[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.4.9 ]
[ DOI: 10.52547/jeg.15.1.125 ]



# بررسی تجربی رفتار پی رینگی مستقر بر بستر ماسه‌ای مسلح شده با خرده لاستیک

محمدحسین کیقبادی، عادل عساکره*، بهزاد کلانتری، مسعود دهقانی؛
دانشگاه هرمزگان، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، گروه عمران

تاریخ: دریافت ۹۷/۰۹/۲۲ پذیرش ۹۸/۰۴/۱۰

## چکیده

پی‌های رینگی به‌دلیل کاربرد گسترده آن‌ها در صنایع مختلف از جمله نفت و گاز، اهمیت و حساسیت زیادی دارند، بنابراین یافتن راه‌هایی برای بهبود رفتار این‌گونه از پی‌ها می‌تواند بسیار ارزشمند باشد. یکی از این راه‌ها که بسیار ارزان قیمت است و هم‌چنین کمک شایانی به حفظ محیط‌زیست می‌کند، استفاده از خرده لاستیک حاصل از مواد دورریزی مانند لاستیک‌های مستعمل در امر تسلیح خاک است. در پژوهش حاضر به بررسی رفتار پی‌های رینگی با قطر خارجی ثابت ۳۰۰ میلی‌متر و قطر داخلی متغییر (۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ میلی‌متر با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/۳، ۰/٤ و ۰/۵) که مستقر بر بسترهای ماسه‌ای غیرمسلح و هم‌چنین مسلح شده با خرده لاستیک دانه‌ای است، می‌پردازیم. نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد در هر دو بستر غیرمسلح و هم‌چنین مسلح شده با خرده لاستیک دانه‌ای، پی رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/٤ بیش‌ترین ظرفیت باربری و کم‌ترین نشست را دارد. هم‌چنین افزودن ضخامت لایه مخلوط خاک- خرده لاستیک تا ضخامتی بهینه که برابر با نصف قطر خارجی پی رینگی است، می‌تواند ظرفیت باربری را تا ٤۱/۵٪ نسبت به حالت غیرمسلح افزایش دهد و افزایش بیش‌تر این ضخامت باعث کاهش مجدد ظرفیت باربری پی رینگی می‌شود. در ضمن افزودن یک لایه مخلوط خاک- خرده لاستیک می‌تواند تنش‌های قائم انتشار یافته در بستر زیرین پی را تا ۲٤/٦٪ نسبت به حالت غیرمسلح کاهش دهد.

**واژه‌های کلیدی:** پی رینگی، ماسه، خرده لاستیک، ظرفیت باربری، تنش قائم.

*نویسنده مسئول asakereh@hormozgan.ac.ir

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.4.9 ]

[ DOI: 10.52547/jeg.15.1.125 ]

## مقدمه

پی‌های رینگی کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف و حساس دارند. به‌عنوان مثال از این گونه پی‌ها می‌توان به‌عنوان پی‌سازه‌های مهم و پرکاربرد از قبیل آنتن‌های تلویزیونی، دودکش‌ها، راکتورهای اتمی، برج‌های ارتباطی و هم‌چنین مخازن ذخیره سازی نفت و گاز و سیلوهای ذخیره‌سازی مواد غذایی بهره برد. پس با توجه به اهمیت کاربرد این‌گونه از پی‌ها یافتن راه و یا راه‌هایی برای بهبود عملکرد آن می‌تواند بسیار مفید باشد.

با توجه به پژوهش‌های قبلی یکی از عوامل مؤثر در بهبود عملکرد این‌گونه از پی‌ها نسبت قطر داخلی (d) به خارجی (D) پی رینگی است. لازم به ذکر است با بهینه‌سازی این پارامتر روی بسترهای مختلف (مسلح و غیرمسلح) ظرفیت باربری این‌گونه از پی‌ها نسبت به پی دایروی با قطر معادل بسیار افزایش یافته و هم‌چنین نشست‌ها نیز کاهش می‌یابد. مثلاً نتایج یک تحقیق در سال ۲۰۱۷ نشان می‌دهد در هر دو خاک غیرمسلح و هم‌چنین مسلح شده با فیبر، ظرفیت باربری پی رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی بهینه، بیش‌تر از پی دایروی با قطر معادل (معادل با قطر خارجی پی رینگی) است، به‌طوری که مثلاً در خاک غیرمسلح ظرفیت باربری نهایی از ۵۵۵ کیلوپاسکال برای پی دایروی به ٦۵۵ کیلوپاسکال برای پی رینگی با قطر خارجی معادل افزایش می‌یابد [۱]. هم‌چنین نتایج دیگر تحقیقات نیز نشان می‌دهد که می‌توان نسبت قطر داخلی به خارجی بهینه پی رینگی را با انجام آزمایش‌های مختلف به‌دست آورد که بعضاً این نسبت برای شرایط مختلف از جمله نوع خاک و نوع تسلیح آن، متغییر است [۱]-[٦]. راهی دیگر برای بهبود عملکرد پی‌های رینگی، افزایش زاویهٔ اصطکاک بین پی و بستر زیرین و یا افزایش زبری کف پی است [۷]-[۹]. هم‌چنین متراکم کردن لایه‌های زیرین پی رینگی نیز می‌تواند در افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست این‌گونه از پی‌ها بسیار مؤثر باشد، تا جایی‌که با افزایش دانسیته نسبی لایه‌های زیرین پی رینگی می‌توان نشست آن را تا ۷۳/٦٪ کاهش داد [۱]، [٦]. امروزه و با پیشرفت تکنولوژی راهکارهای جدیدی برای بهبود عملکرد بستر زیرین پی‌ها پیدا شده است. یکی از این راه‌ها استفاده از انواع مسلح کننده‌ها مانند ژئوسنتتیک‌ها، الیاف‌ها، فیبرها و بعضاً مواد دور ریز، در بستر زیرین پی است. بدیهی است استفاده از مواد دورریز و ارزان می‌تواند نسبت به دیگر مسلح‌کننده‌ها ارجحیت خاصی از لحاظ اقتصادی داشته و هم‌چنین کمک شایانی در

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.4.9 ]

[ DOI: 10.52547/jeg.15.1.125 ]

حفظ و نگه‌داری محیط‌زیست باشد. یکی از این مواد دورریز که در سال‌های اخیر پژوهش‌هایی روی آن برای استفاده در تسلیح خاک انجام شده است، خرده لاستیک است. طبق آمار ارائه شده به‌وسیلهٔ ارگان‌های بین‌المللی سالانه حجم زیادی از تایرهای مستعمل در اقصی نقاط جهان تولید می‌شود. به‌طور مثال طبق گزارش انجمن تولید کنندگان تایر ایالات متحدهٔ آمریکا، فقط در سال ۲۰۱۷ تعداد ۲۵۵/٦ میلیون تایر ضایعاتی در آمریکا تولید شده است [۱۰]. وجود این حجم عظیم از تایر می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری به محیط‌زیست وارد کند. بنابراین استفاده بهینه از آن می‌تواند کمک شایانی به حفظ و حراست از محیط‌زیست باشد. با استفاده از تکنیک‌های مختلف می‌توان تایرهای مستعمل را به خرده لاستیک در ابعاد و شکل‌های مختلف (دانه‌ای، نواری و پودری) درآورد. طبق نتایج تحقیقات مختلف افزودن خرده لاستیک به خاک می‌تواند سبب تسلیح آن و بهبود پارامترهای مربوط به مقاومت برشی خاک شود. مثلاً در تحقیقی که در سال ۲۰۰۵ با استفاده از آزمایش سه محوری روی مخلوط خاک- خرده لاستیک انجام شد، معلوم شد پارامترهای مقاومت برشی خاک از قبیل زاویهٔ اصطکاک داخلی و چسبندگی با افزودن خرده لاستیک افزایش می‌یابد [۱۱]. هم‌چنین طبق تحقیقات انجام شده پارامترهای مختلفی از قبیل وزن واحد حجم مخلوط خاک- خرده لاستیک، نسبت ابعاد دانه‌های خرده لاستیک، درصد خرده لاستیک و همچنین نوع آن بر میزان بهبود رفتار خاک تأثیر دارند [۱۱]-[۱۷]. با توجه به مطالب ذکر شده درباره تأثیر خرده‌لاستیک بر افزایش پارامترهای مقاومتی خاک، انتظار می‌رود افزودن آن به بستر زیرین پی‌ها باعث افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست و در کل سبب بهبود رفتار پی شود. بررسی‌های قبلی نیز همین موضوع را نشان می‌دهد، به‌طوری‌که در مورد پی‌های مختلف (نواری، مربعی و دایروی)، افزودن انواع مختلف خرده لاستیک به بستر زیرین پی، سبب افزایش ۲۷ تا ۲۰٦ درصدی ظرفیت باربری نسبت به حالت غیرمسلح در صورت استفاده از شرایط بهینه تسلیح شده است. با توجه به نمودارهای بار- نشست ارائه شده به‌وسیلهٔ این محققان می‌توان گفت، در یک بار مشخص، نشست پی نیز کاهش می‌یابد. [۱۸]-[۲۰]. لازم به ذکر است که شرایط بهینه تسلیح تابع پارامترهایی مانند مقدار خرده لاستیک، نوع خرده لاستیک و هم‌چنین ضخامت لایه تسلیح شده با خرده لاستیک است و در صورتی که از

مقادیر بهینه تجاوز شود، می‌تواند در شرایطی حتی سبب کاهش ظرفیت باربری و افزایش نشست نسبت به حالت غیرمسلح نیز شود [۱۸]–[۲۰].

