



## ارزیابی عملکرد مسلح کننده ژئو اسکرپ تایر با اعضای عرضی افقی با استفاده از آزمایش بزرگ مقیاس بیرون کشش

مهرداد تاج آبادی پور<sup>۱</sup>، مسعود دهقانی<sup>۱\*</sup>، بهزاد کلانتری<sup>۱</sup>، سید حمید لاجوردی<sup>۲</sup>

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندر عباس، ایران

۲- گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۰۳

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۸/۱۶

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۹/۲۴

### کلمات کلیدی:

مقاومت بیرون کشیدگی

ژئواسکرپ تایر

دیوار خاک مسلح

اعضای عرضی

آزمایش بزرگ مقیاس بیرون کشش

**خلاصه:** در این مقاله با استفاده از آزمایش‌های بیرون کشش بزرگ مقیاس (۱/۴×۰/۸×۰/۸ متر) به ارزیابی عملکرد نوارهای لاستیک فرسوده با اعضای عرضی افقی (ژئو اسکرپ تایر) به عنوان المان‌های تسلیح در دیوارهای خاک مسلح پرداخته شده است. در این راستا نتایج آزمایشگاهی ژئو اسکرپ تایر با مقادیر تئوری و سه مسلح کننده‌ی متداول نوار ژئوسینتتیک، نوار فولادی و نوار فولادی آجدار مقایسه شده است. نتایج آزمایش‌های بیرون کشش نشان می‌دهند که مسلح کننده‌ی پیشنهاده‌ی عملکرد بهتری نسبت به سایر مسلح کننده‌های متداول داشته و مقاومت بیرون کشیدگی را نسبت به نوار فولادی، نوار ژئوسینتتیک و نوار فولادی آجدار بیش از ۳، ۲/۵ و ۱/۵ برابر افزایش می‌دهد. افزایش مقاومت بیرون کشیدگی با افزودن تعداد اعضای عرضی متاثر از پارامتر S/B (نسبت فاصله به عرض اعضای عرضی) بوده است و افزودن سه عضو عرضی مقاومت بیرون کشیدگی را نسبت به نوار فولادی، نوار ژئوسینتتیک و نوار فولادی آجدار بیش از ۵/۹، ۴/۹ و ۳/۲ برابر افزایش داده است. بنابراین با استفاده از المان تسلیح ژئو اسکرپ تایر با سه عضو عرضی افقی نیاز به طول کمتری (کمتر از ۳۰ درصد) نسبت به سایر المان‌های تسلیح نواری متداول (نوار فولادی، نوار ژئوسینتتیک و نوار فولادی آجدار) بوده است. لذا با بهره گرفتن از این سیستم می‌توان افق جدیدی را در حل معضل لاستیک‌های فرسوده گشوده و مهندسی ژئوتکنیک را در دستیابی به سیستم‌های برتر و اقتصادی تر دیوارهای خاک مسلح مطمئن ساخت.

### ۱- مقدمه

در سیستم‌های غیر مسلح که با استفاده از مصالح طبیعی احداث می‌گردند، محدودیت‌های ناشی از ضعف مصالح به کار رفته، روش اجرا و شرایط نامساعد محیطی و ژئوتکنیکی محل پروژه موجب خرابی‌ها و یا شرایط نامطلوب در خاکریز می‌گردد. ضعف مقاومت برشی و عدم مقاومت کششی خاک، همواره از معضلاتی بوده که انسان از دیرباز با آن مواجه بوده است. روش‌های مختلفی از روزگاران کهن تا به امروز برای رفع این نقیصه ابداع شده و مورد استفاده قرار گرفته است. خاک مسلح روش نسبتاً جدیدی است که نخستین بار توسط هنری ویدال<sup>۱</sup>، مهندس فرانسوی، در سال ۱۹۶۳ ابداع شد [۱]. در طراحی سازه‌های خاکی مسلح، پایداری خارجی سازه از طریق آنالیز کردن مد

1 Henry Vidal

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.dehghani@hormozgan.ac.ir

گسیختگی ظرفیت باربری پی، آنالیز گسیختگی چرخشی (واژگونی) قسمتی از سازه‌ی خاکی که با خاک زیر پی خود برخورد می‌کند و همچنین لغزش سازه‌ی خاکی کنترل می‌شود. پایداری داخلی سازه‌ی خاکی با استفاده از دو نوع آنالیز گسیختگی ناشی از کشش و بیرون کشیدگی مسلح کننده قابل کنترل است [۲]. جول و همکاران در سال ۱۹۸۴ مکانیزم اندرکنش خاک و سه نوع مختلف مسلح کننده (ژئوگرید قالبی، ژئوگرید تنسار<sup>۲</sup>، میله‌های جوش شده) را مورد ارزیابی و تحقیق قرار دادند. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که اندرکنش خاک-مسلح کننده شامل سه بخش اساسی، اندرکنش خاک-خاک، اندرکنش خاک با قسمت سطحی مسلح کننده و اندرکنش ناشی از اعضای عرضی است. همچنین رابطه‌ی تحلیلی جهت تعیین مقدار مقاومت عرضی بر اساس مکانیزم برش پانچ ارائه شده است [۳].

