتی برای بهبود رفتار آن، می تواند بسیار حائز اهمیت باشد. در پژوهش حاضر با استفاده از آزمایش های تجربی، رفتار پی رینگی با قطر خارجی ثابت ۳۰۰ میلیمتر و مستقر بر بستر ماسه ای مسلح شده با خرده لاستیک دانه ای به تنهایی و همچنین در ترکیب با ژئوگرید، تحت بار استاتیکی، ارزیابی شده است. نتایج نشان می دهد در هر دو حالت بستر غیر مسلح و همچنین مسلح شده با خرده لاستیک، پی رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی برابر با ۰/۴، دارای بیشترین ظرفیت باربری می باشد. همچنین ضخامت بهینه لایه مخلوط خاک - خرده لاستیک برابر با نصف قطر خارجی پی رینگی می باشد، که در صورت استفاده از آن، ظرفیت باربری تا ۴۱/۵ درصد نسبت به حالت غیر مسلح افزایش می یابد؛ افزایش بیشتر این ضخامت نتیجه معکوس داشته و ظرفیت باربری را کاهش و نشست را افزایش می دهد. البته استفاده از مسلح کننده ژئوگرید در ترکیب با لایه مخلوط خاک - خرده لاستیک، می تواند قدری خاصیت تسلیح کنندگی این لایه با ضخامت های زیاد را فعال کند، ولی مقدار آن به قدری نیست که بتواند بر اثرات منفی ناشی از به کارگیری این لایه با ضخامت هایی بیش از ضخامت بهینه مذکور، غلبه کند. به طور کلی استفاده ترکیبی از مسلح کننده های ژئوگرید و خرده لاستیک تاثیر بیشتری نسبت به استفاده جداگانه از آن ها، داشته و می تواند ظرفیت باربری را تا ۶۲/۷٪ نسبت به حالت غیر مسلح افزایش دهد.

۱- مقدمه

آمده است [۱-۳] مثلاً اهری و همکاران^۱ آزمایش های مختلفی را بر روی پی های رینگی با مساحت ثابت و نسبت قطر داخلی به خارجی مختلف و همچنین پی های رینگی با مساحت متغییر و نسبت قطر داخلی به خارجی مختلف (با قطر خارجی ثابت) انجام دادند. آنها با انجام این آزمایش ها دریافتند در صورت استفاده از یک مقدار خاص و یا بهینه از نسبت قطر داخلی به خارجی پی رینگی، تراکم خاک موجود در ناحیه داخل رینگ بدلیل اثر تداخلی دو طرف رینگ، افزایش می یابد، ولی رفتار پی رینگی در صورت زیاد شدن بیش از حد نسبت قطر داخلی به خارجی به سمت دو پی نواری مستقل بدون اثر تداخلی رینگ تبدیل شده و ظرفیت باربری آن کاسته می شود

پی های رینگی به دلیل کاربرد آن ها در سازه های خاص همچون مخازن ذخیره سازی نفت و گاز و دیگر سیالات، آنتن های تلویزیونی، سیلوهای ذخیره سازی مواد غذایی، دودکش ها، راکتورهای اتمی و برج های ارتباطی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می باشند. راه های مختلفی برای بهبود عملکرد این پی ها وجود دارد. نتایج پژوهش های قبلی نشان می دهد که با بهینه سازی نسبت قطر داخلی به خارجی پی رینگی می توان ظرفیت باربری آن را افزایش داد که البته مقادیر بهینه مختلفی با توجه به نوع بستر زیرین پی (نوع خاک، مسلح و غیر مسلح) برای این پارامتر مهم در مطالعات قبلی از ۰/۳ تا ۰/۴، بدست *نویسنده عهده دار مکاتبات: asakereh@hormozgan.ac.ir

1 Ohri et al.



مناسب از یکدیگر قرار دارند، می توان ظرفیت باربری یک پی رینگی را تا حدود دو برابر افزایش داد [۲] همچنین ای صواف و نظیر^۶ دریافتند که با بکار بردن سه لایه ژئوگرید که لایه اول آن در فاصله ای برابر با 0.33 قطر خارجی پی رینگی (D) از زیر پی قرار دارد و فواصل بین لایه ای آن برابر با $0/D5$ می باشد، ظرفیت باربری پی رینگی مستقر بر بستر ماسه ای با تراکم متوسط، از $7/73$ کیلو پاسکال در حالت غیرمسلح به $3/107$ کیلو پاسکال در حالت مسلح افزایش می یابد و در بستر ماسه ای با تراکم بالا نیز ظرفیت باربری پی رینگی از $8/153$ کیلو پاسکال در حالت غیرمسلح به $9/170$ کیلو پاسکال در حالت مسلح افزایش می یابد [۳] لمان و ییلدیز^۷ نیز طی مطالعات خود بر روی پی رینگی دریافتند که در صورت به کار بردن چهار لایه ژئوگرید با پارامترهای بهینه ($h/D=0.3$, $u/D=0.3$, $N=3$)، می توان ظرفیت باربری یک پی رینگی را تا حدود سه برابر برابر افزایش داد [۸] استفاده از ژئوسنتتیک گرچه مفید می باشد ولی استفاده از آن نیازمند صرف هزینه می باشد. امروزه و با پیشرفت های صورت گرفته می توان از مواد حاصل از ضایعات که ارزان قیمت بوده و استفاده از آن ها در مقاصد مهندسی کمک شایانی به دور ریخته نشدن آن ها در طبیعت می کند، جهت تسلیح خاک استفاده کرد. یکی از این مواد دور ریز تایرهای فرسوده می باشد که می توان طی فرآیندی آن ها را به خرده لاستیک در ابعاد مختلف تبدیل و جهت تسلیح خاک استفاده کرد. طبق آمار مراکز بین المللی سالانه حجم بسیار زیادی از تایرهای فرسوده تولید می گردد. مثلا در سال ۲۰۱۷ فقط در ایالات متحده آمریکا تعداد $6/255$ میلیون تایر تولید شده است [۹] رها سازی این حجم از تایرهای فرسوده در طبیعت می تواند صدمات جبران ناپذیری به محیط زیست وارد کند. بنابراین استفاده از آن ها بعنوان مقاصد مهندسی و صنعتی می تواند کمک شایانی به حفظ محیط زیست باشد. نتایج حاصل از مطالعات قبلی نشان می دهد با افزودن خرده لاستیک به خاک می توان پارامترهای مربوط به مقاومت برشی آن را افزایش داد. البته میزان بهبود پارامترهای مقاومتی خاک بستگی به عوامل مختلفی از قبیل نوع خرده لاستیک، درصد خرده لاستیک، وزن واحد حجم مخلوط خاک- خرده لاستیک و همچنین نسبت ابعاد دانه های خرده لاستیک دارد [۱۵-۱۰] مثلا گوتلند و همکاران^۸ با انجام یکسری آزمایش های سه محوری بر روی

[۴] لازم به ذکر است با به کارگیری نسبت بهینه این پارامتر، ظرفیت باربری آن، نسبت به پی دایروی با قطر معادل افزایش چشمگیری خواهد داشت. مثلا شرما^۱ و همکاران نشان دادند، ظرفیت باربری یک پی دایروی برابر با 555 کیلوپاسکال می باشد ولی ظرفیت باربری یک پی رینگی با قطر خارجی معادل با آن و البته با نسبت بهینه از قطر داخلی به خارجی به مقدار 655 کیلوپاسکال افزایش می یابد [۴] این نشان می دهد با استفاده از مصالح کمتر در پی رینگی می توان خروجی بهتری نسبت به پی دایروی با قطر خارجی معادل بدست آورد که این موضوع صرفه اقتصادی نیز به همراه خواهد داشت.

از دیگر راه های موثر در بهبود عملکرد پی های رینگی، می توان به افزایش زبری کف پی اشاره کرد. به طور مثال کومار و قوش^۲ نشان دادند که افزایش زبری کف پی تاثیر شگرفی در افزایش ضریب ظرفیت باربری (N_p) دارد [۵]. همچنین ژائو و وانگ^۳ نیز نشان دادند با زبر کردن کف یک پی رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی 0.5 ضریب ظرفیت باربری N_p از $3/91$ به $13/86$ افزایش می یابد [۶] کشاورز و کومار^۴ نیز نشان دادند با افزایش زبری کف پی هر سه ضریب ظرفیت باربری (N_p , N_q , N_c) به مقدار چشمگیری افزایش می یابد [۷]. متراکم کردن بستر زیرین پی نیز یکی از راههای موثر در بهبود عملکرد پی های رینگی می باشد. مثلا ای صواف و نظیر^۵ نشان دادند که با افزایش تراکم بستر، می توان نشست پی را تا $6/73\%$ کاهش داد [۳] در پژوهش حاضر نیز سعی شده با توجه به موارد فوق این دو مورد اخیر یعنی زبری کف پی و همچنین تراکم بستر تامین شود که در بخش های آتی بدان اشاره خواهد شد.