در پژوهش حاضر با توجه به مطالب مذکور و هم‌چنین با توجه به اهمیت پی رینگی، به بررسی رفتار این‌گونه از پی‌ها در برابر بار استاتیکی و چگونگی بهبود این رفتار در صورت تسلیح بستر زیرین پی با استفاده از خرده لاستیک پرداخته شده است. در این راستا ابتدا یک سری آزمایش‌ها بر بستر غیرمسلح با استفاده از پی‌های رینگی با نسبت‌های مختلف قطر داخلی به خارجی انجام شده است و پس از آن ان آزمایش‌هایی بر بستر مسلح شده با خرده لاستیک انجام شده است تا تأثیر استفاده از این مسلح‌کننده بر رفتار پی در قالب پارامترهایی مانند ظرفیت باربری، میزان نشست و هم‌چنین میزان تنش عمودی انتشار یافته در اعماق مختلف بستر زیرین پی روشن شود. لازم به ذکر است تأثیر ضخامت لایهٔ مسلح شده با خرده لاستیک که یکی از پارامترهای بسیار مهم و تأثیرگذار بر رفتار پی است، برای انواع مختلف پی‌های رینگی ارزیابی شده است.

## مشخصات مصالح مصرفی

برای انجام آزمایش‌ها از نوعی خاک ماسه‌ای برای پر کردن ترانشه آزمایش که به‌طول و عرض ۲۰۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۹۹۰ میلی‌متر در بستر طبیعی زمین حفر شده بود، استفاده شد. لازم به ذکر است که نوع این خاک بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد (ASTM D 2487-11) [۲۱] از نوع ماسه خوب دانه‌بندی شدی است که مشخصات و هم‌چنین منحنی دانه‌بندی آن به‌ترتیب در جدول ۱ و شکل ۱ نشان داده شده است.

خرده لاستیک استفاده شده، از نوع خرده لاستیک دانه‌ای (و عاری از هرگونه سیم و نخ) است که کار کردن با آن راحت است و به آسانی با استفاده از خلاطه می‌توان آن را با خاک مخلوط کرد. نتایج تحقیقات قبلی (با استفاده از آزمایش‌های بارگذاری صفحه به‌وسیلهٔ محققان قبلی) نیز نشان می‌دهد که استفاده از این خرده لاستیک می‌تواند تأثیر به‌سزایی در بهبود عملکرد بستر زیرین پی‌ها (دایروی) داشته باشد [۱۹]، [۲۲]، [۲۳]. اندازه دانه‌های خرده لاستیک استفاده شده از ۲ تا ۲۰ میلی‌متر است و هم‌چنین قطر متوسط دانه‌های آن ۱٤ میلی‌متر است. چگالی دانه‌های (Gs) خرده لاستیک نیز ۱/۱۵ است. نتایج یک تحقیق در سال

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.4.9 ]
[ DOI: 10.52547/jeg.15.1.125 ]

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.4.9 ]

[ DOI: 10.52547/jeg.15.1.125 ]

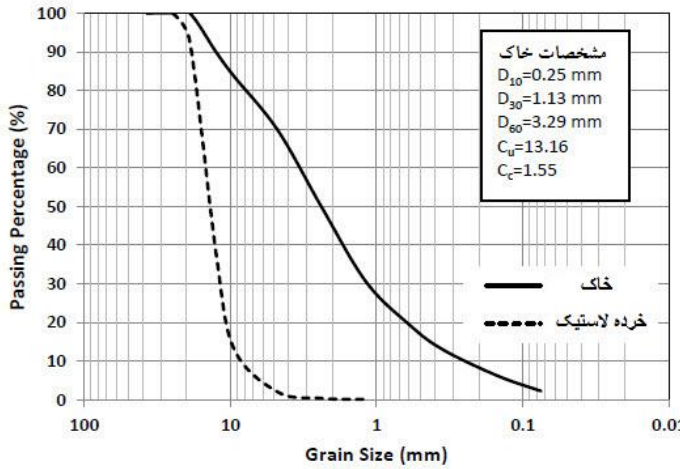
۲۰۰۵ (روی پی‌هایی با اندازه‌های مختلف و مسقر بر بسترهایی از ریز دانه تا درشت‌دانه) نشان می‌دهد در صورتی که قطر صفحه بارگذاری بزرگ‌تر از ۱۵ برابر قطر متوسط ذرات ($D_{50}$) بستر زیرین باشد، دیگر قطر صفحه بارگذاری تأثیر چندان مهمی بر نشست‌های سطحی ندارد و نتایج تکرارپذیری خوبی دارند [۲٤]. هم‌چنین نتایج دیگر تحقیقات نیز نشان می‌دهد با رعایت کردن معیار مذکور نتایج تکرارپذیری خوبی داشته و قطر صفحه بارگذاری روی نتایج تأثیر چندانی ندارد [۲۲]، [۲۵]، [۲٦]، [۲۷]. در تحقیق حاضر قطر خارجی تمامی پی‌های رینگی ۳۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است که بزرگ‌تر از ۱۵ برابر قطر متوسط ذرات خاک و خرده لاستیک است و با توجه به مطالب مذکور، بعد صفحه بارگذاری تأثیر چندانی بر نتایج ندارد. هم‌چنین تکرارپذیری آزمایش‌ها نیز این موضوع را اثبات می‌کند. منحنی دانه‌بندی و شکل خرده لاستیک استفاده شده نیز به‌ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

**جدول ۱. مشخصات خاک**

| پارامتر | مقدار |
|---|---|
| اندازهٔ مؤثر دانه‌ها ($D_{10}$) | ۰/۲۵ mm |
| اندازهٔ متوسط دانه‌ها ($D_{50}$) | ۲/۳۵ mm |
| ضریب یکنواختی ($C_u$) | ۱۳/۱٦ |
| ضریب دانه بندی ($C_c$) | ۱/۵۵ |
| نسبت تخلخل حداکثر ($e_{max}$) | ۰/۷٤ |
| نسبت تخلخل حداقل ($e_{min}$) | ۰/۳ |
| درصد رطوبت ($\omega$) | ۵/٤٪ |
| زاویهٔ اصطکاک ($\varphi$) | ٤۱/۷° |

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.4.9 ]
[ DOI: 10.52547/jeg.15.1.125 ]






**شکل ۱. منحنی دانه‌بندی ماسه و خرده لاستیک**

## نصب و راه اندازی آزمایش‌ها

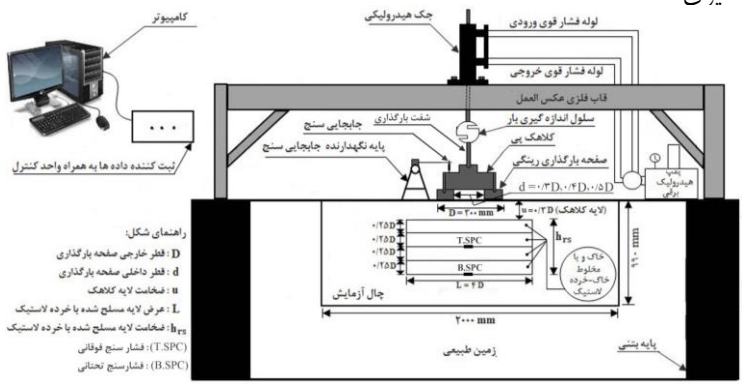
چنان‌که در بخش قبل بدان اشاره شد، ترانشه‌ای به طول و عرض ۲۰۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۹۹۰ میلی‌متر در بستر طبیعی زمین برای انجام آزمایش‌ها حفر شد. لازم به ذکر است ترانشه مذکور فضای کافی را برای اجرای عملیات مختلف از قبیل اجرای لایه‌های مختلف خاک غیرمسلح و هم‌چنین لایه‌های خاک مسلح شده با خرده لاستیک را به کاربر می‌دهد و در ضمن