2 Tensar

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



مختلف (بین ۲۰ تا ۱۴۰ کیلو پاسکال) استفاده شده است. ایشان بسیج شدن مقاومت اصطکاکی شبکه‌های جوشی به ازای سربارهای مختلف در جابجایی‌های کم و کاهش مقدار ضریب اصطکاکی با افزایش سربار را گزارش کردند. از دیگر نتایج حاصل شده تاثیر تعداد اعضای عرضی در ضریب اندرکنش بوده که این مقدار با افزایش اعضای عرضی افزایش پیدا کرده است [۹]. ساکمک و همکاران در سال ۲۰۱۵ به ارزیابی مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده ابداعی با عنوان مسلح کننده باربر در خاک ریزدانه پرداختند. مسلح کننده مورد استفاده متشکل از میلگرد و ورق‌هایی با ابعاد مختلف به عنوان اعضای طولی و عرضی بوده است. نتایج مشخص کرد که سه نوع مختلف گسیختگی با توجه به فاصله‌ی اعضای عرضی می‌تواند رخ دهد و گسیختگی برش کلی و برش پانچ اصلاح شده به ازای مقادیر  $\beta$ ،  $1.65\pi$  و  $\frac{\pi}{3}$  اتفاق افتاده است و با افزایش مقدار ریزدانه، مقدار  $\beta$  کاهش یافته است [۱۰]. ویرا و همکاران در سال ۲۰۱۶ به ارزیابی اجرایی بودن استفاده از بخش ریزدانه‌ی مصالح بازیافتی حاصل از تخریب و ساخت و ساز به هنگام تسلیح با ژئوسینتتیک پرداختند. در این راستا از دو ژئوگرید با مقاومت بالا و یک ژئوکامپوزیت بهره گرفته شده است. نتایج آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ مقیاس نشان می‌دهند که دانه‌های ریز مصالح بازیافتی در صورتی که به نحو مناسب متراکم شوند مقاومت برشی مشابه خاک‌های مورد استفاده در ساخت سیستم‌های مستقل ژئوگرید دارد. ضریب اندرکنش بیرون کشیدگی که با استفاده از آزمایش بیرون کشیدگی برآورد شده در بازه‌ی مورد قبولی قرار گرفته است [۱۱]. لوپس و همکاران در سال ۲۰۱۶ به ارزیابی تاثیر صدمات ناشی از نصب ژئوسینتتیک‌ها در اندرکنش خاک - ژئوسینتتیک در طول بیرون کشیدگی و برش در صفحه‌ی مایل پرداختند. بدین منظور از ژئوتکستایل و ژئوگرید بافته شده که در صحرا نصب شده بودند بهره گرفته شد. صدمات ناشی از نصب باعث گسیختگی‌های نا به هنگام کششی در آزمایش بیرون کشیدگی شده است. همچنین صدمات ناشی از نصب تاثیر کمی در اندرکنش خاک - ژئوسینتتیک در آزمایش برش مستقیم در صفحه‌ی مایل را در بر داشته است [۱۲]. الدکی و همکاران در سال ۲۰۱۶ تاثیر روش قرارگیری ماسه بر روی ژئوتکستایل در رفتار مقاومت برشی را مورد ارزیابی قرار دادند. در این راستا از ۷ نوع مختلف ژئوتکستایل بافته شده، نشده و خاک ماسه‌ای بدانه بندی بهره گرفته شده است. به منظور بررسی تاثیر نحوه‌ی قرارگیری خاک بر روی مسلح کننده از آزمایش برش مستقیم با زوایای مختلف (۰، ۱۵ و ۳۰ درجه) استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که ژئوتکستایل‌ها با جرم حجمی و باز شدگی بیشتر صرفه نظر از صفحه برش و نوع ژئوتکستایل اندرکنش بیشتری را در بر داشته اند [۱۳]. عبدی و میرزایی در سال ۲۰۱۷ با

میلیگان و پالمیرا در سال ۱۹۸۹ تاثیر شرایط مرزی را بر روی رفتار بیرون کشش بررسی کردند. آن‌ها به این مسأله پی بردند که زاویه اصطکاک داخلی به دست آمده بین خاک و مسلح کننده، مقداری دست بالا است و این به علت اصطکاک دیواره‌ی داخلی جعبه‌ی آزمایش در آزمایش‌های کوچک مقیاس است. به همین دلیل آن‌ها توصیه به روغنکاری دیواره‌ی داخلی جعبه و نیز افزایش مقیاس آزمایش کردند [۴]. برگادو و همکاران در سال ۱۹۹۳ با انجام آزمایش‌های بیرون کشیدگی و برش مستقیم بزرگ مقیاس رفتار مسلح کننده (شبکه‌های فولادی، شبکه‌های ساخته شده از بامبو و ژئوگرید) را در خاکهای اصطکاکی - چسبنده را مورد پژوهش قرار دادند. نتایج تحقیقات ایشان نشان می‌دهد که شبکه‌های فولادی مشابه یک جسم صلب عمل کرده و ماکزیمم نیروی بیرون کشیدگی در تغییر مکانهای کم بسیج شده است، همچنین مقاومت اصطکاکی اعضای طولی در حدود ۱۰ درصد و مقاومت اعضای عرضی ۸۰ تا ۹۰ درصد گزارش شده است [۵]. پالمیرا و همکاران در سال ۲۰۰۴ تاثیر پارامترهای طول آزاد ژئوگرید، سرعت آزمایش و تداخل بین اعضا بر روی مقاومت بیرون کشیدگی خاک مسلح شده با ژئوگرید را گزارش کردند. نتایج آزمایشگاهی مشخص کرد که تداخل بین اعضای عرضی تاثیر به سزایی در مقاومت بیرون کشیدگی دارد و برای یک آزمایش مشخص تاثیر تداخل اعضا کاهش ۲۲ درصدی مقاومت را در بر داشته است [۶]. ارجمند و همکاران در سال ۲۰۰۹ اثر محصور کردن ژئوگرید در یک پانل ساندویچی با ماسه‌ی خوب دانه بندی شده را بر افزایش مقاومت خاک رس بررسی کردند. آن‌ها این اثر را با استفاده از آزمایش برش مستقیم بر روی ژئوگریدها در ضخامت‌های ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ میلی‌متر خاک ماسه‌ای دربرگیرنده‌ی ژئوگرید را بررسی کردند. با توجه به نتایج حاصله، ضخامت ۱۰ میلی‌متر خاک ماسه‌ای اطراف ژئوگرید، مقاومت برشی خاک مسلح را بیشتر از سایر ضخامت‌ها افزایش می‌دهد. تعیین این ضخامت بهینه، مستقل از سربار بوده است [۷]. نیری و فخاریان در سال ۲۰۰۹ با استفاده از آزمایش‌های بیرون کشیدگی استاتیکی و سیکلی به مطالعه اثر تنش قائم، تراکم نسبی خاک و مسیرهای مختلف بارگذاری بر توزیع تغییر مکانها و مقاومت بیرون کشش ژئوگرید یک سویه پلیمری مدفون در ماسه سیلیسی پرداختند. نتایج مشخص کرد که با افزایش تنش قائم و تراکم نسبی ماسه، مقاومت بیرون کشیدگی استاتیکی افزایش میابد. در آزمایش سیکلی و در تراکم نسبی پائین افزایش مقاومت با افزایش تراکم نسبی دیده شده و این رفتار در آزمایشهای مختلف روند مشخصی نداشته است [۸]. لاجوردی و همکاران در سال ۲۰۱۳ به ارزیابی اندرکنش خاک با مسلح کننده‌های شبکه‌ای فولادی پرداختند. در این راستا از آزمایش بیرون کشیدگی برای دو نوع مختلف شبکه‌ی میلگرد با مش متراکم و نرمال در فشارهای سربار

نتایج نشان داد که اندرکنش خاک با ژئوسینتتیک حاصله در دو آزمایش برش مستقیم و بیرون کشیدگی به صورت قابل توجهی فرق می کند و ضریب اصطکاکی حاصله از آزمایش بیرون کشیدگی در حدود ۵۰ درصد ضریب اصطکاکی مستخرج از آزمایش برش مستقیم است. همچنین زوایای اصطکاک داخلی خاک حاصل شده از دو آزمایش ۳۰ تا ۵۰ درصد فرق می کنند [۱۹]. عبدی و میرزایی در سال ۲۰۱۸ تاثیر اندازه ذرات بر ضخامت باند برشی در آزمایش بیرون کشش ژئوگرید را مورد پژوهش قرار دادند. بدین منظور در هر مرحله از بارگذاری، از توده تغییر شکل یافته خاک در برگیرنده ژئوگرید عکس‌های دیجیتال تهیه و تصاویر جهت بررسی نحوه جابجایی ذرات مورد پردازش قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان می دهد جابجایی دانه‌ها در اطراف المان‌های عرضی ژئوگرید چرخشی بوده و با افزایش اندازه ذرات ضخامت باند برشی افزایش یافته و در خاک در مجاورت سطوح فوقانی و تحتانی ژئوگرید گسترش یافته و مقاومت بخش بیشتری از خاک را بسیج نموده است [۱۴].