علاوه بر موارد مذکور فوق، نتایج مطالعات قبلی نشان می دهد که استفاده از انواع ژئوسنتتیک ها در بستر زیرین پی های رینگی، می تواند تاثیر بسزایی در بهبود رفتار این گونه از پی ها داشته باشد و در صورتی که از مقادیر بهینه پارامترهای موثری همچون فاصله اولین لایه ژئوسنتتیک تا زیر پی (u)، فاصله بین لایه ها (h)، عرض لایه ها (L) و تعداد لایه ها (N) استفاده شود، ظرفیت باربری به مقدار قابل توجهی نسبت به حالت غیر مسلح افزایش می یابد. مثلا بوشهریان و هاتاف^۶ دریافتند که به به کار بردن سه لایه ژئوگرید که در فواصل

- 1 Sharma
- 2 Kumar and Ghosh
- 3 Zhao and Wang
- 4 Keshavarz and Kumar
- 5 EI Sawwaf and Nazir
- 6 Boushehrian and Hataf

7 Laman and Yildiz
8 Gotteland et al.

رفتار پی موثر می باشد. البته هر کدام از این پارامترها مقدار بهینه ای دارد و افزایش بیش از حد آن سبب ایجاد آثار منفی می گردد [۱۹] - [۱۶] مثلا مقدس تفرشی و نوروزی^۵ با انجام آزمایش هایی بر روی پی مربعی با ابعاد ۱۰ سانتیمتر مستقر بستر ماسه ای (SP) مسلح شده با خرده لاستیک نواری دریافتند که با بکار بردن ۰.۵٪ خرده لاستیک در لایه ای به ضخامت بهینه برابر با نصف بعد پی که در عمق بهینه ای (فاصله لایه خاک - خرده لاستیک تا زیر پی) برابر با ۰/۲۵ بعد پی قرار دارد، می توان ظرفیت باربری آن را تا ۲۰۶٪ نسبت به حالت غیر مسلح افزایش داد. این در حالی است که با افزایش بیشتر هر یک از این مقادیر بهینه، میزان افزایش ظرفیت باربری، کاهش می یابد [۱۶] همچنین مقدس تفرشی و دارابی^۶ با انجام آزمایش هایی بر روی پی دایروی با قطر ۳۰ سانتیمتر مستقر بستر ماسه ای (SW) مسلح شده با خرده لاستیک دانه ای دریافتند که درصد بهینه این نوع از خرده لاستیک ۰.۸٪ بوده و همچنین ضخامت بهینه لایه مخلوط خاک- خرده لاستیک برابر با ۰/۴ برابر قطر پی می باشد که با بکار بردن این مقادیر بهینه می توان ظرفیت باربری پی را تا ۵۴٪ نسبت به حالت غیرمسلح افزایش داد [۱۷] میتال و گیل^۷ نیز با مطالعه بر روی پی های نواری مستقر بر بستر ماسه ای مسلح شده با چیپس لاستیک دریافتند که در صورت بکار بردن درصد بهینه خرده لاستیک در بستر زیرین پی و همچنین ارتفاع بهینه لایه مخلوط خاک - خرده لاستیک، این نوع از مسلح کننده تاثیر بیشتری از مسلح کننده ژئوگرید چند لایه، در افزایش ظرفیت باربری دارد [۱۸] همچنین انواری و شوش پاشا^۸ دریافتند که استفاده از میزان بهینه (۱۰٪) خرده لاستیک دانه ای با سایز بهینه ۴ تا ۹ میلیمتر در بستر زیرین پی مربعی به ابعاد ۱۰ سانتیمتر می تواند ظرفیت باربری آن را تا ۵۰٪ افزایش دهد و استفاده از درصدهای بیشتر (از مقدار بهینه) سبب کاهش مجدد ظرفیت باربری حتی تا مقداری کمتر از بستر غیر مسلح می گردد [۱۹].

با توجه به مطالب مذکور فوق در مورد استفاده از انواع مسلح کننده ها از قبیل ژئوسنتتیک ها و خرده لاستیک که به تنهایی جهت تقویت بستر زیرین پی مورد استفاده قرار گرفته اند، به نظر می رسد استفاده همزمان از آن ها می تواند تاثیر مضاعفی بر بهبود رفتار پی

مخلوط خاک و خرده لاستیک (چیپس لاستیک) دریافتند با افزایش درصد خرده لاستیک تا مقدار بهینه، پارامترهای مقاومت برشی خاک افزایش و پس از آن با افزایش بیشتر درصد خرده لاستیک، رفتار مخلوط به رفتار شبه لاستیکی تغییر کرده و در نتیجه آن پارامترهای مقاومت برشی کاهش می یابد [۱۰] همچنین ادینکلیر و همکاران^۱ با انجام آزمایش های سه محوری دریافتند که به کار بردن ۰.۵٪ خرده لاستیک فیبری شکل با نسبت ابعاد ۳/۵ تا ۴ باعث ایجاد بیشترین زوایه اصطکاک داخلی (ϕ) و چسبندگی (C) در نمونه می شود و به کار بردن درصدهای بیشتر خرده لاستیک سبب کاهش مقاومت برشی می گردد [۱۱] ردی و همکاران^۲ نیز با انجام یک سری آزمایش ها برش مستقیم بزرگ مقیاس دریافتند که افزودن چیپس لاستیک با ابعاد ۲۰×۱۰ میلیمتر به خاک ماسه ای سبب افزایش مقاومت برشی آن می گردد. آن ها در مطالعات خود دریافتند که افزودن خرده لاستیک به خاک سبب کاهش چشمگیر وزن حجمی نمونه تا ۲۰٪ نسبت به حالت غیر مسلح می گردد نیز می گردد [۱۲] چناری و همکاران^۳ نیز آزمایش های خود را بر روی سه نوع خرده لاستیک با نسبت ابعاد مختلف انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که در صورت اعمال تغییر شکل های برشی زیاد به سیستم، مقاومت کششی ذرات با خرده لاستیک با طول زیاد فعال شده و باعث افزایش مقاومت برشی سیستم می گردد [۱۴] رضا زاده و همکاران^۴ نیز در طی مطالعات خود بر روی پنج نوع (از لحاظ دانه بندی و سایز دانه ها) خرده لاستیک دانه ای و چیپس لاستیک با استفاده از آزمایش های برش مستقیم دریافتند که خرده لاستیک های دانه ای سبب افزایش بیشتر مقاومت برشی نسبت به چیپس های لاستیک می شوند و دلیل آن توزیع بهتر فضاهای خالی در مخلوط خاک - خرده لاستیک دانه ای نسبت به مخلوط خاک - چیپس لاستیک است [۱۵]

با توجه به مطالب مذکور فوق به نظر می رسد افزودن خرده لاستیک به خاک می تواند سبب افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پی های مستقر بر بستر مسلح شده با خرده لاستیک گردد. نتایج مطالعات قبلی نشان می دهد پارامترهای مختلفی از قبیل درصد خرده لاستیک، ابعاد دانه های خرده لاستیک، ضخامت لایه مخلوط خاک- خرده لاستیک و لایه کلاهدک بالای آن بر میزان بهبود

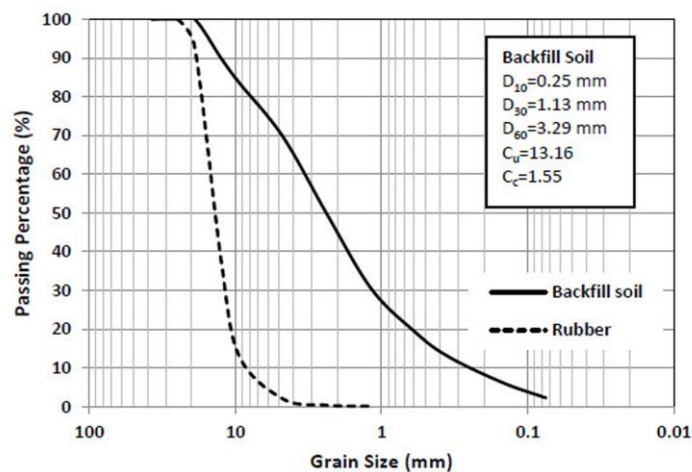
5 Moghassas Tafreshi and Norouzi
6 Moghassas Tafreshi and Darabi
7 Mittal and Gill
8 Anvari and Shooshpasha

1 Edinçiler, et al.
2 Reddy, et al.
3 Chenari, et al.
4 Rezazadeh, et al.

جدول ۱. مشخصات خاک

Table 1. Properties of soil

مقدار	پارامتر
۰/۲۵ mm	اندازه موثر دانه‌ها (D_{10})
۲/۳۵ mm	اندازه متوسط دانه‌ها (D_{50})
۱۳/۱۶	ضریب یکنواختی (C_u)
۱/۵۵	ضریب دانه بندی (C_c)
۰/۷۴	نسبت تخلخل حداکثر (e_{max})
۰/۳	نسبت تخلخل حداقل (e_{min})
۵/۴٪	درصد رطوبت (ω)
۴۱/۷°	زاویه اصطکاک (ϕ)



شکل ۱. منحنی دانه بندی ماسه و خرده لاستیک

Fig. 1. Particle size distribution curves for sand and rubber

غیر مسلح برسد [۲۰] همچنین مقدس تفرشی و همکاران^۲ دریافتند در صورت استفاده از ۳ لایه ژئوسل در زیر پی دایروی ظرفیت باربری تا ۱۳۰٪ نسبت به حالت غیر مسلح رشد می کند، این در حالی است که در صورت اضافه کردن لایه های مخلوط خاک - خرده لاستیک علاوه بر لایه های ژئوسل، ظرفیت باربری تا ۲۰۲٪ نسبت به حالت غیر مسلح رشد می یابد [۲۱].

در پژوهش حاضر و با توجه اهمیت پی های رینگگی و همچنین با توجه به مطالب مذکور فوق، به بررسی رفتار این گونه از پی ها در

داشته باشد که نتایج پژوهش های قبلی نیز صحت این موضوع را تایید می کند. مثلا توکلی و همکاران^۱ با انجام آزمایش های بارگذاری صفحه بر روی بستر ماسه ای که در آن لوله مدفون شده بود دریافتند در صورت استفاده از ۵ درصد خرده لاستیک نواری در فضای بالای لوله مدفون میزان نشست سطحی ۰/۶۴٪ حالت غیر مسلح است این در حالی است که افزودن یک لایه ژئوسنتتیک به مجموعه فوق (ترکیب خاک و ۵ درصد خرده لاستیک) سبب می شود این مقدار به ۰/۳٪ حالت