**شکل ۲. خرده لاستیک دانه‌ای استفاده شده در آزمایش‌ها**

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.4.9 ]
[ DOI: 10.52547/jeg.15.1.125 ]



امکان تخلیه و پر کردن ترانشه در زمان معقول مهیا است. همچنین با کارگذاشتن فشار سنج‌ها در دیواره‌ها و هم‌چنین کف ترانشه آزمایش، مشخص شد که ابعاد ترانشه آزمایش به‌قدر کافی بزرگ بوده است و تأثیر چندانی بر نتایج آزمایش‌ها ندارد، زیرا فشاری به‌وسیلهٔ فشارسنج‌ها در نقاط مذکور احساس نشد. شمای کلی آزمایش‌ها و دستگاه مربوط در شکل ۳ نشان داده شده است. برای کوبیدن لایه‌های مختلف خاک غیرمسلح و هم‌چنین لایهٔ ترکیبی خاک-خرده لاستیک از یک کمپکتور بنزینی با ابعاد صفحه ٤٠X٤٠ سانتی‌متر با عمق تأثیر بین ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر استفاده شده که این دستگاه نیز در شکل ٤ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳ و البته در تمامی آزمایش‌ها یک لایه کلاهک (خاک غیرمسلح) با ضخامت ۹۰ میلی‌متر در بالای لایه‌های دیگر اجرا شد. نتایج تحقیقات قبلی نشان می‌دهد در صورت اجرای این لایه در بالای لایه‌های مسلح، تأثیر لایه‌های مسلح بیش‌تر می‌شود [۱۸]، [۲۲]. هم‌چنین دیگر لایه‌ها اعم از مسلح و غیرمسلح با ضخامت ۷۵ میلی‌متر اجرا شدند. با توجه به عمق تأثیر کمپکتور اولا این کمپکتور برای کوبیدن لایه‌هایی با ضخامت مذکور مناسب بوده است و ثانیاً کوبیدن هر لایه تأثیر چندانی بر تراکم لایه‌های زیرین خود نداشته است. در این‌جا ذکر این نکته ضروری است که لایه‌های خاک غیرمسلح و هم‌چنین لایه‌های خاک-خرده لاستیک، هر کدام به‌ترتیب با دو و سه بار عبور کمپکتور کوبیده شده تا به حداکثر وزن مخصوص خود برسند. پس از کوبیده شدن لایه‌ها میزان متوسط وزن مخصوص آن‌ها با استفاده از انجام سه آزمایش متوالی مخروط ماسه (طبق استاندارد ASTM-D1556/D1556M-15 [۲۸]) اندازه‌گیری شد




**شکل ۳. شمای کلی آزمایش‌ها و دستگاه مربوط**

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.4.9 ]

[ DOI: 10.52547/jeg.15.1.125 ]

**شکل ٤. تصویری از کوبیدن بستر با کمپکتور بنزینی**

که نتایج حاصل از آن نشان داد که تعداد عبور بیش‌تر کمپکتور نسبت به مقادیر ذکر شده تأثیر چندانی بر تراکم لایه‌ها نداشته است. وزن مخصوص متوسط لایه‌ها پس از اجرای عملیات تراکم در جدول ۲ نشان داده شده است. چنان‌که انتظار می‌رود وزن مخصوص لایه خاک– خرده لاستیک از وزن مخصوص لایه خاکی غیرمسلح کم‌تر است که می‌تواند مربوط به سبک بودن دانه‌های لاستیک باشد. لازم به ذکر است درصد وزنی خرده لاستیک در مخلوط خاک– خرده لاستیک ثابت و برابر با ۸٪ وزنی کل مخلوط در نظر گرفته شده است. این مقدار با توجه به مقدار بهینه به‌دست آمده به‌وسیلهٔ پژوهش‌گران قبلی در آزمایش بارگذاری صفحه است [۱۹]، [۲۲].

چنان‌که از شکل ۳ برمی‌آید، سیستم بارگذاری متشکل از قسمت‌های مختلفی از قبیل قاب بارگذاری برای تأمین نیروی عکس‌العمل، جک هیدرولیکی به ظرفیت ۱۰ تن، سلول اندازه گیری بار با ظرفیت kN ۱۵۰ و دقت ۰/۰۱٪، هم‌چنین سیستم انتقال بار (شامل شفت بارگذاری قرار گرفته در زیر سلول اندازه‌گیری بار، کلاهک پی قرار گرفته در زیر شفت بارگذاری) و صفحه بارگذاری فولادی رینگی صلب با ضخامت ۲۵/٤ میلی‌متر و با قطر خارجی ثابت (D) ۳۰۰ میلی‌متر و قطر داخلی (d) متغییر ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ میلی‌متر، است. ورقی سمباده‌ای نیز در زیر صفحه بارگذاری برای تأمین نیروی اصطکاک لازم، چسبانده شد. لازم به ذکر است قسمت تحتانی شفت بارگذاری به‌صورت کروی شکل است که در قسمت فوقانی کلاهک پی که کاسه‌ای شکل است قرار می‌گیرد تا اجازه حرکت آزادنه صفحه

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.4.9 ]
[ DOI: 10.52547/jeg.15.1.125 ]



بارگذاری و نشست‌های نامتقارن احتمالی را بدهد. قسمت تحتانی کلاهک پی نیز لوله‌ای شکل است و در داخل شیار تراشیده شده روی صفحات بارگذاری قرار می‌گیرد.

**جدول ۲. وزن مخصوص لایه‌های مختلف پس از تراکم**

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

***درجه تراکم تقریبی خاک غیرمسلح ۹۰٪ است**

برای اندازه‌گیری نشست صفحات بارگذاری از دو جابه‌جایی سنج (LVDT) با دقت ۰/۰۱٪ در محدوده ۱۰۰ میلی‌متر در دو طرف پی که به پایه نگه‌دارنده مستقل وصل شده‌اند، استفاده شده است. هم‌چنین از دو فشار سنج (SPC) با قطر ۵۰ میلی‌متر و دقت ۰/۰۱٪ برای اندازه‌گیری تنش عمودی انتشار یافته در عمق بستر استفاده شده است. لازم به ذکر در تمامی آزمایش‌ها، فشار سنج فوقانی (T.SPC) در عمق ۲٤۰ میلی‌متری و فشار سنج تحتانی (B.SPC) در عمق ۳۹۰ میلی‌متر از سطح خاک (یا زیر پی) و درست در امتداد مرکز صفحات بارگذاری، کار گذاشته شده‌اند. هم‌چنین برای محافظت از کابل‌های ارتباطی فشار سنج‌ها، از یک غشاء محافظ منعطف استفاده شد. لازم به ذکر است تمامی ابزارهای اندازه‌گیری پس از انجام هر سری از آزمایش‌ها مجددا کالیبره می‌شدند تا دقت خود را حفظ کنند. در شکل ۵ یک تصویر واقعی از دستگاه آزمایش نشان داده شده است. برای قرائت و ثبت همهٔ داده‌های حاصل از ابزار اندازه‌گیری، از یک ثبت کننده داده‌ها (Data logger) با سرعت ثبت یک نمونه در ثانیه استفاده شده است. هم‌چنین در این ثبت‌کننده داده‌ها، یک واحد کنترل نیز قرار داده شده است که می‌تواند مسیر و سرعت بارگذاری را به‌کمک نرم‌افزار نصب شده در رایانه متصل شده با آن، تنظیم کرده و به سلول اندازه‌گیری بار اعمال کند. بار استاتیکی با سرعت یک کیلوپاسکال بر ثانیه به‌وسیلهٔ سیستم مذکور اعمال می‌شود. هم‌چنین بار استاتیکی تا زمان گسیختگی بستر ادامه می‌یابد. البته در زمان‌هایی که گسیختگی مشهود نیست، بارگذاری تا میزان ۱۰۰۰ کیلوپاسکال و یا تا رسیدن به نسبت نشست (نسبت نشست پی به قطر خارجی پی رینگی) ۲۵٪ ادامه می‌یابد.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.4.9 ]
[ DOI: 10.52547/jeg.15.1.125 ]