امروزه با توجه به رشد جوامع بشری و نیاز روز افزون به حمل و نقل، لاستیک به عنوان یکی از عناصر مهم در گسترش صنعت خودرو سازی مطرح شده است و استفاده از آن سالیانه در حال افزایش است. لاستیک خودرو پس از فرسودگی و خارج شدن از گردونه مصرف باعث ایجاد معضلات فراوانی شده است. در سال ۲۰۰۸ حدود ۲۴۰ هزار تن لاستیک در ایران تولید شده که با در نظر گرفتن میزان واردات، این مقدار به حدود ۳۰۰ هزار تن می رسد. پیش‌بینی می شود سالانه حدود ۱۲-۱۱ میلیون لاستیک فرسوده در کشورمان به وجود می آید (یک حلقه به ازای هر ۶ نفر) که از این مقدار شاید حدود ۶ درصد (حدود ۲ درصد در صنایع روکش، حدود ۱/۷ درصد به صورت ریکلیم یا لاستیک احیا شده و حدود ۲/۲ درصد هم به صورت پودر صنایع لاستیک) بازیافت شود [۲۰].

تا کنون مطالعات زیادی توسط محققین مختلف در ارتباط با کاربرد خرده لاستیک در تسلیح خاک‌های دانه‌ای پشت دیوار حایل و همچنین به عنوان مصالح خاکریز در راهسازی انجام پذیرفته است [۲۱، ۲۲]. در کنار استفاده از خرده لاستیک‌ها در پروژه‌های ژئوتکنیکی توجه به آلودگی‌های محیطی محتمل از جانب خرده لاستیک‌ها حائز اهمیت است. به این دلیل مطالعات آزمایشگاهی و صحرایی زیادی بر روی محیط‌ها و سیالاتی که در مجاورت با این مواد قرار دارند انجام پذیرفته است و در نتیجه این مطالعات هیچ اثر زیان باری مشاهده نشده و تنها محدودیت محیطی استفاده از خرده لاستیک‌ها مربوط به پتانسیل خود احتراقی است. آئین نامه ASTM در سال ۱۹۹۸ به منظور به حداقل رساندن این پتانسیل دستورالعمل D۶۲۷۰ را ارائه کرده است. یون و همکارانش در سال ۲۰۰۴ ظرفیت باربری و نشست ماسه مسلح شده با خرده لاستیک را به وسیله‌ی

استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و ارزیابی PIV<sup>۱</sup> تاثیر اندازه ذرات و توزیع آن‌ها را بر اندرکنش خاک - ژئوگرید مورد پژوهش قرار دادند. در این راستا از سه نوع خاک با دانه‌بندی متفاوت و ژئوگرید HDPE با سربار مختلف ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال بهره گرفته شد. در طی فرآیند انجام هر آزمایش عکس‌برداری دیجیتالی (PIV) صورت گرفت و همچنین از نرم‌افزار سه بعدی ABAQUS نیز استفاده گردید. نتایج حاکی از آن است که نیروهای بیرون کشیدگی و ضخامت ناحیه برشی با افزایش اندازه‌ی ذرات افزایش می‌یابد و نرخ افزایش در مراحل اولیه زیاد بوده و با افزایش سربار افزایش یافته است [۱۴]. پارک و همکاران در سال ۲۰۱۷ به تحقیق در مورد بیرون کشیدگی مسلح‌کننده‌های ژئوسینتتیکی با استفاده از آزمایش بیرون کشیدگی ابداعی پرداختند. در این راستا دستگاهی طراحی گردید که مسلح‌کننده‌ها در سه لایه مختلف در بالا، وسط و پائین قرار می‌گرفتند و سپس توسط جک‌های تعبیه شده به سمت بیرون کشیده می‌شدند. نتایج نشان می دهد که منحنی‌های نیرو بر حسب جابجایی در روش بیرون کشیدگی ارائه شده با روش مرسوم مشابه بوده و اختلاف بین نتایج کم بوده است [۱۵]. کاردیل و همکاران در سال ۲۰۱۷ به ارزیابی تداخل بین اعضای عرضی ژئوگرید پرداختند. محققین براساس نتایج آزمایش‌های بیرون کشیدگی مختلف روشی تئوری برای تعیین مقاومت بیرون کشیدگی در خاک دانه ای ارائه کردند. روش ارائه شده مکانیزم تداخلی ناشی از اعضای عرضی را در نظر گرفته و اندرکنش خاک - ژئوگرید را به گونه‌ای تحلیل می کند که اثر مقیاس قابل چشم پوشی و ناچیز باشد [۱۶]. کایادلن و همکاران در سال ۲۰۱۷ با استفاده از آزمایش بیرون کشیدگی به مطالعه بار بیرون کشیدگی خاک مسلح شده با ژئوگرید پرداختند. نتایج آزمایش‌ها حاکی از آن است که افزایش تراکم نسبی منجر به افزایش در مقاومت بیرون کشش شده است که این افزایش ناشی از قفل شدگی ذرات با ژئوگرید بیان گردیده است، همچنین اصطکاک بین خاک و ژئوگرید بیش از اصطکاک بین خاک و خاک گزارش شده است [۱۷]. احمدی و مقدم در سال ۲۰۱۷ تاثیر سبب بازشدگی ژئوگرید و اندازه ذرات خاک را در اندرکنش خاک - ژئوگرید را گزارش کردند. در این راستا از ۴ خاک با D<sub>۵۰</sub> متفاوت و ۵ نوع ژئوگرید متفاوت بهره گرفته شده است. احمدی و مقدم ابعاد بازشدگی ژئوگرید را یکی از فاکتورهای بسیار حیاتی در مقاومت بیرون کشیدگی دانستند، همچنین بیان کردند که تاثیر بازشدگی ژئوگرید متاثر از اندازه‌ی ذرات است و برای هر نوع دانه بندی خاک یک ابعاد بازشدگی بهینه وجود دارد که بیشترین مقاومت بیرون کشیدگی را در بر دارد [۱۸]. هگده و روی در سال ۲۰۱۸ به مقایسه اندرکنش ژئوسینتتیک و خاک با استفاده از روش‌های عددی و آزمایش‌های برش مستقیم و بیرون کشیدگی بزرگ مقیاس پرداختند.