2 Moghassas Tafreshi et al.

1 Tavakoli et al.



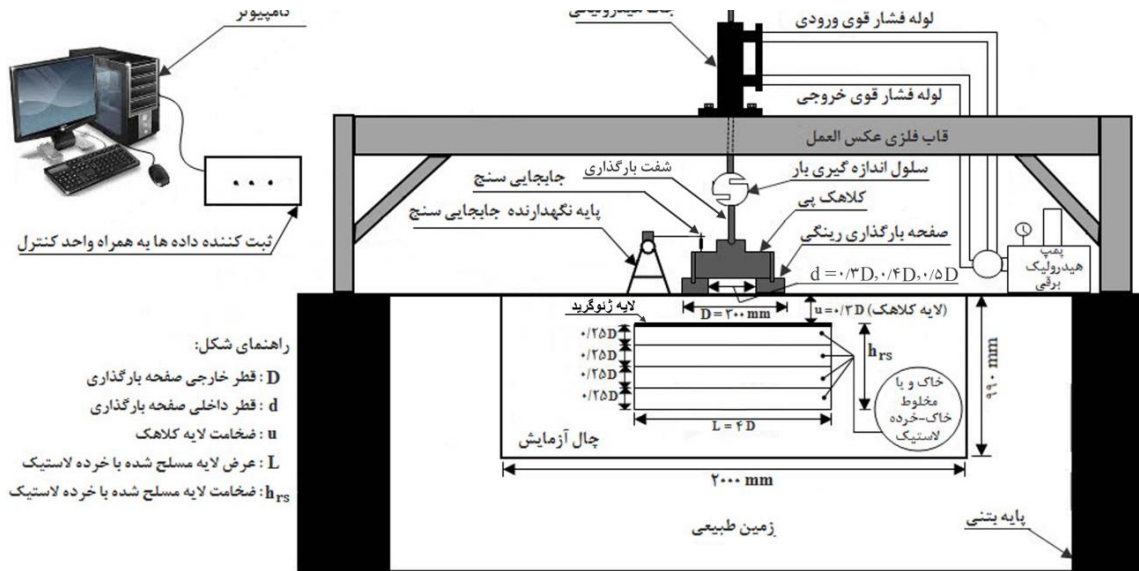
شکل ۲. خرده لاستیک دانه ای استفاده شده در آزمایش ها
Fig. 2. Granulated rubber used in tests



شکل ۳. ژئوگرید استفاده شده در آزمایشها
Fig. 3. Geogrid used in tests

تحقیق حاضر می توان بدان اشاره نمود، استفاده همزمان از ژئوگرید و خرده لاستیک بر بهبود بیشتر رفتار پی های رینگی و همچنین تاثیر استفاده از ژئوگرید بر ضخامت بهینه لایه مخلوط خاک - خرده لاستیک با توجه به فعال شدن نقش تسلیح کنندگی لایه های عمیق تر مخلوط خاک و خرده لاستیک در صورت استفاده از ژئوگرید (که بحث های تفصیلی آن در بخش ۵-۳ آمده است) می باشد. لازم به ذکر است در تمامی مطالعات قبلی (بر روی انواع دیگر پی ها) که البته بسیار ارزشمند بوده و در قسمت های مختلف تحقیق حاضر نیز از آن ها استفاده شده است، نسبت ضخامت بهینه لایه مخلوط خاک - خرده لاستیک در زمانی که مسلح کننده ی دیگری وجود ندارد تعیین شده است و یا در برخی تحقیقات دیگر فاصله بهینه دو

برابر بارهای استاتیکی پرداخته می شود. برای این منظور رفتار این گونه از پی ها بر روی انواع بسترهای غیر مسلح، مسلح شده با خرده لاستیک (به تنهایی)، مسلح شده با ژئوگرید (به تنهایی) و همچنین مسلح شده با ترکیب ژئوگرید- خرده لاستیک، مورد ارزیابی و مقایسه قرار می گیرد. در طی این مسیر به بررسی تاثیر پارامترهای مختلفی بر رفتار پی از قبیل نسبت قطر داخلی به خارجی پی رینگی و همچنین ضخامت لایه مخلوط خاک - خرده لاستیک، نیز پرداخته می شود. لازم به ذکر است، استفاده از خرده لاستیک در زیر پی رینگی و پیدا کردن ضخامت بهینه لایه مخلوط خاک- خرده لاستیک و همچنین میزان تاثیر آن بر رفتار پی های رینگی برای اولین بار در این تحقیق ارائه شده است. نوآوری دیگری که



شکل ۴. شمای کلی آزمایش ها و دستگاه مربوطه

Fig. 4. General overview of tests and related device



شکل ۵. تصویری از کوبیدن بستر با کمپکتور بنزینی

Fig. 5. An image of compacting the bed with a gasoline compactor

جدول ۲. وزن مخصوص لایه های مختلف پس از تراکم

Table 2. Densities of different layers after compaction

متوسط وزن مخصوص (kN/m^3)	نوع لایه
۱۸/۱۲*	خاک غیر مسلح
۱۳/۲	مخلوط خاک- خرده لاستیک

خاک غیرمسلح شده است و همانطور که ذکر شد تاثیر استفاده از ژئوگرید بر ضخامت بهینه لایه مخلوط خاک - خرده لاستیک برای اولین بار در تحقیق حاضر مورد توجه قرار گرفته است.

لایه از ژئوسنتتیک بدون حضور لایه مخلوط خاک- خرده لاستیک تعیین شده و سپس لایه مخلوط خاک-خرده لاستیک با ضخامتی برابر با همان فاصله بهینه بدست آمده از مرحله قبلی جایگزین

۲- مواد و مصالح

۲-۱- خاک

خاک مورد استفاده در تمامی آزمایش‌ها از نوع ماسه‌ای بوده که برای پر کردن چال آزمایش که در زمین طبیعی حفر شده بود از آن استفاده گردید. لازم به ذکر است بر طبق سیستم طبقه بندی متحد (ASTM D 11-2487) [۲۲] این خاک از نوع خوب دانه بندی شده می باشد که مشخصات و دانه بندی آن به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

۲-۲- خرده لاستیک

خرده لاستیک مورد استفاده در این پژوهش، از نوع خرده لاستیک دانه‌ای با محدوده اندازه ذرات از ۲ تا ۲۰ میلی‌متر و قطر متوسط ذرات (D_{50}) ۱۴ میلی‌متر می باشد. چگالی دانه‌ها (G_s) نیز ۱/۱۵ می باشد. نمودار دانه بندی و همچنین شکل خرده لاستیک مورد استفاده به ترتیب در اشکال ۱ و ۲ نشان داده شده است. خوبی این نوع از خرده لاستیک نحوه آسان اختلاط آن با خاک با استفاده از خلطه می باشد. همچنین بر طبق نتایج حاصل از مطالعات قبلی، این نوع از خرده لاستیک تاثیر بسزایی در بهبود عملکرد بستر زیرین پی داشته است [۱۷ و ۲۱] سیه و مائو با استفاده از آزمایش‌های متعدد بر روی پی‌هایی با ابعاد مختلف و مستقر بر بسترهایی با دانه بندی متغییر (از ریز دانه تا درشت دانه)، نشان دادند در صورتی که ابعاد صفحه بارگذاری از ۱۵ برابر قطر متوسط ذرات بستر بزرگتر باشد، دیگر قطر صفحه بارگذاری تاثیر چندانی بر نتایج ندارد. همچنین نتایج مطالعات بعدی نیز نشان داد در صورت رعایت کردن معیار فوق، نتایج از تکرار پذیری بالایی برخوردار می باشد [۲۰ و ۲۱ و ۲۴ و ۲۵]. در این پژوهش نیز با توجه به اندازه متوسط ذرات بستر اعم از خاک و خرده لاستیک که پیش تر بدان اشاره شد و همچنین بعد خارجی پی رینگی (۳۰۰ mm) و همچنین با توجه معیار مذکور فوق، بنظر نمی رسد بعد پی تاثیر چندانی بر نتایج آزمایش‌ها داشته باشد. لازم به ذکر است نتایج حاصل از آزمایش‌های تکراری نیز موید این مطلب می باشد.

۲-۳- ژئوگرید

ژئوگرید مورد استفاده در پژوهش حاضر از جنس پلی اتیلن با

تراکم بالا (HDPE) با نام تجاری CE131 بوده که ابعاد چشمه آن ۲۷ میلی‌متر و مقاومت کششی آن ۵/۸ کیلونیوتن بر متر می باشد. در شکل ۳ تصویر این ژئوگرید نشان داده شده است.

۳- نحوه انجام آزمایش و نحوه کارکرد دستگاه مربوطه

برای انجام آزمایش‌ها یک چال مربعی شکل به ابعاد ۲۰۰۰ میلی‌متر و عمق ۹۹۰ میلی‌متر در بستر طبیعی زمین حفر گردید تا فضا و زمان مناسب جهت مراحل مختلف آزمایش از قبیل اجرای لایه‌های مختلف خاک مسلح و غیر مسلح و همچنین کوبیدن این لایه‌ها فراهم گردد. لازم به ذکر است ابعاد چال به اندازه‌ای بزرگ می باشد تا بر نتایج آزمایش تاثیر نگذارد، چرا که طول و عرض چال تقریباً هفت برابر بعد پی می باشد و با توجه به نتایج پژوهش‌های قبلی، تاثیر چندانی بر نتایج آزمایش‌ها ندارد [۲۱ و ۲۵ و ۲۶] مرز پایینی چال آزمایش نیز در عمقی بیش از سه برابر قطر خارجی پی قرار گرفته است و طبق پژوهش‌های قبلی تاثیر چندانی بر نتایج ندارد [۲۷] همچنین روابط موجود در زمینه تنش انتشار یافته در بستر زیرین یک پی رینگی [۲۸] نیز نشان می دهد تنش انتشار یافته در این عمق با توجه به ابعاد پی‌های رینگی مورد آزمایش بسیار ناچیز (در حد ۰/۱ تنش اعمالی بر روی سطح پی) می باشد که نشان از مناسب بودن عمق چال آزمایش است. در شکل ۴ یک شمای کلی از قسمت‌های مختلف آزمایش‌ها نشان داده شده است. همانطور که از این شکل دیده می شود یک لایه کلاهک در بالای لایه‌های مسلح شده وجود دارد که ضخامت آن ۰/۳ برابر قطر خارجی پی رینگی و برابر با ۹۰ میلی‌متر می باشد. دیگر لایه‌ها اعم از لایه‌های خاکی غیر مسلح و همچنین لایه‌های مسلح شده با خرده لاستیک با ضخامت ۷۵ میلی‌متر یعنی یک چهارم قطر پی رینگی اجرا گردید. تمامی لایه‌ها (اعم از خاک غیرمسلح و همچنین مخلوط خاک - خرده لاستیک) با استفاده از یک کمپکتور بنزینی که ابعاد صفحه آن ۴۰×۴۰ سانتیمترمربع و عمق تاثیر آن بین ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر بوده است، متراکم می شدند. این کمپکتور در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به عمق تاثیر کمپکتور و همچنین ضخامت لایه‌های اجرایی، باید گفت اولاً این کمپکتور برای کوبش لایه‌هایی با ضخامت‌های مذکور، مناسب بوده و ثانیاً متراکم کردن هر لایه توسط کمپکتور مذکور تاثیر چندانی بر تراکم لایه‌های زیرین آن لایه، ندارد. لازم به ذکر است که لایه‌های خاک غیر مسلح و همچنین لایه‌های