**شکل ۵. تصویر واقعی از الف) بخش‌های مختلف دستگاه، ب) فشار سنج**

## برنامه انجام آزمایش‌ها

چنان‌که در جدول ۳ نشان داده شده است، دو سری آزمایش مشتمل بر ۲۷ آزمایش با استفاده از پی‌های رینگی (با نسبت قطر داخلی به خارجی متغییر) به‌ترتیب روی خاک غیرمسلح و هم‌چنین خاک مسلح شده با خرده لاستیک انجام شد تا میزان تأثیر مسلح‌کننده و هم‌چنین تأثیر نسبت قطر داخلی به قطر خارجی پی رینگی مستقر بر بستر مسلح و غیرمسلح مشخص شود. تعداد ۱۲ آزمایش از ۲۷ آزمایش مذکور، آزمایش‌های تکراری برای سنجش

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.4.9 ]
[ DOI: 10.52547/jeg.15.1.125 ]



تکرارپذیری و قابل اعتماد بودن نتایج هستند که البته نتایج آزمایش تکراری تفاوت چندانی (زیر ۸٪) با نتایج آزمایش‌های اصلی نداشته‌اند. لازم به ذکر است در آزمایش سری دوم تأثیر پارامتر مهمی مانند ضخامت لایه مسلح شده با خرده لاستیک ($h_{rs}$) ارزیابی شد تا تأثیر این پارامتر مهم بر رفتار پی رینگی مشخص شود.

**جدول ۳. برنامه انجام آزمایش‌ها**

| سری آزمایش | نوع بستر پی | نسبت قطر داخلی به خارجی پی رینگی (d/D) | نسبت ضخامت لایه مسلح شده به قطر خارجی پی رینگی ($h_{rs}$/D) | تعداد آزمایش | هدف آزمایش |
|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | غیر مسلح | ۰/۳، ۰/٤، و ۰/۵ | ۰ | ۳+۳* | برای مقایسه با بستر مسلح و یافتن مقدار بهینه نسبت قطر داخلی به خارجی پی در شرایط غیر مسلح |
| ۲ | مسلح شده با خرده لاستیک | ۰/۳، ۰/٤، و ۰/۵ | ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ | ۱۲+۹* | برای یافتن اثر تسلیح، یافتن مقدار بهینه نسبت قطر داخلی به خارجی پی در شرایط مسلح و یافتن ضخامت بهینه لایه مسلح |

* آزمایش‌های تکراری

## نتایج و بحث

### بررسی رفتار پی رینگی مستقر بر بستر غیرمسلح

چنان‌که در بخش قبل بدان اشاره شد، آزمایش‌های سری اول روی پی رینگی مستقر بر بستر غیرمسلح انجام گرفت. پارامتر متغییر در این سری از آزمایش‌ها نسبت قطر داخلی به خارجی (d/D) پی رینگی است، به‌گونه‌ای که قطر خارجی ثابت و برابر با ۳۰۰ میلی‌متر و قطر داخلی متغییر (۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ میلی‌متر با نسبت قطر داخلی به خارجی برابر با ۰/۳، ۰/٤ و ۰/۵) در نظر گرفته شده است. در شکل ٦ الف، نمودار ظرفیت باربری در برابر نسبت نشست پی (s/D) مستقر بر بستر غیرمسلح برای انواع مختلف پی رینگی رسم شده است. نتایج حاصل از این شکل نشان می‌دهد که در نشستی مشخص، پی رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/٤ بیش‌ترین ظرفیت باربری را دارد. این بهبود رفتار پی می‌تواند مربوط به پدیدهٔ قوس زدگی در داخل حفره پی رینگی در صورت استفاده از مقدار بهینه نسبت قطر داخلی به خارجی باشد. در واقع زمانی که پی رینگی با نسبت قطر بهینه، تحت شدت معینی

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.4.9 ]

[ DOI: 10.52547/jeg.15.1.125 ]

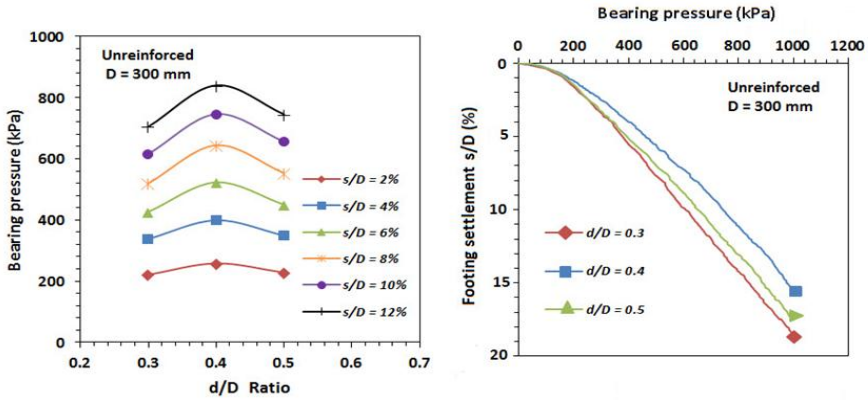
از بارگذاری قرار می‌گیرد، به‌نظر می‌رسد تراکم خاک در داخل ناحیهٔ رینگی به‌دلیل اثر تداخل دو طرف رینگ بیش‌تر می‌شود. اما با افزایش نسبت قطر داخلی به خارجی به بیش از مقدار بهینه، رینگ به‌سمت دو پی نواری مستقل (بدون اثر تداخلی) حرکت می‌کند و بنابراین ظرفیت باربری آن کاهش می‌یابد [۲]، [۳]، [۲۹].

چنان‌که شکل ٦ الف نشان می‌دهد در تمامی پی‌های رینگی (با نسبت قطر داخلی به خارجی متفاوت) هیچ نقطه مشخصی که حاکی از پدیده گسیختگی خاک حتی در بارگذاری‌های بالا باشد، وجود ندارد. فقط در نسبت‌های نشست حدودا ۱- ٤٪ یک تغییر شیب در نمودار بار- نشست مشاهده می‌شود که می‌تواند مربوط به شکست‌های موضعی در نواحی اطراف پی باشد که منجر به کاهش ظرفیت باربری آن و هم‌چنین کاهش شیب منحنی بار- نشست می‌شود. بعد از این مرحله شیب نمودار ثابت است که نشان می‌دهد این حالت از آسیب دیدگی به‌تدریج پیشرفت می‌کند [۲۲]]. در شکل ۷ عکس‌هایی از تغییر شکل خاک بعد از بارگذاری نشان داده شده است.

برای مقایسه بهتر پی‌های رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی متغییر، نمودار تغییرات ظرفیت باربری در برابر تغییرات نسبت قطر داخلی به خارجی در شکل ٦ ب و در نسبت‌های مختلف نشست (s/D) از ۲ تا ۱۲٪ رسم شده است. در این‌جا باید متذکر شد که در بسیاری از پژوهش‌های قبلی عملکرد پی‌ها فقط با توجه ظرفیت باربری در نقطه گسیختگی و یا در نسبت‌های نشست بسیار زیاد (حتی ٤۰- ۵۰٪) و بدون توجه به بازه کاربردی از نشست پی، ارزیابی شده است [۳۰]-[۳۲]. اما در برخی از تحقیقات اخیر [۱۹]، [۲۲] و [۳۳]، همچنین در پژوهش حاضر، عملکرد پی در نسبت‌های نشست کاربردی (یعنی کم‌تر از ۱۲٪) ارزیابی شده است، تا مقایسه‌ها در محدودهٔ واقعی و کاربردی از نشست پی انجام شود. چنان‌که در شکل ٦ ب دیده می‌شود در تمامی نسبت‌های نشست، ظرفیت باربری با افزایش نسبت قطر داخلی به خارجی پی تا نسبت d/D=۰/٤ افزایش و سپس کاهش می‌یابد. به‌طور مثال در نسبت نشست s/D=٦٪ ظرفیت باربری پی‌های رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/۳، ۰/٤ و ۰/۵ به‌ترتیب برابر ٤۲۷، ۵۲۳ و ٤۵۰ کیلوپاسکال است که نشان می‌دهد پی با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/٤ نسبت به پی‌هایی با قطر داخلی به خارجی ۰/۳ و ۰/۵ به‌ترتیب ۲۲/۵٪ و ۱٦/۲٪ افزایش ظرفیت باربری داشته است.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.4.9 ]
[ DOI: 10.52547/jeg.15.1.125 ]