1 Particle Image Velocimetry

دریافت کننده بسیاری از مواد است اما توانایی خاک برای فیلتراسیون مواد محدود است و با گذشت زمان و افزایش تمرکز پسماندها در خاک به دلیل تداوم و ماندگاری لاستیک و حجم زیاد تولیدی آنها مقدار مواد سمی خطرناک موجود در خاک بیش از حد مجاز می‌شود که این تهدیدی جدی برای محیط زیست قلمداد می‌شود. اما نکته قابل توجه این است که ده‌ها میلیون تایلر فرسوده به صورت دفن شده و یا پراکنده در محیط، در سراسر ایران وجود دارد و به یکی از مشکلات زیست محیطی جدی در سال‌های اخیر تبدیل شده‌است. از این رو ارائه راهکاری مناسب برای حل این مشکل ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله به ارزیابی عملکرد لاستیک فرسوده به صورت ابداعی به عنوان المان تسلیح در دیوار خاک مسلح پرداخته شده‌است. در این راستا از لاستیک کامیون (۲۲/۵ R ۳۸۵/۸۰) بهره گرفته شده و از پهنای لاستیک، نوارهای لاستیکی (ژئواسکرپ تایلر) با عرض، طول و ضخامت ۷۰، ۸۵۰ و ۲۰ میلی‌متر برای تسلیح دیوارهای خاک مسلح استفاده شده‌است. در این راستا از کناره‌های لاستیک به عنوان اعضای عرضی افقی بهره گرفته شده‌است. به منظور بررسی سامانه‌ی پیشنهادی از آزمایش‌های بزرگ مقیاس بیرون کشش استفاده شده و با مسلح کننده‌های نواری متداول (نوار فولادی، نوار ژئوسینتتیک و نوار فولادی آجدار) مقایسه شده‌است.

## ۲- مصالح

### ۱-۱- مصالح خاکی

به منظور در نظر گرفتن تمامی شرایط اجرایی، خاک انتخاب شده بر اساس معیارهای مورد پذیرش نشریه ۱۰۱ و استاندارد FHWA [۳۱] در نظر گرفته شده‌است. به استناد نشریه‌های مذکور می‌بایستی صد درصد دانه‌ها از الک شماره ۴ با قطر ۴/۷۵ میلی‌متر عبور کنند و درصد ریزدانه (عبوری از الک شماره ۲۰۰ با قطر ۰/۷۵ میلی‌متر) کمتر از ۱۵ درصد باشد. بنابراین نمونه‌ی مورد مطالعه آزمایشگاهی به گونه‌ای انتخاب شده‌است که تمامی پارامترهای استانداردهای مذکور را ارضاء کرده و طبق سیستم طبقه‌بندی یونیفاید<sup>۱</sup> از نوع SP است (شکل ۱). خاک دانه‌های مورد استفاده دارای اندازه‌ی متوسط ( $D_{50}$ )، ضریب یکنواختی ( $C_u = D_{60} / D_{10}$ ) و چگالی ویژه ( $G_s$ )، ۰/۶ میلی‌متر، ۳/۴ و ۲/۶۳ است (جدول ۱). وزن مخصوص خشک ماکزیمم ( $\gamma_{dmax}$ ) و مقدار رطوبت بهینه ( $\omega_{opt}$ ) خاک ماسه‌ای براساس انرژی پراکتور استاندارد (ASTM D۶۹۸-۹۱) [۳۲] عبارتند از: ۱۸ کیلو نیوتن بر متر مکعب و ۸ درصد.

اثر مقیاس یکی از پارامترهای مهم در تعیین مقادیر پارامترهای برشی است. بر این اساس آئین نامه‌ی ASTM D۵۳۲۱، ۲۰۰۹ [۳۳]

آزمایش بارگذاری صفحه‌ای مورد مطالعه قرار دادند، نتایج نشان داد که ظرفیت باربری ماسه سست مسلح شده با خرده تایرهای فرسوده بیشتر از ۲ برابر ظرفیت باربری ماسه‌ی سست است. کاهش ناشی از مسلح سازی ماسه با ترکیب خرده‌های آج و دیواره‌های تایلر بیشتر از ۷۰ درصد برای ماسه سست و بیش از ۳۴ درصد برای ماسه متراکم بوده‌است [۲۳]. یووای و برگادو در سال ۲۰۰۴ به تحلیل عددی دیوار مسلح شده با استفاده از مخلوط تراشه‌های لاستیک‌های فرسوده و ماسه به عنوان مصالح مورد استفاده پرداختند و نتیجه گرفتند که با افزایش درصد وزنی تراشه‌های لاستیکی در مخلوط، مجموع نیروی کششی نرمال شده و حرکات جانبی دیوار افزایش می‌یابد [۲۴]. گاتلند و همکاران در سال ۲۰۰۵ مطالعاتی بر روی مخلوط‌های خرده لاستیک- ماسه انجام دادند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که درصد خرده لاستیک تاثیر به سزایی بر مقاومت برشی مخلوط ماسه-خرده لاستیک داشته‌است [۲۵]. هاتف و رحیمی به بررسی تاثیر مقدار و ابعاد خرده لاستیک در میزان افزایش باربری و نشست پی‌های دایروی پرداختند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که با افزایش تعداد و ابعاد لاستیک، به ازای یک میزان بار مشخص، میزان نشست کاهش پیدا کرده‌است [۲۶]. اکبالت و همکاران در سال ۲۰۰۷ به بررسی اثر خرده لاستیک و الیاف مصنوعی پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن در خواص استاتیکی و دینامیکی خاک رس پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که با افزودن خرده لاستیک به میزان ۵ درصد وزنی، ضریب میرایی خاک رس به میزان ۱۰ درصد کاهش می‌یابد که سبب بهبود خاک رس در برابر زمین لرزه می‌گردد [۲۷]. نخعی و همکارانش در سال ۲۰۱۱ با استفاده از آزمایش‌های سه محوری بزرگ مقیاس و تحلیل عددی، خصوصیات و رفتار دینامیکی مخلوط‌های خاک - خرده لاستیک و تاثیر به کارگیری آنها در دیوارهای حایل را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داده‌است که برای هر فشار محدود کننده‌ای، با افزایش درصد لاستیک، مدول برشی کاهش می‌یابد و کاهش محسوسی در فشار دینامیکی و تغییر مکان باقیمانده به وجود می‌آید [۲۸]. موهان و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده‌ی نردبانی فولادی در مخلوط ماسه- خرده لاستیک پرداختند. مطالعات آزمایشگاهی نشان دادند که افزودن خرده لاستیک به خاک باعث افزایش مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده‌ی فولادی شده‌است [۲۹]. گیل و میتل در سال ۲۰۱۹ استفاده از خرده لاستیک در پی‌های سطحی دارای خروج از مرکزیت بار را مورد مطالعه قرار دادند. مقدار بهینه‌ی خرده لاستیک و عرض پی، ۳۰ درصد وزنی و ۱B گزارش شد. همچنین بهبود عملکرد پی در خاک‌های ماسه‌ای متراکم و سست مشاهده گردیده‌است [۳۰]. اگرچه خاک مهم ترین و گسترده ترین صافی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آنها، بازیافت کننده ی ضایعات و نیز