شکل ۶. تصویر واقعی دستگاه آزمایش
Fig. 6. Real photograph of the test set-up

برابر با D_4 در نظر گرفته شد [۳ و ۸] درصد بهینه خرده لاستیک نیز برابر با ۸٪ وزنی کل مخلوط خاک- خرده لاستیک در نظر گرفته شد [۲۱] برای اجرای لایه های خاک -خرده لاستیک، همانطور که اشاره شد خرده لاستیک با استفاده از یک خلاطه با خاک (با نسبت ذکر شده ۸ درصد وزنی) مخلوط می شد و سپس با ضخامت ذکر شده (۷۵ میلیمتر) در درون چال ریخته و متراکم می شد. لازم به ذکر است بر طبق نتایج مطالعات قبلی، یک لایه خاک غیر مسلح بعنوان لایه کلاهک در بالای لایه های تسلیح، جهت بهبود عملکرد این لایه ها در نظر گرفته شد [۱۶ و ۲۱]

همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، سیستم بارگذاری شامل قسمت های مختلفی از قبیل قاب بارگذاری جهت تامین نیروی عکس العمل، پمپ و جک هیدرولیکی برای تامین بار به ظرفیت ۱۰ تن، سلول اندازه گیری بار به ظرفیت ۱۰ تن و دقت ۰/۰۱٪ و سیستم انتقال بار شامل شفت بارگذاری، کلاهک پی و صفحه بارگذاری فولادی رینگ صلب (با ضخامت ۲۵/۴ میلیمتر، قطر خارجی ثابت (D) ۳۰۰ میلیمتر و قطرهای داخلی (d) متغییر با نسبت قطر داخلی به خارجی $0/D_3$ ، $0/D_4$ و $0/D_5$) می باشد. برای تامین نیروی

مسلح شده با خرده لاستیک هر کدام بترتیب با دو و سه بار عبور کمپکتور متراکم گشته و عبور بیشتر کمپکتور تاثیر چندانی بر تراکم بیشتر و افزایش وزن مخصوص لایه ها نداشته است.

وزن مخصوص هر لایه پس از کوبیده شدن با استفاده از سه آزمایش متوالی مخروط ماسه (طبق استاندارد ASTM-D1556 /ASTM 15-D1556M [۲۹]) بدست آمد که نتایج حاصل از آن در جدول ۲ ارائه شده است. همانطور که از نتایج موجود در این جدول دیده می شود وزن مخصوص لایه خاک - خرده لاستیک از وزن مخصوص لایه خاکی غیر مسلح کمتر است که می تواند مربوط به سبک بودن دانه های لاستیک باشد.

*درجه تراکم تقریبی خاک غیر مسلح ۹۰٪ می باشد

لازم به ذکر است برخی از پارامترهای آزمایش از نتایج حاصل از مطالعات قبلی انتخاب گردیدند تا از تعدد بیش از حد پارامترهای مورد بررسی که باعث صرف زمان و هزینه زیاد می گردید، جلوگیری شود. به عنوان مثال ژئوگرید در عمق بهینه ای برابر با $0/D_3$ قرار داده شد (ضخامت لایه کلاهک برابر با عمق بهینه لایه ژئوگرید می باشد) و همچنین عرض آن مطابق عرض بهینه بدست آمده در مطالعات قبلی

جدول ۳. برنامه انجام آزمایش ها

Table 3. Testing program

هدف آزمایش	تعداد آزمایش	تعداد لایه ژئوگرید	نسبت ضخامت لایه مسلح شده به قطر خارجی پی رینگی (hrs/D)	نسبت قطر داخلی به خارجی پی رینگی (d/D)	نوع بستر پی	سری آزمایش
برای مقایسه با بستر مسلح و یافتن مقدار بهینه نسبت قطر داخلی به خارجی پی در شرایط غیر مسلح	*۳+۳	-	۰	۰/۳، ۰/۴، ۰/۵	غیر مسلح	۱
برای یافتن اثر تسلیح، یافتن مقدار بهینه نسبت قطر داخلی به خارجی پی در شرایط مسلح و یافتن ضخامت بهینه لایه مسلح	*۱۲+۶	-	۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱	۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵	مسلح شده با خرده لاستیک	۲
برای یافتن اثر تسلیح با ژئوگرید به تنهایی و در ترکیب با خرده لاستیک، و یافتن ضخامت بهینه لایه مسلح شده با خرده لاستیک در شرایط حضور ژئوگرید	*۵+۳	۱	۰، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵	۰/۴	مسلح شده با خرده لاستیک و ژئوگرید	۳

در درون این دیتا لاگر قرار داده شده بود که می توانست با کمک نرم افزار موجود در رایانه متصل به دیتا لاگر، بار استاتیکی را با سرعت یک کیلو پاسکال بر ثانیه به سیستم اعمال کند. همچنین برای سنجش میزان تطابق مسیر بار اعمالی با بار واقعی اعمال شده به مجموعه، این دو بار همزمان با استفاده از نرم افزار موجود در رایانه رصد می شدند که نتایج آن نشان دهنده تطابق قابل قبولی بین این دو مقدار بود. لازم به ذکر است که بار استاتیکی تا زمان گسیختگی بستر ادامه می یافت و اگر گسیختگی قابل توجهی رخ نمی داد، بار استاتیکی تا ۱۰۰۰ کیلو پاسکال برای حالات غیر مسلح و همچنین حالات مسلح شده با مخلوط خاک و خرده لاستیک و تا ۱۴۰۰ کیلو پاسکال برای حالات مسلح شده با ژئوگرید و یا رسیدن به نشست برابر با ۰/۲۵٪ قطر خارجی پی (هر کدام که زودتر رخ دهد) ادامه داده می شد. در شکل ۶ یک تصویر واقعی از دستگاه آزمایش نشان داده شده است.

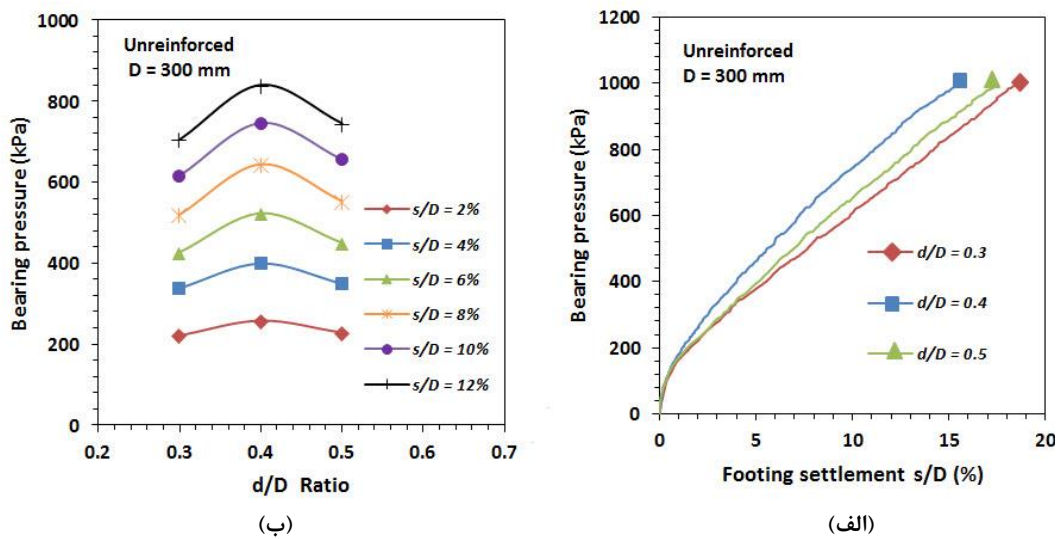
۴- برنامه انجام آزمایش ها

بر طبق جدول ۳ برنامه انجام آزمایش ها مشتمل بر سه سری

اصطکاک لازم یک ورق سنباده ای به کف صفحه بارگذاری چسبانده شد. همچنین برای ایجاد امکان حرکت آزادانه صفحه بارگذاری، انتهای شفت بارگذاری بصورت کروی شکل طراحی شده بود که این بخش در قسمت فوقانی کلاهک پی که بصورت کاسه ای شکل بود، قرار می گرفت. بدین ترتیب اجازه نشست های نامتقارن احتمالی به پی داده می شد. برای قسمت تحتانی کلاهک پی نیز از یک لوله کاملاً صلب استفاده شد که این لوله در داخل شیار تراشیده شده بر روی صفحات بارگذاری، قرار می گرفت.

از دو جابجایی سنج (LVDT) با دقت ۰/۰۱ درصد در محدوده ۱۰۰ میلیمتر در دو طرف صفحه بارگذاری، برای اندازه گیری نشست استفاده می شد. این جابجایی سنج ها توسط یک پایه مغناطیسی به یک پایه نگهدارنده مستقل از قاب بارگذاری متصل می شدند.