ب الف

**شکل ٦. نمودار تغییرات ظرفیت باربری پی رینگی مستقر بر بستر غیرمسلح در برابر الف) نسبت نشست (s/D)، ب) نسبت قطر داخلی به خارجی پی رینگی (d/D)**

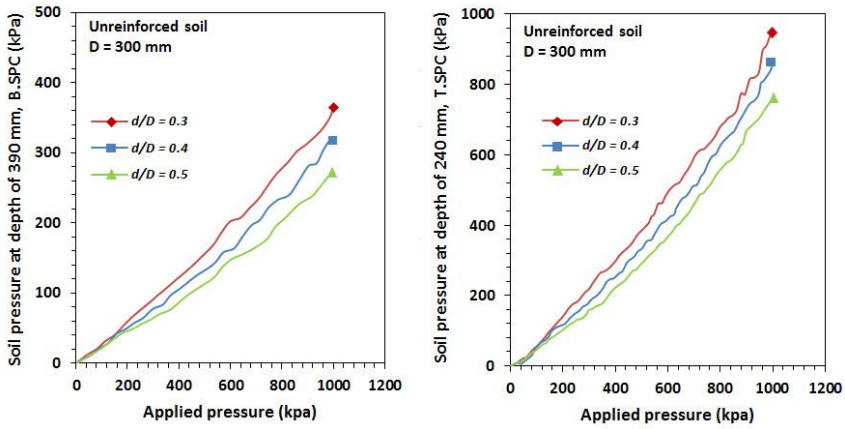
برای پی‌های رینگی با نسبت‌های مختلف از قطر داخلی به خارجی، نمودار تغییرات تنش اندازه‌گیری شده به‌وسیلهٔ فشارسنج‌های فوقانی (T.SPC) و تحتانی (B.SPC) که به‌ترتیب در اعماق ۲٤۰ و ۳۹۰ میلی‌متری از مرکز پی تعبیه شده بودند، در برابر فشار اعمالی بر صفحه بارگذاری به‌ترتیب در شکل ۸ الف و ب نشان داده شده‌اند. چنان‌که از این شکل مشهود است، در هر دو عمق اندازه‌گیری، میزان تنش عمودی وارده با افزایش نسبت قطر داخلی به خارجی پی رینگی، کاهش می‌یابد. مثلاً در فشار اعمالی ۵۰۰ کیلوپاسکال بر سطح خاک، تنش عمودی اندازه‌گیری شده در عمق ۲٤۰ میلی‌متر برای پی‌های رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/۳، ۰/٤ و ۰/۵ به‌ترتیب برابر ۳۸۵، ۳۳۳ و ۲۹۱ کیلوپاسکال است. این روند کاهش تنش می‌تواند به‌دلیل انتقال تمرکز تنش از نقاطی نزدیک به مرکز پی به نقاطی نزدیک به لبه‌های بیرونی پی در اثر بزرگ شدن نسبت قطر داخلی به خارجی پی رینگی و درواقع تبدیل شدن از حالت رینگ با اثر تداخلی به دو پی نواری مستقل که پیش‌تر بدان اشاره شد، باشد.

## بررسی رفتار پی رینگی مستقر بر بستر مسلح شده با خرده لاستیک

در این بخش نتایج مربوط به آزمایش‌های سری دوم که روی پی رینگی مستقر بر بستر مسلح شده با خرده لاستیک انجام گرفت، ارائه می‌شود. در شکل ۹ (الف، ب و ج) نمودار

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.4.9 ]
[ DOI: 10.52547/jeg.15.1.125 ]

**شکل ۷. تغییر شکل خاک بعد از بارگذاری**



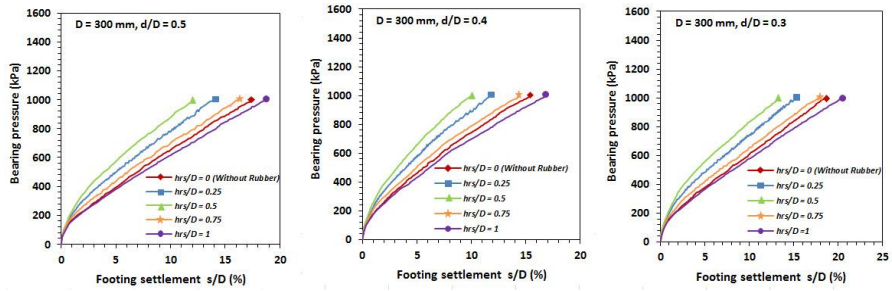

(ب) (الف)

**شکل ۸. نمودار تغییرات تنش اندازه‌گیری شده به‌وسیلهٔ فشارسنج‌های الف) فوقانی (T.SPC) در عمق ۲۴۰میلی‌متر، ب) تحتانی (B.SPC) در عمق ۳۹۰ میلی‌متر، در برابر فشار اعمالی بر پی‌های رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی مختلف (۰/۳، ۰/٤، ۰/۵) و مستقر بر بستر غیرمسلح**

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.4.9 ]
[ DOI: 10.52547/jeg.15.1.125 ]



تغییرات ظرفیت باربری در برابر نسبت نشست پی (s/D) مستقر بر بستر مسلح شده با لایه خاک-خرده لاستیک (با ضخامت‌های ($h_{rs}$) مختلف) برای انواع مختلف پی رینگی (با نسبت قطر داخلی به خارجی مختلف) رسم شده است. نتایج حاصل از این شکل نشان می‌دهد که در یک نشست مشخص از پی رینگی بدون توجه به نسبت قطر داخلی به خارجی آن، افزایش ضخامت لایه خاک-خرده لاستیک تا مقداری برابر با نصف قطر خارجی پی رینگی، سبب افزایش ظرفیت باربری آن پی می‌شود و افزایش بیش‌تر این پارامتر نتیجه معکوس داشته و حتی در مواردی ($h_{rs}/D$=۱) می‌تواند منجر به کم‌تر شدن ظرفیت باربری نسبت به حالت غیرمسلح نیز شود.




ج ب الف

**شکل ۹. نمودار تغییرات ظرفیت باربری در برابر نسبت نشست پی (s/D) مستقر بر بستر مسلح شده با لایه خاک-خرده** لاستیک با **نسبت‌های ضخامتی مختلف (۱ و ۰/۷۵، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰ =hrs) برای انواع مختلف پی رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی الف) ۰/۳، ب) ۰/٤ و ج) ۰/۵**

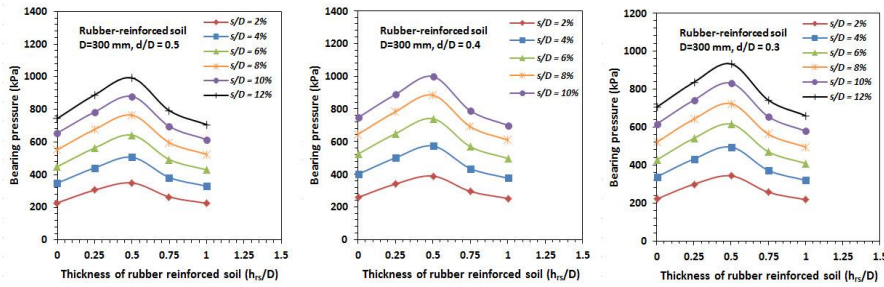
برای مقایسهٔ بهتر پی‌های رینگی مستقر بر بسترهای مسلح شده با لایه خاک-خرده لاستیک با ضخامت‌های متغییر، نمودار تغییرات ظرفیت باربری در برابر تغییرات نسبت ضخامت لایه خاک-خرده لاستیک ($h_{rs}/D$) برای انواع پی رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی متغییر و در مقادیر مختلف از نشست‌های نسبی (s/D = ٪۲-٪۱۲) در شکل ۱۰ (الف، ب و ج) رسم شده است. چنان‌که از این شکل‌ها نیز کاملاً مشهود است، در نشستی مشخص از پی رینگی بدون توجه به نسبت قطر داخلی به خارجی آن، افزایش ضخامت لایه خاک-خرده لاستیک تا مقداری برابر با نصف قطر خارجی پی رینگی سبب افزایش ظرفیت باربری آن و افزایش بیش‌تر این پارامتر سبب کاهش آن می‌شود. مثلاً در نسبت نشست s/D=٪٦ ظرفیت باربری پی رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/٤ و مستقر بر بسترهای غیرمسلح ($h_{rs}/D$=۰) و هم‌چنین بستر مسلح شده با نسبت‌های ضخامتی ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.4.9 ]
[ DOI: 10.52547/jeg.15.1.125 ]