1 Geo Scrap Tire (GST)

2 Unified Soil Classification System (USCS)

جدول ۱. مشخصات خاک ماسه‌ای  
Table 1. Soil characteristics

| مقادیر | مشخصات                                   |
|--------|--|
| ۱۸     | وزن مخصوص خشک حداکثر ( $\text{kN/m}^3$ ) |
| ۱۷/۱   | وزن مخصوص خشک ( $\text{kN/m}^3$ )        |
| ۲/۶۳   | چگالی ویژه                               |
| ۰/۲۵   | قطر موثر (mm)                            |
| ۰/۱۶   | قطر متوسط (mm)                           |
| ۹۰/۶   | تراکم نسبی (%)                           |
| ۳۸     | زاویه اصطکاک داخلی ( $^\circ$ )          |
| ۰      | چسبندگی ( $\text{kN/m}^2$ )              |

که در این زمینه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

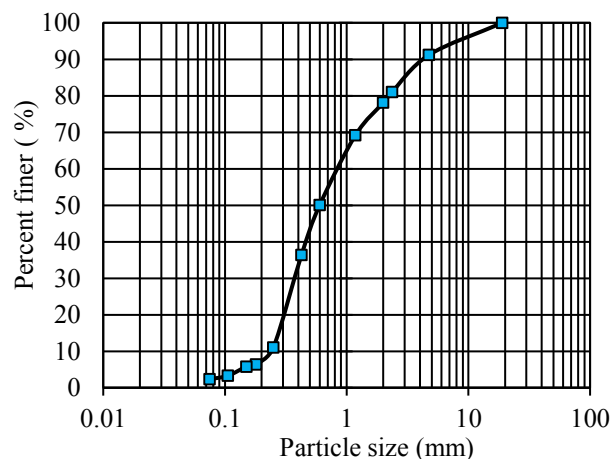
۱- تاثیر استفاده از لاستیک فرسوده در محیط زیست

یکی از نکات بسیار مهمی که قبل از استفاده از لاستیک فرسوده در خاک باید مورد توجه قرار داد میزان تاثیر آن و به عبارتی آلودگی زیست محیطی لاستیک فرسوده بوده‌است. استفاده از لاستیک فرسوده به صورت خرده در فعالیت‌های عمرانی یکی از گزینه‌های پیشنهادی مهندسیین و محققین بوده‌است. در این راستا سالهای متعددی محققین مختلفی با استفاده از آزمایش‌های آشویی براساس  $EP^1$ ،  $TCLP^2$  و  $EPA^3$  استفاده از لاستیک در خاک و تاثیر آن بر محیط‌زیست را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج تحقیقات مختلف نشان می‌دهند که درصد مواد زیان‌آور کمتر از حد مجاز بوده‌است. براین اساس استاندارد  $ASTM D6270$  [۳۴] لاستیک‌های فرسوده را به عنوان مصالح غیر مخرب و غیرسمی در نظر گرفته‌است. البته لازم به ذکر است آزمایش‌های صورت گرفته بر روی قطعات خرد شده لاستیک بوده‌است و در صورتی که از قطعات لاستیک فرسوده در مقیاس بزرگ استفاده شود، اثرات زیست محیطی لاستیک فرسوده می‌تواند کاهش چشم‌گیری داشته باشند. لذا استفاده از لاستیک فرسوده به صورت نوار در خاک نگرانیهای زیست محیطی را به دنبال نخواهد داشت.

۲- دوام<sup>۴</sup> و تنزل<sup>۵</sup> لاستیک‌های فرسوده

یکی از موارد مهمی که می‌تواند در کار حاضر بسیار مهم باشد بحث دوام و تنزل لاستیک‌های فرسوده در شرایط اجرایی پروژه است. مالک و ستون‌سوز شرایط محیطی بر دوام و تنزل لاستیک‌های فرسوده را ارزیابی کردند [۳۵]. بدین منظور به مدت ۴۲ سال لاستیک‌های فرسوده را در عمق ۲۴ متری در زیر آب دریا با pH ۷/۸ و اکسیژن محلول  $8/77 \text{ mg/l}$  قرار دادند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که بعد از مدت زمان ۴۲ سال تنزل و کاهش مقامتی جدی

- 1 Extraction Procedure
- 2 Toxicity Characterization Leaching Procedure
- 3 Environmental Protection Agency
- 4 Durability
- 5 Degradation



شکل ۱. منحنی دانه بندی خاک ماسه‌ای

Fig. 1. Particle size distribution curve

پیشنهاد می‌کند، به منظور کاهش اثر مقیاس باید ابعاد جعبه‌ای برش بیش از ۳۰۰ میلی متر در نظر گرفته شود. در این مقاله به منظور کاهش اثر مقیاس از دستگاه بزرگ مقیاس برش مستقیم با  $1/4$  متر طول،  $0/8$  متر عرض و  $0/8$  متر ارتفاع ( $1/4 \times 0/8 \times 0/8$  متر) استفاده شده‌است. در این راستا تمامی شرایط انجام آزمایش برش مستقیم (درجه تراکم  $90/6$  درصد)، تنش‌های قائم ( $25,50$  و  $75$  کیلوپاسکال)، نرخ جابجایی ( $1$  میلی متر بر دقیقه) دقیقاً مشابه آزمایش بیرون‌کشش بوده‌است. جدول ۱ مقادیر مربوط به پارامترهای برشی (c و p) را نشان می‌دهد.

## ۱-۲- انواع مسلح کننده‌ها

### ۱-۲-۱ ژئو اسکرپ تایر

برای استفاده از لاستیک‌های فرسوده به عنوان المان‌های تسلیح در دیوارهای خاک مسلح، ابتدا نمونه‌های مختلفی از لاستیک‌های با ابعاد بزرگ (لاستیک کامیون) جمع‌آوری گردیده‌است. برای تبدیل لاستیک کامیون به المان تسلیح در گام اول باید طوقه‌های لاستیک جدا شود و در مرحله ی بعد لاستیک بدون طوقه از وسط برش خورده تا تبدیل به یک نوار با طول تقریباً ۴ متر شود (شکل ۲. ب و ج) و در ادامه کنارهای لاستیک به دلیل عدم مقاومت کافی جدا می‌شوند و نوار لاستیکی به عرض ۲۸۰ میلی متر و طول حدوداً ۴ متر از یک لاستیک فرسوده کامیون استخراج می‌گردد. برای اجرایی بودن مدل مذکور میبایستی عرض لاستیک به قطعات کوچکتر در حدود ۵۰ تا ۹۰ میلی‌متر تبدیل شود. البته لازم به ذکر است کناره ی آجدار لاستیک با توجه به عدم مقاومت کافی و وجود سیم حتماً بایستی جدا گردد. بعد از جدا شدن کناره نوار باقیمانده با توجه به عرض مورد نظر استخراج می‌گردد.