پس از انجام هر سری از آزمایش ها، دستگاه ها کالیبره می شدند تا از خطاهای احتمالی جلوگیری شود. برای ثبت داده های حاصل از دستگاه های اندازه گیری، از یک دیتا لاگر (Data Logger) با سرعت یک نمونه در ثانیه استفاده می شد. البته یک واحد کنترل نیز



شکل ۷. تغییرات ظرفیت باربری پی رینگ مستقر بر بستر غیر مسلح در برابر الف) نسبت نشست پی به قطر خارجی آن (s/D) و ب) نسبت قطر داخلی به خارجی پی (d/D) در نسبت‌های نشست مختلف

Fig. 7. Variation of bearing pressure of ring footing based on unreinforced bed with (a) the ratio of footing settlement to outer diameter of ring footing (s/D), and (b) the inner to outer diameter ratio of ring footing (d/D) at different values of settlement ratio

تا تاثیر تسلیح با مسلح کننده‌های مختلف از مقایسه با این سری از آزمایش‌ها مشخص شود. همچنین هدف دیگر این آزمایش‌ها یافتن نسبت بهینه قطر داخلی به خارجی پی بوده است. در شکل ۷-الف نمودار بار-نشست برای انواع پی‌های رینگ با نسبت قطر داخلی به خارجی متغییر رسم شده است. همانطور که از این شکل دیده می‌شود، نقاط مشخصی که نشان از گسیختگی باشد، وجود نداشته و فقط یک تغییر شیب کوچک در محدوده ۱ تا ۴ درصد از نسبت نشست (نسبت نشست پی به قطر خارجی آن s/D) دیده می‌شود. این

*آزمایش‌های تکراری

- تغییر شیب می‌تواند ناشی از شکست‌های موضعی در نواحی اطراف پی باشد که نتیجه آن کاهش ظرفیت باربری پی است. البته بعد از تغییر شیب، شیب نمودار بصورت ثابت ادامه می‌یابد که نشان می‌دهد، این حالت از آسیب دیدگی بصورت پیشرونده ادامه می‌یابد [۲۱]

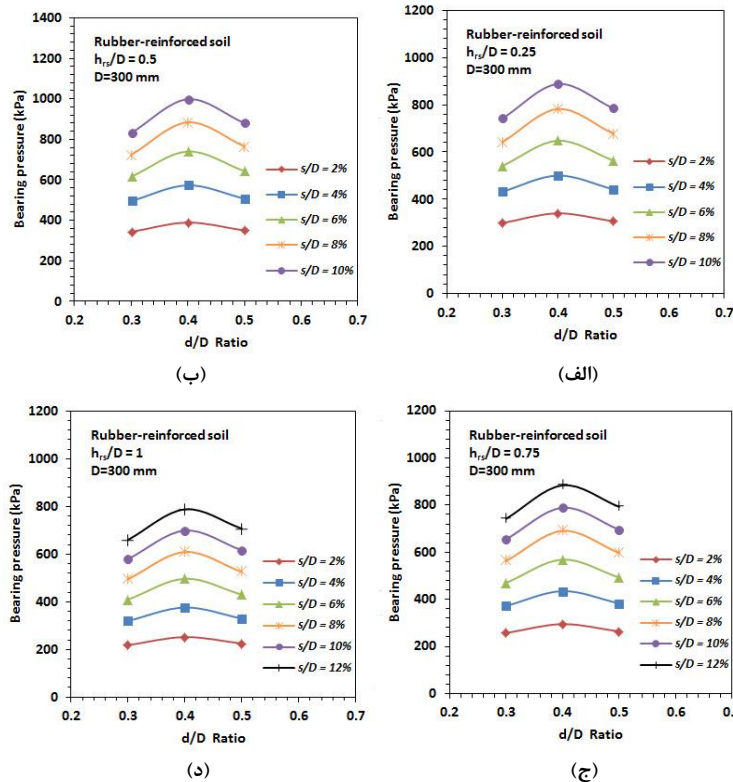
برای مقایسه راحت‌تر پی‌های رینگ با نسبت قطر داخلی به خارجی مختلف، شکل ۷-ب از روی داده‌های بدست آمده از شکل ۷-الف ترسیم گردیده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، در شکل ۷-ب نمودار تغییرات ظرفیت باربری در برابر تغییرات نسبت قطر داخلی به خارجی پی رینگ، در محدوده نسبت‌های مختلف نشست

آزمایش بر روی بستر غیر مسلح، مسلح شده با خرده لاستیک، مسلح شده با ژئوگرید و همچنین مسلح شده با ترکیب خرده لاستیک و ژئوگرید می‌باشد. تعداد کلی آزمایش‌ها ۳۲ آزمایش می‌باشد که ۱۲ مورد آن مربوط به آزمایش‌های تکراری می‌باشد. این آزمایش‌های تکراری جهت ارزیابی میزان تکرار پذیری آزمایش‌ها انجام گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌های تکراری تفاوت چندانی را نسبت به آزمایش‌های اصلی نشان نداده و حداکثر آن در حدود ۸٪ می‌باشد. این مقدار برای کارهای ژئوتکنیکی به نظر معقول می‌آید. پارامترهای مورد بررسی و همچنین اهداف هر سری آزمایش در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود تاثیر پارامترهای مهمی همچون نسبت قطر داخلی (d) به خارجی (D) پی‌های رینگ مستقر بر بسترهای غیر مسلح و مسلح شده با مخلوط خاک - خرده لاستیک و همچنین تاثیر ضخامت لایه مسلح شده با خرده لاستیک (h_p) در دو شرایط حضور و عدم حضور ژئوگرید، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۵- بحث و نتایج

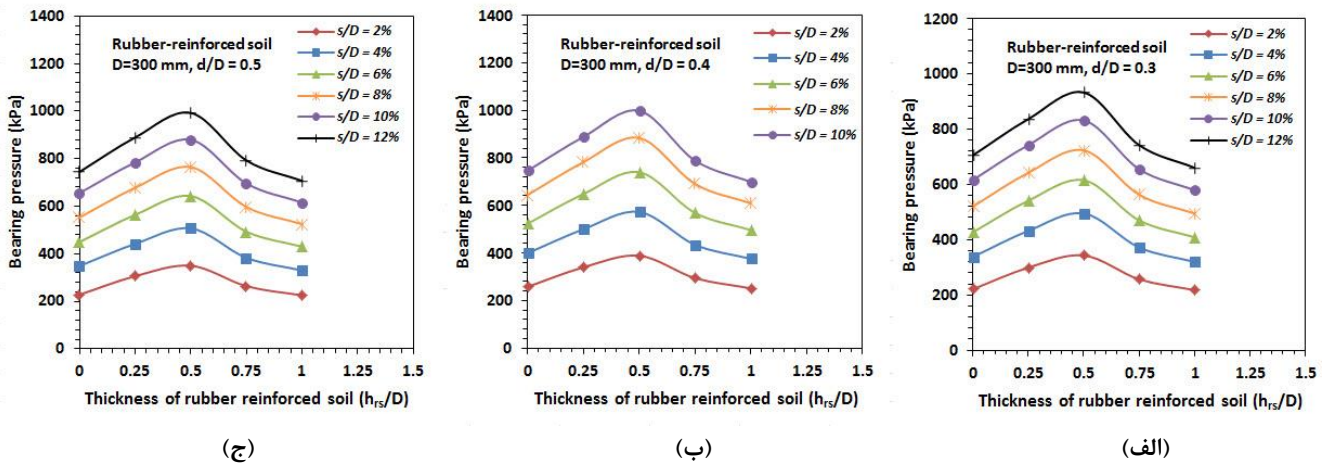
۵-۱- تاثیر نسبت قطر داخلی به خارجی پی رینگ مستقر بر بستر غیر مسلح

همانطور که در جدول ۳ بدان اشاره شد، آزمایش‌های سری اول بر روی پی‌های رینگ مستقر بر بستر غیرمسلح انجام گرفت



شکل ۸. تغییرات ظرفیت باربری پی رینگی در برابر نسبت قطر داخلی به خارجی پی (d/D) در نسبت‌های نشست مختلف و برای پیه‌های مستقر بر بستر مسلح شده با نسبت ضخامت (h_{rs}/D) برابر با الف (۲۵/۰، ب (۵/۰، ج (۷۵/۰ و د (۱

Fig. 8. Variation of bearing pressure of ring footing with inner to outer diameter ratio (d/D), at different values of settlement ratio for footings based on rubber reinforced bed with thickness ratio (h_{rs}/D) equals to (a) 0.25, (b) 0.5, (c) 0.75 and (d) 1



شکل ۹. تغییرات ظرفیت باربری پی رینگی در برابر تغییرات نسبت ضخامت (h_{rs}/D) در نسبت‌های نشست مختلف و برای پی‌های رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی (برابر با الف (۳/۰، ب (۴/۰، ج (۵/۰ و مستقر بر بسترهای غیر مسلح ($h_{rs}/D=0$) و مسلح شده با مخلوط خاک-خرده لاستیک

Fig. 9. Variation of bearing pressure of ring footings with thickness ratio of rubber-reinforced layer (h_{rs}/D) at different settlement ratio (s/D), for ring footing with inner to outer diameter ratio (d/D) equals to (a) 0.3, (b) 0.4 and (c) 0.5, based on unreinforced bed ($h_{rs}/D=0$) and rubber-reinforced bed

به بازه کاربردی از نشست پی و فقط با توجه به نقطه گسیختگی نهایی که معمولاً در نسبت‌های بالا از نشست (حتی تا ۰.۵٪) رخ

(s/D) ۲ - ۱۲٪ رسم شده است. لازم به ذکر است که در بسیاری از پژوهش‌های قبلی، قضاوت در مورد عملکرد پی‌ها بدون توجه

مانند یک جسم صلب عمل می کند. با بزرگتر شدن شعاع داخلی، این بخش کم کم از بین می رود و هر یک از طرفین پی به صورت مستقل (دو پی نواری مستقل) عمل می کنند که این اثر همراه با اثر ناشی از کاهش تنش های ناشی از حالت تداخلی تقارن محور، عملا تنش های نهایی کمتری را برای گسیختگی به دنبال خواهد داشت [۲۸]

۵-۲- تاثیر تسلیح بستر با خرده لاستیک بر رفتار پی رینگی

نتایج ارائه شده در این بخش، حاصل از آزمایش های سری دوم (رجوع به جدول ۳) بر روی بستر مسلح شده با خرده لاستیک می باشد. پارامترهای مورد بررسی در این بخش نسبت قطر داخلی به خارجی پی (d/D) و نسبت ضخامت لایه مخلوط خاک - خرده لاستیک به قطر خارجی پی رینگی (h_{rs}/D) می باشد.