به‌ترتیب برابر با ۵۲۳، ٦٤٨، ۷٤۰، ٥٦٩ و ٤٩٧ کیلوپاسکال است. این مقادیر نشان می‌دهد ضخامت بهینه لایه خاک-خرده لاستیک برابر با نصف قطر خارجی پی رینگی است که در این حالت ظرفیت باربری نسبت به حالت غیرمسلح چیزی در حدود ٤١/٥٪ رشد داشته است. چنان‌که قبلاً بدان اشاره شد و از شکل ۱۰ نیز مشهود است افزایش بیش‌تر از مقدار بهینهٔ ضخامت لایه خاک-خرده لاستیک، نتیجه معکوس داشته و در مواردی ($h_{rs}/D$=۱) می‌تواند حتی منجر به کم‌تر شدن ظرفیت باربری نسبت به حالت غیرمسلح شود. این موضوع می‌تواند ناشی از افزایش قابلیت فشردگی‌پذیری بستر در صورت استفاده از لایه خاک-خرده لاستیک با ضخامت زیاد (بیش‌تر از مقدار بهینه) باشد که می‌تواند اثرات تسلیح با خرده لاستیک را کاهش دهد و رفتار لایه مخلوط خاک-خرده لاستیک از یک ماده مسلح‌کننده به یک ماده با قابلیت فشردگی‌پذیری بالا تبدیل می‌شود. در این حالت سختی بستر کاهش یافته و منجر به ایجاد اثرات مخرب می‌شود [۱۸]، [۱۹]، [۲٦].

برای مقایسهٔ رفتار پی‌های رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی متغییر مستقر بر بستر مسلح شده با خرده لاستیک، نمودار تغییرات ظرفیت باربری در برابر تغییرات نسبت قطر داخلی به خارجی برای بسترهایی با ضخامت‌های تسلیح مختلف و در نسبت‌های مختلف از نشست (s/D = ٪۲-٪۱۲) در شکل ۱۱ (الف، ب، ج و د) رسم شده است.




ج ب الف

**شکل ۱۰. نمودار تغییرات ظرفیت باربری در برابر تغییرات نسبت ضخامت لایه خاک-خرده لاستیک (hrs/D) در مقادیر مختلف از نشست‌های نسبی (s/D = ٪۲-٪۱۲) برای انواع مختلف پی رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی الف) ۰/۳، ب) ۰/٤ و ج) ۰/٥**

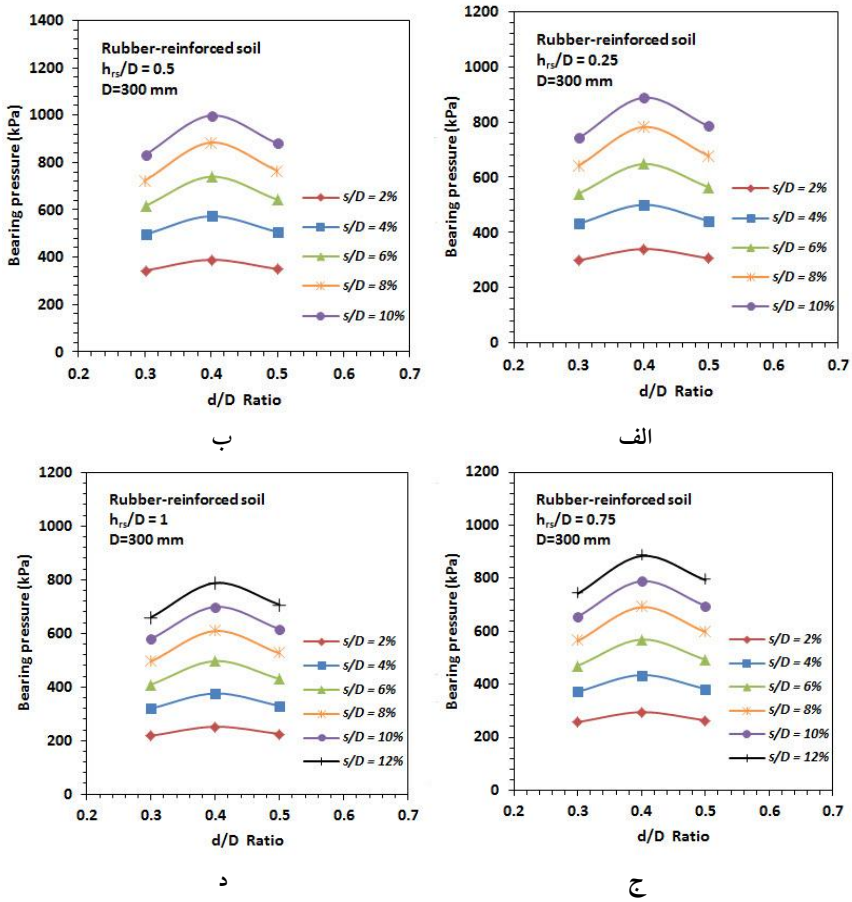
نتایج حاصل نشان می‌دهد، در تمامی حالات بسترهای مسلح شده با خرده لاستیک همانند بسترهای غیرمسلح، ظرفیت باربری با افزایش نسبت قطر داخلی به خارجی پی تا مقدار d/D=۰/٤ افزایش و سپس کاهش می‌یابد. به‌طور مثال در حالت $h_{rs}$/D=۰/٥ و در نسبت

نشست s/D=٪٦ ظرفیت باربری پی‌های رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/۳، ۰/٤ و ۰/۵ به‌ترتیب برابر ٦۱۵، ۷٤۰ و ٦٤۳ کیلوپاسکال است که نشان می‌دهد پی با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/٤ نسبت به پی‌هایی با قطر داخلی به خارجی ۰/۳ و ۰/۵ به‌ترتیب ۲۰/۳٪ و ۱۵/۱٪ افزایش ظرفیت باربری داشته است. بنابراین و با توجه به نتایج به‌دست آمده در پژوهش حاضر، در هر دو حالت بستر غیر مسلح و هم‌چنین بستر مسلح شده با لایهٔ مخلوط خاک-خرده لاستیک، نسبت بهینه قطر داخلی به خارجی پی رینگی برابر با ۰/٤ است.

در شکل ۱۲ نمودار تغییرات تنش اندازه‌گیری شده به‌وسیلهٔ فشارسنج‌های فوقانی (T.SPC) و تحتانی (B.SPC) که به‌ترتیب در اعماق ۲٤۰ و ۳۹۰ میلی‌متری از مرکز پی تعبیه شده بودند، در برابر فشار اعمالی بر صفحه بارگذاری، برای پی‌های رینگی با نسبت‌های مختلف از قطر داخلی به خارجی که مستقر بر بستر مسلح شده با لایه مخلوط خاک-خرده لاستیک است، رسم شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد، در یک تنش ثابت اعمالی بر سطح پی و صرف‌نظر از نسبت قطر داخلی به خارجی آن، میزان تنش اندازه‌گیری شده در عمق ۲٤۰ میلی‌متر، با افزایش ضخامت لایه خاک-خرده لاستیک تا مقداری برابر با نصف قطر خارجی پی رینگی، کاهش می‌یابد و افزایش بیش‌تر این ضخامت تأثیر چندانی بر کاهش تنش اندازه‌گیری شده در این عمق ندارد. این موضوع طبیعی به‌نظر می‌رسد زیرا تنش عمودی از لایه‌های بالایی به پایین اعمال می‌شود. چنان‌که از شکل ۳ دیده می‌شود لایه‌هایی از تسلیح که ضخامت آنها کم‌تر از نصف قطر خارجی پی رینگی است بالاتر از عمق ۲٤۰ میلی‌متر قرار دارند و لایه‌هایی که ضخامت آن‌ها بیش‌تر از این مقدار است، تا عمق ۳۹۰ میلی‌متر ادامه می‌یابند. چنان‌که از شکل ۱۲ (د، ه، ز) دیده می‌شود میزان تنش اندازه‌گیری شده در عمق ۳۹۰ میلی‌متر، با افزایش ضخامت لایه خاک-خرده لاستیک حتی تا مقداری برابر با قطر خارجی پی رینگی، هم‌چنان کاهش می‌یابد، زیرا لایه‌هایی با این ضخامت نیز در بالای عمق اندازه‌گیری ۳۹۰ میلی‌متر قرار دارند. البته چنان‌که از شکل ۱۲ (د، ه، ز) دیده می‌شود، زمانی‌که ضخامت لایه تسلیح بیش‌تر از نصف قطر خارجی پی می‌شود، سرعت کاهش تنش در این عمق کاهش می‌یابد و این موضوع می‌تواند به این دلیل باشد که با دور شدن از نقطه اعمال بار (یعنی صفحه بارگذاری)، میزان تأثیر لایه‌های تسلیح کاهش می‌یابد.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.4.9 ]
[ DOI: 10.52547/jeg.15.1.125 ]