به منظور استفاده از لاستیک فرسوده به عنوان المان تسلیح در خاک لازم است چندین پارامتر مهم و اجرایی باید در نظر گرفته شود



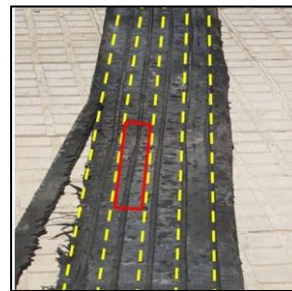
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۲. مراحل مختلف تبدیل لاستیک فرسوده به المان تسلیح خاک (GST)  
 Fig. 2. Different stages of making GST

جدول ۲ نتایج آزمایش کشش مستقیم بر روی نمونه لاستیک فرسوده را نشان می دهد. مقدار مقاومت کششی لاستیک فرسوده در مقایسه با مسلح کننده های نواری متداول (نوار فولادی، ژئوسینتتیک) حد مطلوبی را بیان می کند. بنابراین به عنوان سومین گام در پذیرش این مدل ها نتایج قابل قبولی حاصل شده است.

کناره ی آجدار لاستیکهای فرسوده را به دلیل عدم مقاومت کششی نمی توان به عنوان المان تسلیح استفاده کرد. لذا در این مقاله استفاده از کناره ی آجدار لاستیک فرسوده به عنوان اعضای عرضی بر روی لاستیک فرسوده پیشنهاد شده است. شکل ۴ مراحل مختلف ساخت اعضای عرضی را برای نوار لاستیک فرسوده را نشان می دهد. برای ساخت اعضای عرضی قسمت کناره لاستیک به نوار لاستیکی تبدیل شده و با توجه به عرض نوار لاستیک فرسوده اعضای عرضی از نوار کل استخراج می شوند. اعضای عرضی مورد استفاده دارای طولی

در لاستیکهای فرسوده حاصل نشده است. یکی از پارامترهای بسیار تاثیرگذار در استفاده از لاستیک فرسوده به عنوان المان تسلیح در دیوارهای خاک مسلح، مقاومت کششی لاستیک فرسوده و به تبع آن کاهش در سازه های متمادی است. با توجه نتایج مالک و ستونسون مشخص می گردد که بعد از ۴۲ سال قرارگیری لاستیک در محیط دریا با اکسیژن محلول بالا، ۳ درصد از مقاومت کششی لاستیک کاهش یافته است. بنابراین با توجه تحقیقات صورت گرفته استفاده از لاستیک فرسوده حداقلهای لازم را برای به کارگیری به عنوان المان تسلیح در خاک را می گذراند.

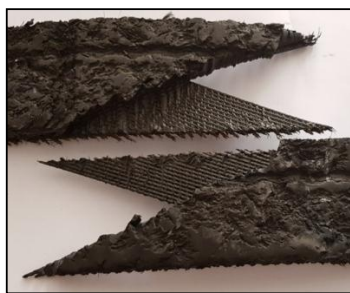
### ۳- مقاومت کششی لاستیکهای فرسوده

استفاده از لاستیک فرسوده به عنوان المان تسلیح در دیوارهای خاک مسلح منوط به مقاومت کششی کافی است. لذا اگر لاستیکهای فرسوده مقاومت کششی قابل قبولی نداشته باشند گزینه ای استفاده از لاستیک فرسوده در دیوارهای خاکی مسلح به طور کامل رد می شود. در این راستا ابتدا نوارهای لاستیک فرسوده به عرض ۷۰ میلی متر با توجه به عرض مسلح کننده های نواری مرسوم از قسمت های مختلف لاستیک استخراج شده و در گام بعد مقدار مقاومت کششی با استفاده از آزمایش کشش مستقیم (یونیورسال) اندازه گیری شده است (شکل ۳). با توجه به ساختار لاستیک فرسوده برای انجام این آزمایش نیاز به تعبیه فک های خاص در این سیستم آزمایش بوده است.

جدول ۲. پارامترهای مقاومتی نوار لاستیک فرسوده

Table 2. Characteristics of GST

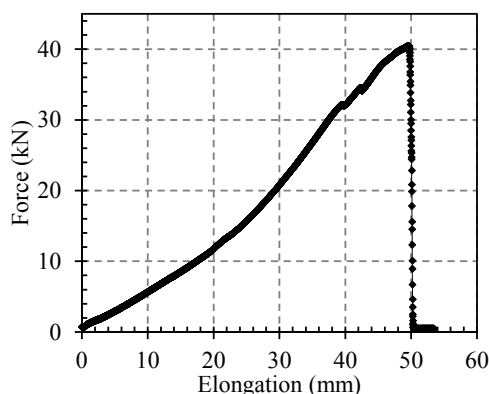
| مشخصات           | مقادیر                            |
|------------------|-----------------------------------|
| ۴۰/۵۲ کیلو نیوتن | مقاومت کششی ماکزیمم ( $T_{ult}$ ) |
| ۵/۶۵ کیلو نیوتن  | مقاومت کششی در کرنش ۲٪            |
| ۸/۵۲ کیلو نیوتن  | مقاومت کششی در کرنش ۳٪            |
| ۱۵/۷ کیلو نیوتن  | مقاومت کششی در کرنش ۵٪            |
| ۱۰ درصد          | افزایش طول در لحظه کسختگی         |
| ۴۰۰ مگا پاسکال   | مدول الاستیسیته                   |



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۳. تعیین پارامترهای مقاومتی لاستیک فرسوده (الف) آزمایش کشش مستقیم (ب) مکانیزم گسیختگی نمونه لاستیکی (ج) نمودار نیرو-جابجایی لاستیک فرسوده

Fig. 3. Determination mechanical properties of GST a) Universal test b) Failure mechanism c) Stress-strain curve

مرکز به مرکز ۵۰ میلی‌متر است (شکل ۵. ج).  
به منظور ارزیابی و مقایسه‌ی المان تسلیح پیشنهادی عرض و طول (۷۰ و ۸۵۰ میلی‌متر) تمامی مسلح‌کننده‌ها با نوار لاستیکی یکسان در نظر گرفته شده‌اند.