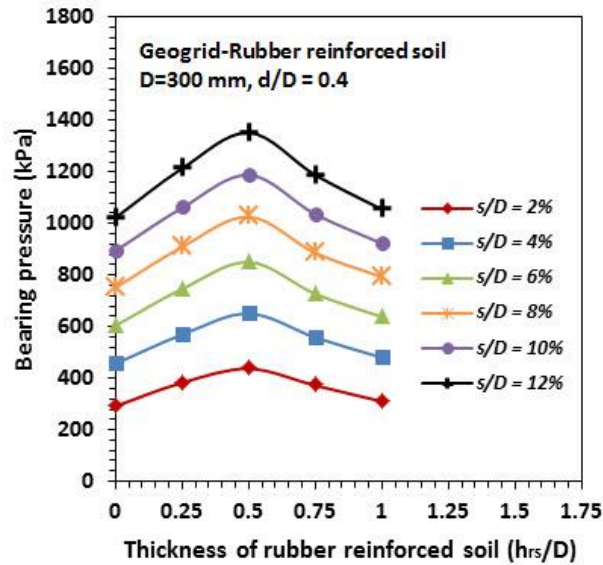
در شکل ۸-الف، ب، ج و د نمودار تغییرات ظرفیت باربری در برابر تغییرات نسبت قطر داخلی به خارجی پی رینگی، در محدوده نسبت های مختلف نشست (s/D) ۲ - ۱۲٪، برای پی های رینگی مستقر بر بستر مسلح شده با ضخامت های مختلف از لایه خاک - خرده لاستیک، رسم شده است. همانطور که مشاهده می شود در تمامی حالات از بستر مسلح شده با خرده لاستیک (با ضخامت های مختلف)، همچون بستر غیر مسلح، پی رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/۴ دارای بیشترین ظرفیت باربری می باشد. مثلا در نسبت نشست (s/D) ۶٪ و نسبت ضخامت (h_{rs}/D) ۰/۵، ظرفیت باربری پی های رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ بترتیب برابر ۶۱۵، ۷۴۰ و ۶۴۳ کیلوپاسکال می باشد که این مقادیر نشان از افزایش ۲۰/۳ و ۱۵/۱ درصدی ظرفیت باربری پی رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/۴، نسبت به پی های رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/۳ و ۰/۵ می باشد.

در شکل ۹-الف، ب و ج نمودار تغییرات ظرفیت باربری در برابر تغییرات نسبت ضخامت لایه خاک - خرده لاستیک، در محدوده نسبت های مختلف نشست (s/D) ۲ - ۱۲٪، برای پی های رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی مختلف (۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵) رسم شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می شود، در تمامی نسبت های نشست، با افزایش ضخامت لایه مخلوط خاک - خرده لاستیک تا مقداری برابر با نصف قطر خارجی پی رینگی، ظرفیت باربری آن پی صرفنظر از نسبت قطر داخلی به خارجی آن،

می دهد، بوده است [۳۰-۳۲] حال آن که در واقعیت این نسبت ها از نشست کاربردی نمی باشد. در برخی از پژوهش های اخیر [۳۳] قضاوت در مورد رفتار پی در نسبت های نشست زیر ۱۲٪ که کاربردی می باشند، انجام گرفته است. همانطور که اشاره شد در پژوهش حاضر نیز مقایسه ها در نسبت های نشست زیر ۱۲٪ صورت گرفته است. با توجه به شکل ۷-الف و البته شکل ۷-ب مشخص می شود که در یک سطح مشخص از نسبت نشست پی (s/D)، با افزایش نسبت قطر داخلی به خارجی پی (d/D) تا مقداری برابر با ۰/۴، ظرفیت باربری پی رینگی مستقر بر بستر غیر مسلح افزایش یافته و افزایش بیشتر این پارامتر (d/D) سبب کاهش ظرفیت باربری می گردد. مثلا در نسبت نشست (s/D) ۶٪، ظرفیت باربری پی های رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ بترتیب برابر ۴۲۷، ۵۲۳ و ۴۵۰ کیلوپاسکال می باشد که نشان می دهد با افزایش نسبت قطر داخلی به خارجی از ۰/۳ به ۰/۴ ظرفیت باربری ۲۲/۵ درصد افزایش و سپس با افزایش نسبت قطر داخلی به خارجی از ۰/۴ به ۰/۵ ظرفیت باربری ۱۴٪ کاهش داشته است. نتایج حاصل از پژوهش های قبلی نشان می دهد، در صورت استفاده از یک مقدار خاص و یا بهینه از نسبت قطر داخلی به خارجی پی رینگی، تراکم خاک موجود در ناحیه داخل رینگ بدلیل پدیده قوس زدگی ناشی از اثر تداخلی دو طرف رینگ، افزایش می یابد، ولی در پی های رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی بیش از مقدار بهینه، پی رینگی همانند دو پی نواری مستقل بدون اثر تداخلی عمل کرده و در نتیجه ظرفیت باربری کاهش می یابد [۱ و ۳۴] همچنین توکلی و جمشیدی^۱ در تحلیل انواع حالات گسیختگی در زیر پی های رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی متغییر بیان داشتند در حالتی که نسبت قطر داخلی به خارجی بسیار اندک می باشد، رفتار پی رینگی همچون پی منفرد دایروی بوده و پس از آن بتدریج با افزایش نسبت قطر داخلی به خارجی با توجه به اثر تداخلی دو ناحیه گسیختگی در دو طرف پی، بخش بزرگتری از زیر پی در شکل گیری مکانیزم گسیختگی وارد می گردد و نیروی بیشتری برای گسیختگی لازم است. در حقیقت این نیرو صرف غلبه بر یک ناحیه در تله افتاده^۲ و خاک موثر برای ایجاد مقاومت بیشتر در بخش میانی پی می شود که به نظر می رسد

1 Tavakoli and Jamshidi

2 Entrapped rigid zone



شکل ۱۰. تغییرات ظرفیت باربری پی رینگ در برابر تغییرات نسبت ضخامت (h_{rs}/D) در نسبت‌های نشست مختلف پی رینگ با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/۴ و مستقر بر بستر مسلح شده با ژئوگرید به تنهایی ($h_{rs}/D=0$) و در ترکیب با خرده لاستیک (۱، ۰/۷۵، ۰/۵، ۰/۲۵) ($h_{rs}/D=25/0, 5/0, 75/0, 1$)

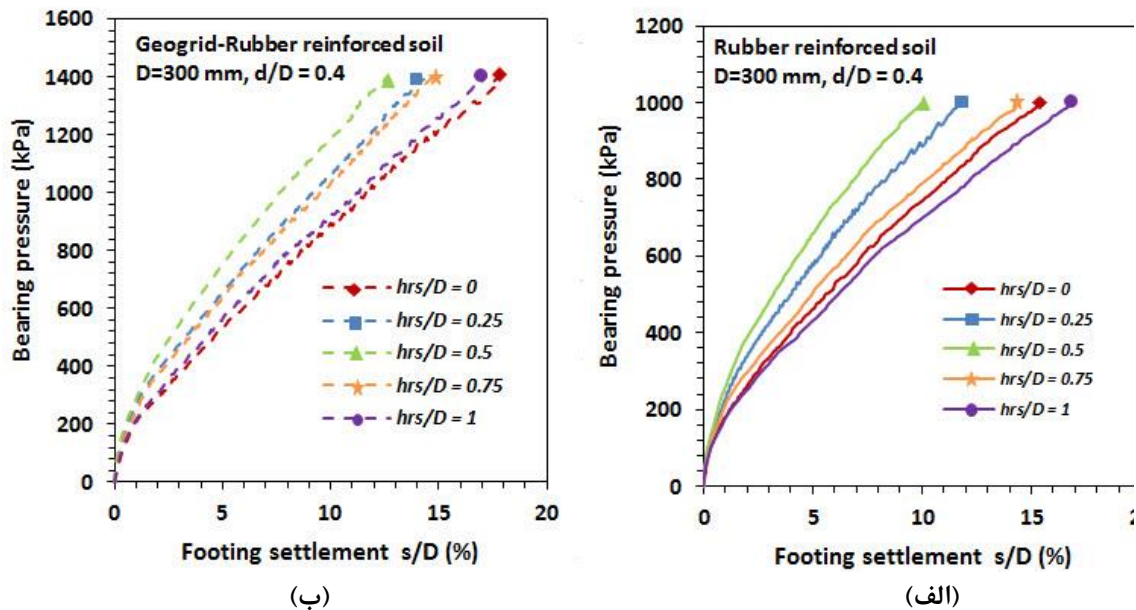
Fig. 10. Variation of bearing pressure of ring footings with thickness ratio of rubber-reinforced layer (h_{rs}/D) at different settlement ratio (s/D), for ring footing with inner to outer diameter ratios of 0.4, based on geogrid reinforced bed ($h_{rs}/D=0$) and geogrid-rubber reinforced bed ($h_{rs}/D = 0.25, 0.5, 0.75, 1$)

۵-۳- تاثیر تسلیح بستر با ژئوگرید به تنهایی و در ترکیب با خرده

لاستیک، بر رفتار پی رینگ

برای یافتن تاثیر مسلح کننده ژئوگرید به تنهایی (بدون حضور خرده لاستیک) و همچنین تاثیر استفاده همزمان از ژئوگرید و خرده لاستیک، آزمایش‌های سری سوم (رجوع به جدول ۳) بر روی پی رینگ با نسبت بهینه از قطر داخلی به خارجی ($d/D=0/4$) انجام گرفت. در شکل ۱۰ نمودار تغییرات ظرفیت باربری در برابر تغییرات نسبت ضخامت لایه خاک - خرده لاستیک، در محدوده نسبت‌های مختلف نشست (s/D) ۲-۱۲٪، برای پی رینگ با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/۴ که مستقر بر بستر مسلح شده با ژئوگرید به تنهایی ($h_{rs}/D=0$) و همچنین بستر مسلح شده با ترکیب با خرده لاستیک - ژئوگرید (۱، ۰/۷۵، ۰/۵، ۰/۲۵) ($h_{rs}/D=0/25, 0/5, 0/75, 1$) رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در بستر مسلح شده با ترکیب خرده لاستیک-ژئوگرید نیز همچون بستر مسلح شده با خرده لاستیک به تنهایی، ضخامت بهینه لایه مخلوط خاک - خرده لاستیک در تمامی نسبت‌های نشست، برابر با نصف قطر خارجی پی رینگ می‌باشد. همانطور که از این شکل دیده می‌شود، افزایش ضخامت لایه مذکور به بیشتر از ضخامت بهینه، اثر منفی داشته و سبب کاهش ظرفیت