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.4.9 ]
[ DOI: 10.52547/jeg.15.1.125 ]

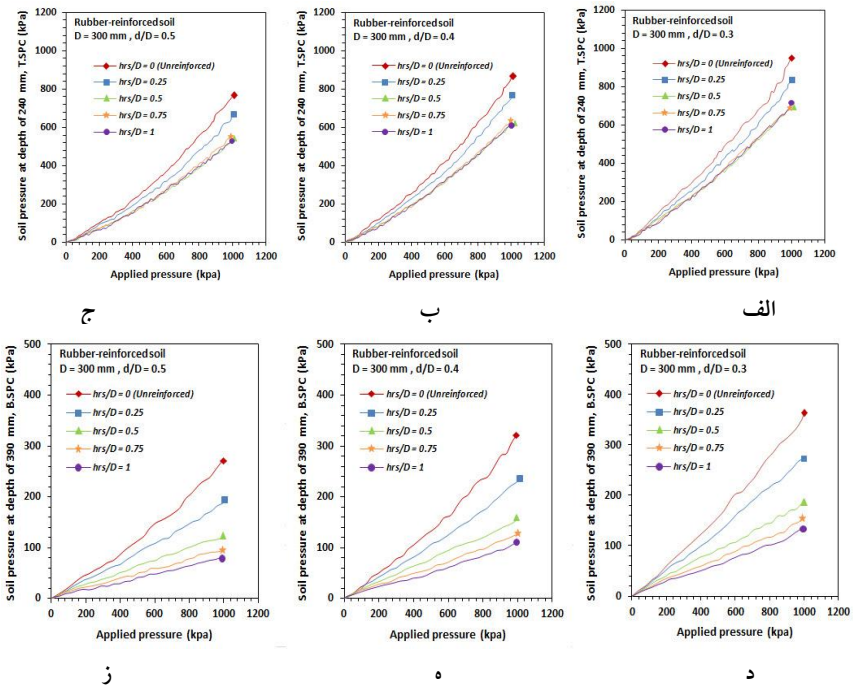



**شکل ۱۱. نمودار تغییرات ظرفیت باربری در برابر تغییرات نسبت قطر داخلی به خارجی پی رینگی در مقادیر مختلف از نشست‌های نسبی (۲٪-۱۲٪ = s/D) برای پی رینگی مستقر بر بستر مسلح شده با لایه خاک-خرده لاستیک با نسبت‌های ضخامتی الف) ۰/۲۵، ب) ۰/۵، ج) ۰/۷۵ و د) ۱**

با توجه به مطالب مذکور و هم‌چنین با توجه مجدد به شکل ۱۲ مشخص می‌شود که در تمامی حالات تسلیح، میزان تنش انتشار یافته در عمق خاک نسبت به حالت غیرمسلح کم‌تر است. مثلاً در تنش اعمالی ۵۰۰ کیلو پاسکال بر پی رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی برابر با ۰/٤، تنش عمودی اندازه‌گیری شده در عمق ۲٤۰ میل‌متر

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.4.9 ]
[ DOI: 10.52547/jeg.15.1.125 ]






**شکل ۱۲. نمودار تغییرات تنش اندازه‌گیری شده به‌وسیلهٔ فشارسنج‌های الف، ب، ج) فوقانی (T.SPC) در عمق ۲٤۰میلی‌متر د، ه، ز) تحتانی (B.SPC)در عمق ۳۹۰ میلی‌متر، در برابر فشار اعمالی بر پی‌های رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی مختلف (۰/۳، ۰/٤، ۰/۵) و مستقر بر بستر مسلح شده با لایه خاک- خرده لاستیک با ضخامت‌های متغییر**

**($h_{rs}$ = ۰ ،۰/۲۵ ،۰/۵ ،۰/۷۵ و ۱)**

برای بسترهای غیر مسلح و هم‌چنین مسلح شده با نسبت ضخامت $h_{rs}/D$=۰/۵ به‌ترتیب برابر با ۳۳۳ و ۲۵۱ کیلوپاسکال است. این بدان معنی است که در حالت مسلح میزان تنش انتشار یافته در این عمق ۲٤/٦٪ نسبت به حالت غیرمسلح کاهش یافته است. با توجه به همهٔ مطالب مذکور می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در حالت کلی افزودن یک لایه تسلیح خاک-خرده لاستیک می‌تواند سبب کاهش تنش انتشار یافته در عمق شود. در واقع لایه خاک-خرده لاستیک نسبت به لایه غیرمسلح ارتجاعی‌تر عمل کرده قابلیت جذب انرژی زیادی دارد [۲۵]، [۲٦]، [۳٤] و این موضوع می‌تواند سبب کاهش تنش در بستر شود. هم‌چنین لایه مسلح می‌تواند شبیه یک تشک بزرگ عمل کرده و تنش‌های وارده را در سطح بیش‌تری توزیع کند و این موضوع باعث می‌شود تنش‌های عمودی انتشار یافته در بستر کاهش یابد [۱۹]، [۲۳].

از مقایسهٔ شکل‌های ۱۲ برای پی‌های رینگی با نسبت‌های مختلف از قطر داخلی به خارجی مشخص می‌شود، در حالت مسلح نیز مانند حالت غیرمسلح (شکل ۸ و بخش ۵-۱)، میزان تنش عمودی اندازه‌گیری شده در یک عمق خاص، با افزایش نسبت قطر داخلی به خارجی پی رینگی، کاهش می‌یابد. مثلاً در فشار اعمالی ۵۰۰ کیلوپاسکال بر سطح خاک، تنش عمودی اندازه‌گیری شده در عمق ۲٤۰ میلی‌متری از بستر مسلح شده با نسبت ضخامتی $h_{rs}/D$=۰/۵ برای پی‌های رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/۳، ۰/٤ و ۰/۵ به‌ترتیب برابر ۲۹۳، ۲۵۱ و ۲۱۷ کیلوپاسکال است. که چنان‌که در بخش ۵-۱ بدان اشاره شد، این روند کاهش تنش می‌تواند به‌دلیل انتقال تمرکز تنش از نقاطی نزدیک به مرکز پی به نقاطی نزدیک به لبه‌های بیرونی پی و در واقع تبدیل شدن از حالت رینگ با اثر تداخلی به دو پی نواری مستقل باشد.

## نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر دو سری آزمایش روی پی‌های رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی متغییر مستقر بر بسترهای غیرمسلح و هم‌چنین مسلح شده با لایه مخلوط خاک-خرده لاستیک صورت گرفت تا تأثیر پارامترهای مختلفی مانند نسبت قطر داخلی به خارجی پی‌های رینگی و تأثیر لایه تسلیح و ضخامت آن بر رفتار پی رینگی مشخص شود. لازم به ذکر است که نتایج حاصل فقط برای نوع و درصد خاصی از خرده لاستیک، نوع خاصی از ماسه و با توجه به محدودیت‌های ابعادی مدل فیزیکی انجام شده است و برای حصول نتایج بهتر و دقیق‌تر باید این آزمایش‌ها در دیگر شرایط نیز انجام شود. لکن در تحقِق حاضر نتایج نشان می‌دهد:

- در هر دو حالت مسلح و غیرمسلح، پی رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/٤ بیش‌ترین ظرفیت باربری را دارد.
- ضخامت بهینه لایه مخلوط خاک-خرده لاستیک برابر با نصف قطر خارجی پی رینگی است؛ به‌گونه‌ای که با افزودن لایه‌ای از مخلوط خاک-خرده لاستیک با ضخامت مذکور، ظرفیت باربری پی رینگی تا ٤۱/۵٪ نسبت به حالت غیرمسلح افزایش می‌یابد.
- افزایش ضخامت لایه مخلوط خاک-خرده لاستیک به مقادیری بیش‌تر از مقدار بهینه (۰/۵D) سبب کاهش ظرفیت باربری به‌دلیل افزایش قابلیت فشردگی‌پذیری بستر و حتی در مواردی ($h_{rs}/D$=۱) باعث کم‌تر شدن ظرفیت باربری نسبت به حالت غیرمسلح نیز می‌شود.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.4.9 ]
[ DOI: 10.52547/jeg.15.1.125 ]