### ۳- مطالعات آزمایشگاهی

#### ۳-۱- دستگاه آزمایش بیرون کشش

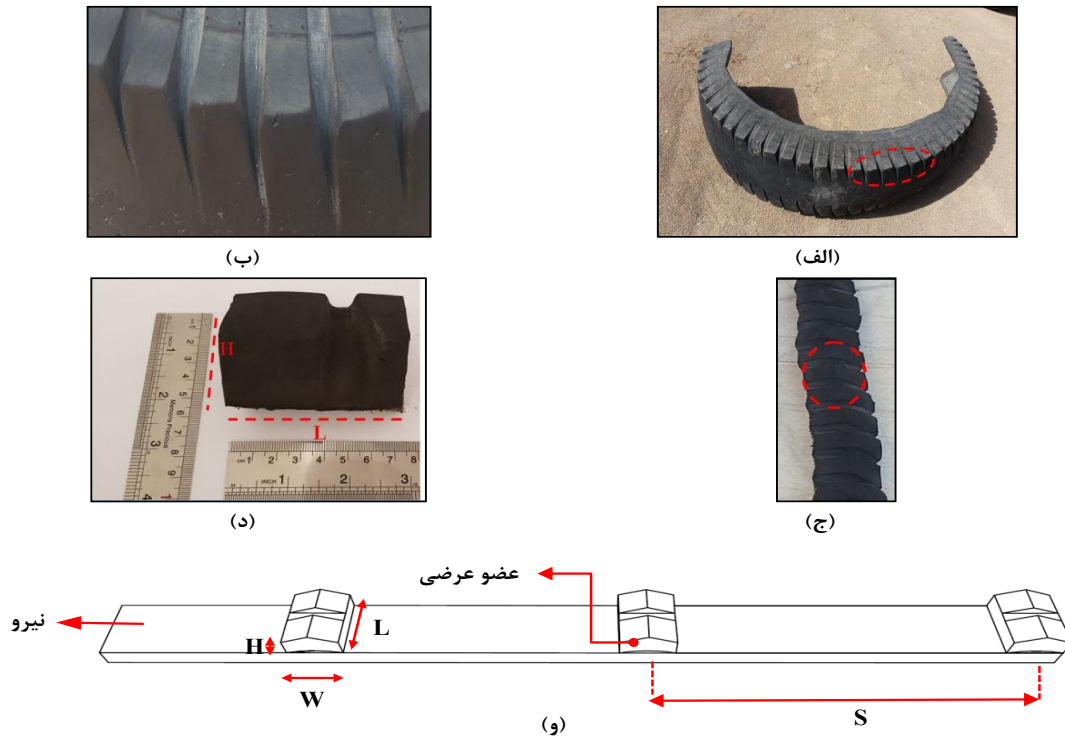
دستگاه آزمایش بیرون کشش مورد استفاده در این تحقیق با ابعاد ۱/۴ متر طول، ۰/۸ متر عرض و ۰/۸ ارتفاع بر اساس استاندارد ASTM D۶۷۰۶ [۳۶] ساخته شده که در رده دستگاه‌های بزرگ مقیاس در تحقیقات بین‌المللی قرار می‌گیرد. برای ساخت بدنه جعبه از قطعات فولادی برپایه نتایج تحلیل سازه جعبه تحت بارگذاری حین آزمایش و رعایت ضرایب اطمینان لازم بهره گرفته شده‌است. در وجوه پشت و کناری جعبه از سخت‌کننده‌هایی در عرض جهت جلوگیری از اعوجاج و کمانش در پوسته جعبه استفاده شده‌است. به منظور توزیع مناسب وزن جعبه و محتویات آن در محل استقرار و تامین استحکام لازم، از یک شبکه متشکل از پروفیل‌های نورد شده فولادی استفاده شده، که بر روی زمین قرار گرفته و جعبه از بخش تحتانی بر روی آن جوش شده‌است (شکل ۶). نیروی بیرون کشش از طریق جک هیدرولیک با ظرفیت ۱۲۰ کیلو نیوتن و طول شفت

(L) معادل ۷۰ میلی‌متر، ارتفاع (H) ۲۰ میلی‌متر و عرض (w) ۵۰ میلی‌متر هستند (شکل ۴). فاصله اعضای عرضی با توجه به تعداد آن‌ها از ۱۱۰ تا ۶۶۰ میلی‌متر می‌تواند متغیر باشد.  
برای اتصال اعضای عرضی لاستیکی که از کناره‌ی لاستیک استخراج شده بودند روش‌های مختلفی اتخاذ شد و بعد از بررسی و آزمایش روش‌های متفاوت، استفاده از چسب‌های مخصوص و روش اسپلایس سرد پیشنهاد گردید.

#### ۱-۲-۲- نوار فولادی و ژئوسینتتیک

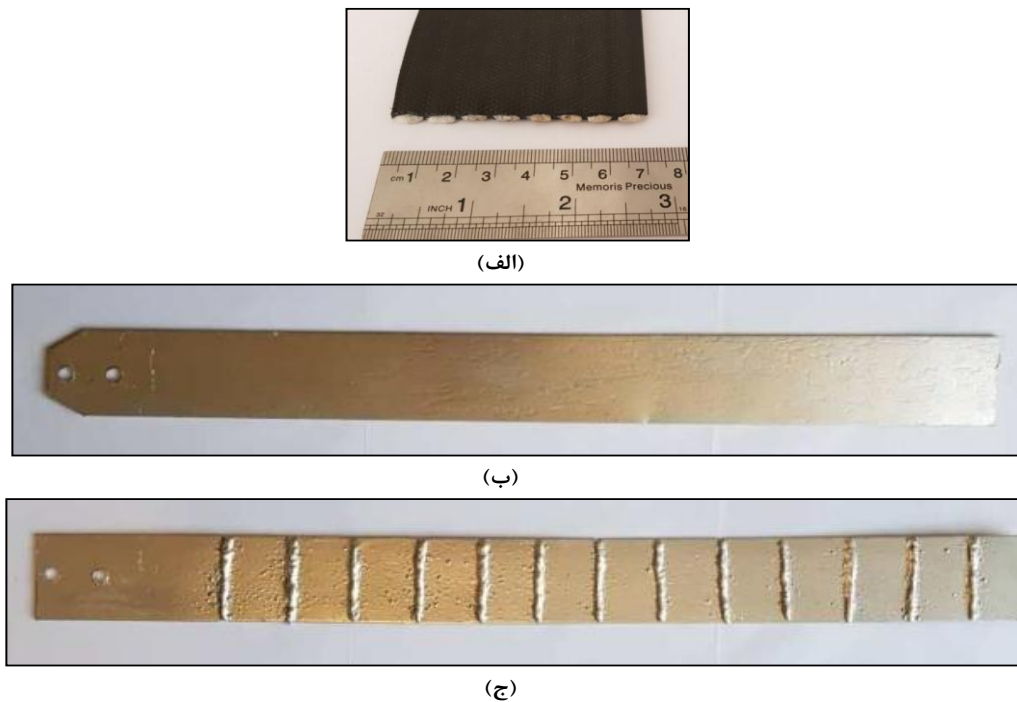
نوار ژئوسینتتیک<sup>۱</sup> (GS) از الیاف پلی استری با مقاومت کششی بالا و پوششی از جنس پلی اتیلن تشکیل شده‌است. این المان تسلیح دارای عرض ۷۰ میلی‌متر، ضخامت ۲ میلی‌متر و مقاومت کششی ۵۰ کیلو نیوتن بوده‌است (شکل ۵. الف). نوار فولادی<sup>۲</sup> (ST) دارای سطحی صاف و گالوانیزه، ضخامت ۴ میلی‌متر، عرض ۷۰ میلی‌متر و مقاومت کششی ۶۵ کیلو نیوتن است (شکل ۵. ب). نوار فولادی دارای آج در سطح رویه<sup>۳</sup> (STR) مشخصاتی مشابه نوار فولادی معمولی داشته و فرق آن در آج‌هایی با ارتفاع ۲ میلی‌متر و فاصله