نسبت به شرایط غیر مسلح افزایش می‌یابد و افزایش بیشتر این ضخامت سبب کاهش مجدد ظرفیت باربری می‌گردد. مثلا در نسبت نشست (s/D) ۶٪ ظرفیت باربری پی رینگ با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/۴ مستقر بر بسترهای غیر مسلح ($h_{rs}/D=0$) و بسترهای مسلح شده با نسبت‌های ضخامتی ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ بترتیب برابر با ۵۲۳، ۶۴۸، ۷۴۰، ۵۶۹ و ۴۹۷ کیلوپاسکال می‌باشد. یعنی با استفاده از ضخامت بهینه لایه خاک - خرده لاستیک که برابر با نصف قطر خارجی پی رینگ می‌باشد، ظرفیت باربری آن نسبت به حالت غیر مسلح در حدود ۴۱/۵ درصد افزایش می‌یابد. همانطور که از مقادیر فوق و همچنین شکل ۹ مشاهده می‌شود، با افزایش بیش از حد ضخامت لایه خاک - خرده لاستیک به مقداری برابر با قطر خارجی پی ($h_{rs}/D=1$)، ظرفیت باربری آن حتی در مواردی نسبت به شرایط غیر مسلح ($h_{rs}/D=0$) نیز کمتر می‌شود. دلیل این موضوع این است که با افزایش بیش از حد ضخامت لایه خاک - خرده لاستیک، رفتار آن از یک لایه مسلح، به یک لایه با قابلیت فشردگی پذیری بالا تغییر می‌کند که منجر به کاهش سختی بستر و افزایش نشست پی می‌گردد [۱۶ و ۱۷ و ۲۴]



شکل ۱۱. تغییرات ظرفیت باربری در برابر نشست پی رینگ پی مستقر بر (الف) بستر غیر مسلح ($h_{rs}/D=0$) و مسلح شده با لایه مخلوط خاک - خرده لاستیک با ضخامت متغییر (۱، ۰/۷۵، ۰/۵، ۰/۲۵) و (ب) بستر مسلح شده با ژئوگرید به تنهایی ($h_{rs}/D=0$) و بستر مسلح شده با ترکیب ژئوگرید - خرده لاستیک با ضخامت متغییر (۱، ۰/۷۵، ۰/۵، ۰/۲۵) ($h_{rs}/D=0$)

Fig. 11. Variation of bearing pressure of ring footing with settlement ratio (s/D) based on (a) unreinforced bed ($h_{rs}/d=0$) and rubber-reinforced bed with various thicknesses ratio ($h_{rs}/D = 0.25, 0.5, 0.75, 1$) and (b) geogrid reinforced bed ($h_{rs}/D=0$) and geogrid-rubber reinforced bed with various thicknesses ratio ($h_{rs}/D = 0.25, 0.5, 0.75, 1$)

بسترهای غیر مسلح، مسلح شده با ژئوگرید به تنهایی ($h_{rs}/D=0$)، مسلح شده با خرده لاستیک به تنهایی با نسبت ضخامت بهینه $h_{rs}/D=0/5$ و مسلح شده با ترکیب ژئوگرید - خرده لاستیک با نسبت ضخامت بهینه $h_{rs}/D=0/5$ بترتیب برابر با ۷۴۰، ۶۰۵، ۵۲۳ و ۸۵۱ کیلوپاسکال می باشد که نشان می دهد ظرفیت باربری پی رینگ پی مستقر بر بستر مسلح شده با ژئوگرید به تنهایی، مسلح شده با خرده لاستیک به تنهایی و مسلح شده با ترکیب ژئوگرید - خرده لاستیک بترتیب ۱۵/۷، ۴۱/۵ و ۶۲/۷ درصد، نسبت به حالت غیر مسلح افزایش می یابد.

از مقایسه اشکال ۹-ب و ۱۰ مشخص می شود میزان کاهش ظرفیت باربری در اثر افزایش نسبت ضخامت لایه مخلوط خاک - خرده لاستیک از مقدار ۰/۵ به مقدار ۰/۷۵، برای پی رینگ پی مستقر بر بستر مسلح شده با ترکیب ژئوگرید - خرده لاستیک نسبت به بستر مسلح شده با خرده لاستیک به تنهایی (بدون حضور ژئوگرید)، کمتر می باشد. مثلاً در نسبت نشست (s/D) ۰/۶ و در بستر مسلح شده با خرده لاستیک به تنهایی، میزان ظرفیت باربری از ۷۴۰ کیلوپاسکال

باربری پی می گردد. مثلاً در نسبت نشست (s/D) ۰/۶، ظرفیت باربری پی رینگ پی با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/۴ مستقر بر بسترهای مسلح شده با ژئوگرید به تنهایی ($h_{rs}/D=0$) و همچنین بستر مسلح شده با ترکیب با خرده لاستیک - ژئوگرید با نسبت های ضخامت از لایه خرده لاستیک برابر با ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ بترتیب برابر با ۶۰۵، ۷۴۷، ۸۵۱ و ۷۲۷ کیلوپاسکال می باشد. از مقایسه این مقادیر با مقادیر ارائه شده در بخش قبل (برای خاک غیر مسلح و همچنین مسلح شده با مخلوط خاک - خرده لاستیک به تنهایی و بدون حضور ژئوگرید)، مشخص می شود که در بسترهای غیر مسلح ($h_{rs}/D=0$) و یا در بسترهای مسلح شده با یک نسبت ضخامت خاص از مخلوط خاک - خرده لاستیک (۱، ۰/۷۵، ۰/۵، ۰/۲۵)، افزودن یک لایه ژئوگرید می تواند ظرفیت باربری را افزایش دهد. در واقع استفاده از مسلح کننده های ژئوگرید و خرده لاستیک بصورت همزمان، تاثیر بیشتری در افزایش ظرفیت باربری نسبت به استفاده هر کدام از آن ها به تنهایی داشته است. مثلاً در نسبت نشست (s/D) ۰/۶، ظرفیت باربری پی رینگ پی با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/۴ مستقر بر

که پیش تر بدان اشاره شد افزایش ضخامت لایه خاک - خرده لاستیک به ضخامت‌هایی بیش از ضخامت بهینه، سبب افزایش قابلیت فشردگی پذیری (و به تبع آن کاهش سختی بستر و افزایش نشست) می‌گردد.

۶- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر رفتار پی رینگ مستقر بر بسترهای غیر مسلح و همچنین بسترهای مسلح شده با مسلح کننده‌های خرده لاستیک و ژئوگرید بصورت مجزا و در ترکیب با یکدیگر در قالب سه سری آزمایش مورد ارزیابی قرار گرفت. در این آزمایش‌ها تاثیر پارامترهای مهمی همچون نسبت قطر داخلی به خارجی پی رینگ و همچنین ضخامت لایه مخلوط خاک - خرده لاستیک در شرایط گوناگون مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد:

نسبت بهینه قطر داخلی به خارجی پی رینگ در هر دو حالت مستقر بر بستر غیر مسلح و همچنین بستر مسلح شده با مخلوط خاک - خرده لاستیک برابر با ۰/۴ می‌باشد.

مسلح کردن بستر زیرین پی رینگ با استفاده از ژئوگرید و یا لایه مخلوط خاک- خرده لاستیک (با ضخامت بهینه) بصورت مجزا به ترتیب سبب افزایش ۱۵/۷ و ۴۱/۵ درصدی ظرفیت باربری نسبت به حالت غیر مسلح می‌گردد، ولی استفاده همزمان از مسلح کننده‌های مذکور، تاثیر بیشتری داشته و سبب افزایش ۶۲/۷ درصدی ظرفیت باربری پی رینگ، نسبت به حالت غیر مسلح می‌شود.

در هر دو حالت حضور و یا عدم حضور ژئوگرید، افزایش ضخامت لایه مخلوط خاک - خرده لاستیک تا مقداری برابر با نصف قطر خارجی پی رینگ سبب افزایش ظرفیت باربری شده و افزایش بیشتر این ضخامت (بیشتر از مقدار بهینه مذکور) سبب کاهش مجدد ظرفیت باربری بدلیل افزایش قابلیت فشردگی پذیری، می‌گردد.