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.4.9 ]
[ DOI: 10.52547/jeg.15.1.125 ]



- میزان تنش عمودی اندازه‌گیری شده در یک عمق خاص، با افزایش نسبت قطر داخلی به خارجی پی رینگی، کاهش می‌یابد. که این روند کاهش تنش می‌تواند به‌دلیل انتقال تمرکز تنش از نقاطی نزدیک به مرکز پی به نقاطی نزدیک به لبه‌های بیرونی پی و در واقع تبدیل شدن از حالت رینگ با اثر تداخلی، به دو پی نواری مستقل باشد.
- افزودن یک لایه تسلیح خاک-خرده لاستیک می‌تواند سبب کاهش تنش انتشار یافته در لایه‌های زیرین آن شود که این موضوع می‌تواند به‌دلیل قابلیت جذب انرژی زیاد این لایه و هم‌چنین خاصیت توزیع تنش در سطوح وسیع‌تر، به‌وسیلهٔ این لایه باشد.
- با دور شدن از سطح بارگذاری و حرکت در عمق، تأثیر تسلیح با لایه مخلوط خاک-خرده لاستیک در کاهش تنش‌های عمودی انتشار یافته در عمق، کاهش می‌یابد.

## منابع


1. Sharma V., Kumar A., "Influence of relative density of soil on performance of fiber-reinforced soil foundations", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 45 (5) (2017) 9-507.
2. Ranjan G, Saran S., Gupta A. K., Beaviour of ring footings on sand under vertical and horizontal loads, 9thAsian Geotechnical Conference, Bankok, Thiland, (1987).
3. Ohri M. L., Purhit D. G. M., Dubey M. L., "Behavior of ring footings on dune sand overlaying dense sand", International Conference of Civil Engineers, Tehran, Iran (1997).
4. Boushehrian J. H., Hataf, N., "Experimental and numerical investigation of the bearing capacity of model circular and ring footings on reinforced sand", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 21 (4) (2003) 241-256.
5. Laman M., Yildiz A. "Numerical study of ring foundation on geogrid reinforced sand", Geosynthetics international, Vol.14 (2) (2007) 52-64.
6. EI Sawwaf M., Nazir A., "Behavior of eccentrically loaded small-scale ring footings resting on reinforced layered soil", Journal of geotechnic and geoenvironmental engineering, Vol.138(3) (2012) 376-384.
7. Kumar J., Ghosh, P., "Bearing capacity factor Nγ for ring footings using the method of characteristics", Canadian geotechnical journal, Vol. 42

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.4.9 ]
[ DOI: 10.52547/jeg.15.1.125 ]



(5) (2005) 1474-148.

8. Zhao L., Wang, J.H. "Vertical bearing capacity for ring footings" Computers and Geotechnics, Vol.35(2) (2008) 292–304.
9. Keshavarz A., Kumar J., "Bearing capacity computation for a ring foundation using the stress characteristics method", Computer and Geotechnics, Vol. 89 (2017) 33-42.
10. USTMA, U.S., Tire Manufacturers Association, U.S. Scrape Tire Management Summary (2018).
11. Gotteland P., Lambert S., Balachowski L., "Strength characteristics of tyre chips-sand mixtures", Studia geotechnica et mechanica, 27 (1-2) (2005) 55-66.
12. Anvari S. M., Shooshpasha I., "Influence of size of granulated rubber on bearing capacity of fine-grained sand", Arabian Journal of Geosciences, Vol. 9 (18) (2016) 707.
13. Kyser D., Ravichandran N., "Properties of chipped rubber roofing membrane and sand mixtures for civil engineering applications" Journal of Building Engineering, Vol. 7 (2016) 103-113.
14. Bali Reddy S., Pradeep Kumar D., Murali Krishna A., "Evaluation of the optimum mixing ratio of a sand-tire chips mixture for geoengineering applications", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.28(2) (2016) 1-7.
15. Chenari R. J., Fatahi B., Maroufi M. A. A., Alaie R., "An experimental and numerical investigation into the compressibility and settlement of sand mixed with TDA", Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 35 (5) (2017) 1-20.
16. Tajdini M., Nabizadeh A., Taherkhani H., Zartaj H., "Effect of added waste rubber on the properties and failure mode of kaolinite clay", International Journal of Civil Engineering, Vol. 15 (6) (2017) 949-958.
17. Rezazadeh Eidgahee D., Haddad A., Naderpour H., Evaluation of shear strength parameters of granulated waste rubber using artificial neural

networks and group method of data handling, Scientia Irania, (2018).

18. Moghaddas Tafreshi S. N., Norouzi A. H., "Bearing capacity of a square model footing on sand reinforced with shredded tire–an experimental investigation", Construction and Building Materials, Vol. 35 (2012) 457-556.
19. Moghaddas Tafreshi S.N., Joz Darabi N., Tavakoli Mehrjardi G.H., Dawson A. R., "Experimental and numerical investigation of footing behaviour on multi-layered rubber-reinforced soil", European Journal of Environmental and Civil Engineering, (2016) 1-24.
20. Mittal R. K., Gill G., "Pressure settlement behaviour of strip footing resting on tire-chip reinforced sand", International Journal of Geotechnical Engineering, (2017) 1-7.
21. ASTM D 2487-11, "Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)", American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, (2011).
22. Moghaddas Tafreshi S. N., Khalaj O., Dawson A. R., "Pilot-scale load tests of a combined multilayered geocell and rubber-reinforced foundation", Geosynthetic International, Vol. 20 (3) (2013) 143-161.
23. Moghaddas Tafreshi S. N., Darabi N., Dawson A. R., "Cyclic loading response of footing on multi-layered rubber-soil mixtures", Geomechanics and Engineering, Vol. 14 (2) (2018) 115-129.
24. Hsieh C., Mao L., "A bench-scale performance test for evaluation of the geosynthetic reinforcement effects on granular base courses", Geosynthetics Research and Development in Progress (2005) 1-11.
25. Tavakoli Mehrjardi G. H., Moghaddas Tafreshi S. N., Dawson A. R, "Combined use of geocell reinforcement and rubbere-soil mixtures to improve performance of buried pipes", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 34 (2012) 116-130.
26. Tafreshi S. N., Norouzi2a A., "Application of waste rubber to reduce

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.4.9 ]
[ DOI: 10.52547/jeg.15.1.125 ]

the settlement of road embankment", Geomechanics and Engineering, Vol. 9 (2) (2015) 219-241.

27. Joz Darabi N., Moghaddas Tafreshi S. N. "Investigation into footing behavior of layered granulated rubber-soil mixture: Experimental study on small and large scale models", Sharif journal civil engineering, Vol. 32, 2 (2.2) (2016) 79-88. In Persian.
28. ASTM D1556/D1556M-15, "Standard test method for density and unit weight of soil in place by the sand-cone method", American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. (2015).
29. Tavakoli Mehrjardi G. H., Jamshidi H., "Bearing capacity and settlement of ring footing", Thechnical and Soil Mechanics Lab Co, (2010) Book In Persian.
30. Dash S. K., Sireesh S., Sitharam T. G., "Model studies on circular footing supported on geocell reinforced sand underlain by soft clay", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 21 (4) (2003) 197-219.
31. Patra C. R., Das B. M., Atala C., "Bearing capacity of embaded strip foundation on geogrid reinforced sand", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 23 (5) (2005) 454-462.
32. Sitharam T. G., Sireesh S., Dash S. K., "Performance of surface footing on geocell reinforced soft clay beds", Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 25 (5) (2007) 509-524.
33. Moghaddas Tafreshi S. N., Dawson A. R., "Comparison of bearing capacity of a strip footing on sand with geocell and with planar forms of geotextile reinforcement", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 28 (1) (2010a) 72-84.
34. Moghaddas Tafreshi S. M., Khalaj O., Dawson A. R., "Repeated loading of soil containing granulated rubber and multiple geocell layers", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 42 (1) (2014) 25-38.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.4.9 ]
[ DOI: 10.52547/jeg.15.1.125 ]