با افزودن ژئوگرید خاصیت مسلح کنندگی قسمت‌های عمیق تر لایه مخلوط خاک- خرده لاستیک با ضخامت زیاد (بیشتر از ضخامت بهینه) فعال می‌شود. اما این فعال کنندگی و اثر مثبت به اندازه‌ای نیست که بتواند بر اثرات منفی ناشی از استفاده از

در نسبت ضخامت $h_{rs}/D=0/5$ به مقدار ۵۶۹ کیلوپاسکال در نسبت ضخامت $h_{rs}/D=0/75$ می‌رسد که این مقادیر یک کاهش ۲۳/۱ درصدی را نشان می‌دهد؛ این در حالی است که در بستر مسلح شده با ترکیب ژئوگرید- خرده لاستیک، میزان ظرفیت باربری از ۸۵۱ کیلوپاسکال در نسبت ضخامت $h_{rs}/D=0/5$ به مقدار ۷۲۷ کیلو پاسکال در نسبت ضخامت $h_{rs}/D=0/75$ می‌رسد که کاهش ظرفیت باربری در این حالت چیزی در ۱۴/۶ درصد می‌باشد. برای روشن تر شدن موضوع نمودار بار- نشست برای پی رینگ با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/۴ مستقر بر بسترهای مسلح شده با خرده لاستیک به تنهایی (بدون حضور ژئوگرید) و مسلح شده با ترکیب خرده لاستیک - ژئوگرید در شکل ۱۱-الف و ب رسم شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود، در تمامی نسبت‌های نشست، ظرفیت باربری پی رینگ مستقر بر بستر مسلح شده با خرده لاستیک در اثر افزایش نسبت ضخامت لایه مخلوط خاک - خرده لاستیک از ۰/۵ به ۰/۷۵ به مقادیری کمتر از مقادیر مربوط به نسبت ضخامت ۰/۲۵، کاهش می‌یابد؛ در حالی که در بستر مسلح شده با ترکیب ژئوگرید - خرده لاستیک، ظرفیت باربری در اثر افزایش نسبت ضخامت لایه مخلوط خاک - خرده لاستیک از ۰/۵ به ۰/۷۵ به مقادیری تقریباً برابر با مقادیر مربوط به نسبت ضخامت ۰/۲۵، کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از پژوهش‌های قبلی نشان می‌دهد، در اثر استفاده از مسلح کننده‌های نواری افقی و از جمله ژئوسنتتیک‌ها مکانیزم گسیختگی به گونه‌ای تغییر می‌کند که گوه گسیختگی شبه صلب زیر پی گسترده‌تری از لحاظ عرض و ارتفاع، پیدا می‌کند [۳۷-۳۵] این موضوع باعث می‌شود که محدوده گسترده تری از بستر زیرین پی درگیر شده و خاصیت مسلح کنندگی قسمت‌های عمیق تری از لایه مخلوط خاک- خرده لاستیک با ضخامت زیاد (بیشتر از ضخامت بهینه) فعال شود. اما این فعال کنندگی و اثر مثبت به اندازه‌ای نیست که بتواند بر اثرات منفی ناشی از استفاده از لایه‌های خاک - خرده لاستیک با ضخامت‌هایی بیشتر از ضخامت بهینه ($h_{rs}/D=0/5$) غلبه کند. چون همانطور که دیده شد حتی در صورت حضور لایه ژئوگرید، افزایش ضخامت لایه خاک - خرده لاستیک به ضخامت‌هایی بیش از ضخامت بهینه (۱ و $h_{rs}/D=0/75$)، سبب کاهش مجدد ظرفیت باربری نسبت به حالت بهینه ($h_{rs}/D=0/5$) می‌شود؛ چون همانطور

networks, *Neural Computing and Applications*, 21(3) (2012) 441-452.

[12] S. Bali Reddy, D. Pradeep Kumar, A. Murali Krishna, Evaluation of the optimum mixing ratio of a sand-tire chips mixture for geoenvironmental applications, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2) (2016) 1-7.

[13] D. Kyser, N. Ravichandran, Properties of chipped rubber roofing membrane and sand mixtures for civil engineering applications, *Journal of Building Engineering*, 7 (2016) 103-113.

[14] R.J. Chenari, B. Fatahi, M.A.A. Maroufi, R. Alaie, An Experimental and Numerical Investigation into the Compressibility and Settlement of Sand Mixed with TDA, *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(5) (2017) 1-20.

[15] D. Rezazadeh Eidgahee, A. Haddad, H. Naderpour, Evaluation of shear strength parameters of granulated waste rubber using artificial neural networks and group method of data handling, *Scientia Iranica*, 26(6) (2019) 3233-3244.

[16] S.N. Moghaddas Tafreshi, A.H. Norouzi, Bearing capacity of a square model footing on sand reinforced with shredded tire—An experimental investigation, *Construction and Building Materials*, 35 (2012) 547-556.

[17] S.N. Moghaddas Tafreshi, N. Joz Darabi, G. Tavakoli Mehrjardi, A. Dawson, Experimental and numerical investigation of footing behaviour on multi-layered rubber-reinforced soil, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, (2016) 1-24.

[18] R.K. Mittal, G. Gill, Pressure settlement behaviour of strip footing resting on tire-chip reinforced sand, *International Journal of Geotechnical Engineering*, (2017) 1-7.

[19] S.M. Anvari, I. Shooshpasha, Influence of size of granulated rubber on bearing capacity of fine-grained sand, *Arabian Journal of Geosciences*, 9(18) (2016) 707.

[20] G.h. Tavakoli Mehrjardi, S.N. Moghaddas Tafreshi, A.R. Dawson, Combined use of geocell reinforcement and rubber-soil mixtures to improve performance of buried pipes, *Geotextiles and Geomembranes*, 34 (2012) 116-130.

[21] S. Moghaddas Tafreshi, O. Khalaj, A. Dawson, Pilot-scale

لایه های خاک - خرده لاستیک با ضخامت هایی بیشتر از ضخامت بهینه ($h_{rs}/D=0/5$) که دارای قابلیت فشردگی پذیری بالا می باشند، غلبه کند.

مراجع

[1] M.L. Ohri, D.G.M. Purhit, M.L. Dubey, Behavior of ring footings on dune sand overlaying dense sand, in: *International Conference of Civil Engineers*, Tehran, Iran, (1997).

[2] J.H. Boushehrian, N. Hataf, Experimental and numerical investigation of the bearing capacity of model circular and ring footings on reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 21(4) (2003) 241-256.

[3] M. El Sawwaf, A. Nazir, Behavior of eccentrically loaded small-scale ring footings resting on reinforced layered soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(3) (2012) 376-384.

[4] V. Sharma, A. Kumar, Influence of relative density of soil on performance of fiber-reinforced soil foundations, *Geotextiles and Geomembranes*, 45(5) (2017) 499-507.

[5] J. Kumar, P. Ghosh, Bearing capacity factor N_{γ} for ring footings using the method of characteristics, *Canadian geotechnical journal*, 42(5) (2005) 1474-1484.

[6] L. Zhao, J.H. Wang, Vertical bearing capacity for ring footings, *Computers and Geotechnics*, 35(2) (2008) 304-292.

[7] A. Keshavarz, J. Kumar, Bearing capacity computation for a ring foundation using the stress characteristics method, *Computer and Geotechnics*, 89 (2017) 33-42.

[8] M. Laman, A. Yildiz, Numerical studies of ring foundations on geogrid-reinforced sand, *Geosynthetics International*, 14(2) (2007) 52-64.

[9] USTMA: U.S. Tire Manufacturers Association, in, *U.S. Scrape Tire Management Summary 2018*.

[10] P. Gotteland, S. Lambert, L. Balachowski, Strength characteristics of tyre chips-sand mixtures, *Studia geotechnica et mechanica*, 27(1-2) (2005) 55-66.

[11] A. Edinçliler, A.F. Cabalar, A. Cagatay, A. Cevik, Triaxial compression behavior of sand and tire wastes using neural

- for density and unit weight of soil in place by the sand-cone method, in, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2015.
- [30] S.K. Dash, S. Sireesh, T.G. Sitharam, Model studies on circular footing supported on geocell reinforced sand underlain by soft clay, *Geotextiles and Geomembranes*, 21(4) (2003) 197-219.
- [31] C.R. Patra, B.M. Das, C. Atalar, Bearing capacity of embedded strip foundation on geogrid-reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 23(5) (2005) 454-462.
- [32] T.G. Sitharam, S. Saride, S.K. Dash, Performance of surface footing on geocell-reinforced soft clay beds, *Geotechnical and Geological Engineering*, 25(5) (2007) 509-524.
- [33] S.N. Moghaddas Tafreshi, A.R. Dawson, Comparison of bearing capacity of a strip footing on sand with geocell and with planar forms of geotextile reinforcement, *Geotextiles and Geomembrane*, 28(1) (2010a) 72-84.
- [34] G. Ranjan, S. Saran, A.K. Gupta, Behaviour of ring footings on sand under vertical and horizontal loads, in: 9th Asian Geotechnical Conference, Bangkok, Thailand, (1987).
- [35] C.C. Huang, F. Tatsuoka, Prediction of bearing capacity in level sandy ground reinforced with strip reinforcement, in: Proc. Int. Geotech. Symp. Theory and Practice of Earth Reinforcement, Balkema, Fukuoka, Kyushu, Japan, (1988), 191-196.
- [36] C.C. Huang, F. Tatsuoka, Bearing capacity of reinforced horizontal sandy ground, *Geotextiles and Geomembranes*, 9(1) (1990) 51-82.
- [37] C.C. Huang, F.Y. Menq, Deep-footing and wide-slab effects in reinforced sandy ground, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(1) (1997) 30-36.
- load tests of a combined multilayered geocell and rubber-reinforced foundation, *Geosynthetics International*, 20(3) (2013) 143-161.
- [22] ASTM D2487-11, Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System), in, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2011.
- [23] C.W. Hsieh, H. Mao, A bench-scale performance test for evaluation the geosynthetic reinforcement effects on granular base courses, *Geosynthetics Research and Development in Progress*, (2005) 1-11.
- [24] S.N. Moghaddas Tafreshi, A.H. Norouzi, Application of waste rubber to reduce the settlement of road embankment, *Geomechanics and Engineering*, 9(2) (2015) 219-241.
- [25] N. Joz Darabi, S.N. Moghaddas Tafreshi, Investigation into footing behavior of layered granulated rubber-soil mixture: Experimental study on small and large scale models, *Sharif journal civil engineering*, 32.2(2.2) (2016) 79-88, In Persian.
- [26] S. Sireesh, T.G. Sitharam, S.K. Dash, Bearing capacity of circular footing on geocell-sand mattress overlying clay bed with void, *Geotextiles and Geomembranes*, 27(2) (2009) 89-98.
- [27] S.N. Moghaddas Tafreshi, G.h. Tavakoli Mehrjardi, M. Ahmadi, Experimental and numerical investigation on circular footing subjected to incremental cyclic loads, *International Journal of Civil Engineering*, 6(4) (2011) 265-274.
- [28] G.H. Tavakoli Mehrjardi, H. Jamshidi, Bearing capacity and settlement of ring footing, *Technical and Soil Mechanics Lab Co*, (2010), Book In Persian.
- [29] ASTM D1556M-15/D1556M-15 Standard test method

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M.H. Keyghobadi, A. Asakereh, B. Kalantari, M. Dehghani, Static behavior of ring footing based on geogrid-rubber reinforced sand bed, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(6) (2020) 1521-1538.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15429.5917](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15429.5917)