- 1 Geosynthetic strip (GS)
- 2 Steel strip (ST)
- 3 Steel strip with ribbed on top (STR)



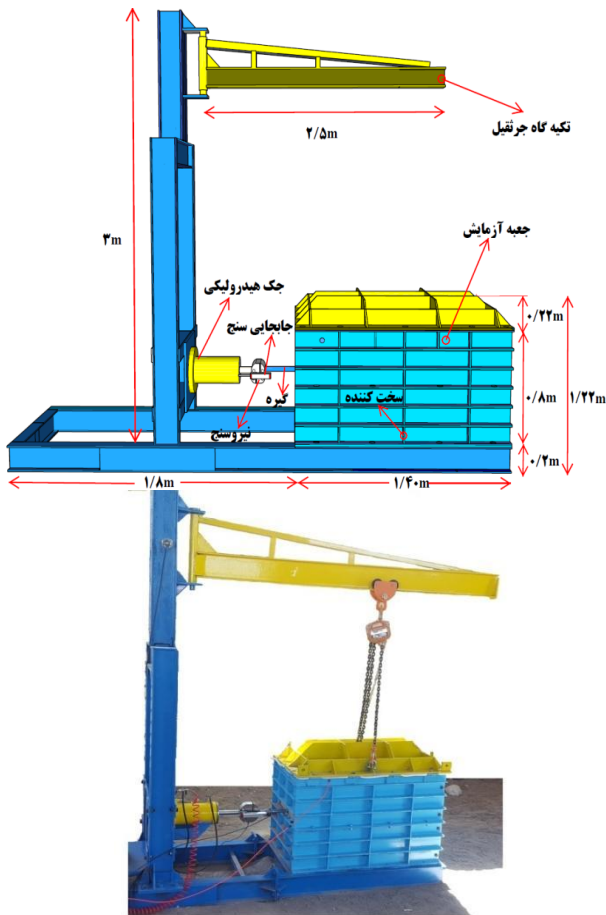
شکل ۴. مراحل مختلف ساخت اعضای عرضی الف) لاستیک فرسوده بدون طوقه ب) بخش آجدار ج) نوار لاستیکی د) عضو عرضی و) شماتیک قرار گیری اعضای عرضی بر روی نوار لاستیکی

Fig. 4. Various steps for produce of transverse members a) Scrap tire without side walls b) Ribbed section c) Geo scrap tire strip d) Transverse member h) Schematic of transverse members on GST



شکل ۵. انواع مسلح کننده های نواری متداول الف) نوار ژئوسینتتیک ب) نوار فولادی معمولی ج) نوار فولادی آج دار  
Fig. 5. Different conventional strip reinforcements a) Geosynthetic strip b) Steel strip c) Ribbed steel strip





شکل ۶. دستگاه آزمایشگاهی بزرگ مقیاس بیرون کشش

Fig. 6. Large-scale pullout apparatus

صفحات سخت کننده بر روی آن استفاده شده است. به منظور فشار کاملا یکنواخت در طول کل زمان آزمایش از گج‌های با دقت بالا و همچنین ابزار دقیق بهره گرفته شده است.

#### ۱-۴- روش انجام آزمایش

بعد از انتخاب خاک استاندارد نوبت به تهیه نمونه مناسب برای آزمایش است. بدین منظور ابتدا نیمه پائینی دستگاه در چهار لایه با ضخامت ۹۰ میلی‌متر پر شده تا ضخامت نهایی ۳۶۰ میلی‌متر گردد. نکته بسیار مهمی که باید مد نظر قرار گیرد تراکم خاک در این راستا با توجه به شرایط اجرایی درصد تراکم ۹۵ درصد در نظر گرفته شده است و براین مبنای استفاده از کوبه دستی با ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر، وزن ۸ کیلوگرم، ارتفاع سقوط ۲۵۰ میلی‌متر و روش ابداعی به نام مرکز به مرکز خاک متراکم شده است. خاک مورد نظر در درصد رطوبت بهینه (۸ درصد) در لایه‌های ۹۰ میلی‌متری کوبیده شده تا تراکم نسبی  $D_r = 90/64$  حاصل شود. بعد از کوبیدن ۴ لایه و پر شدن نیمه جعبه نوار لاستیکی به گیره متصل می‌گردد و در گام بعد انتهای گیره به نیروسنج وصل می‌شود. سپس نیمه

۲۰۰ میلی‌متر اعمال شده و توسط یک لودسل در حد فاصل جک و گیره، اندازه‌گیری می‌شود. استاندارد ASTM D۶۷۰۶ مقدار نرخ سرعت بیرون کشیدگی نمونه ی مسلح کننده را ۱ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته است. اندازه‌گیری جابجایی توسط یک جابجایی سنج<sup>۱</sup> با حداکثر تغییر مکان ۱۵۰ میلی‌متر و دقت بالا صورت می‌گیرد. یکی از نکات حایز اهمیت در انجام آزمایش بیرون کشیدگی به حداقل رساندن اصطکاک جداره‌های داخل دستگاه با خاک است. بدین منظور محققین مختلف استفاده از روش‌های مختلفی از جمله: استفاده از نوارلاستیکی روغن کاری شده، روغن کاری با گریس سیلیکون و غشا پی وی سی، استفاده از ورقه‌های ژئوفوم [۳۷-۴۳] را پیشنهاد کرده اند. در این تحقیق برای کاهش اثرات اصطکاک بدنه ی جعبه با خاک دو روش زیر مورد استفاده قرار گرفته است:

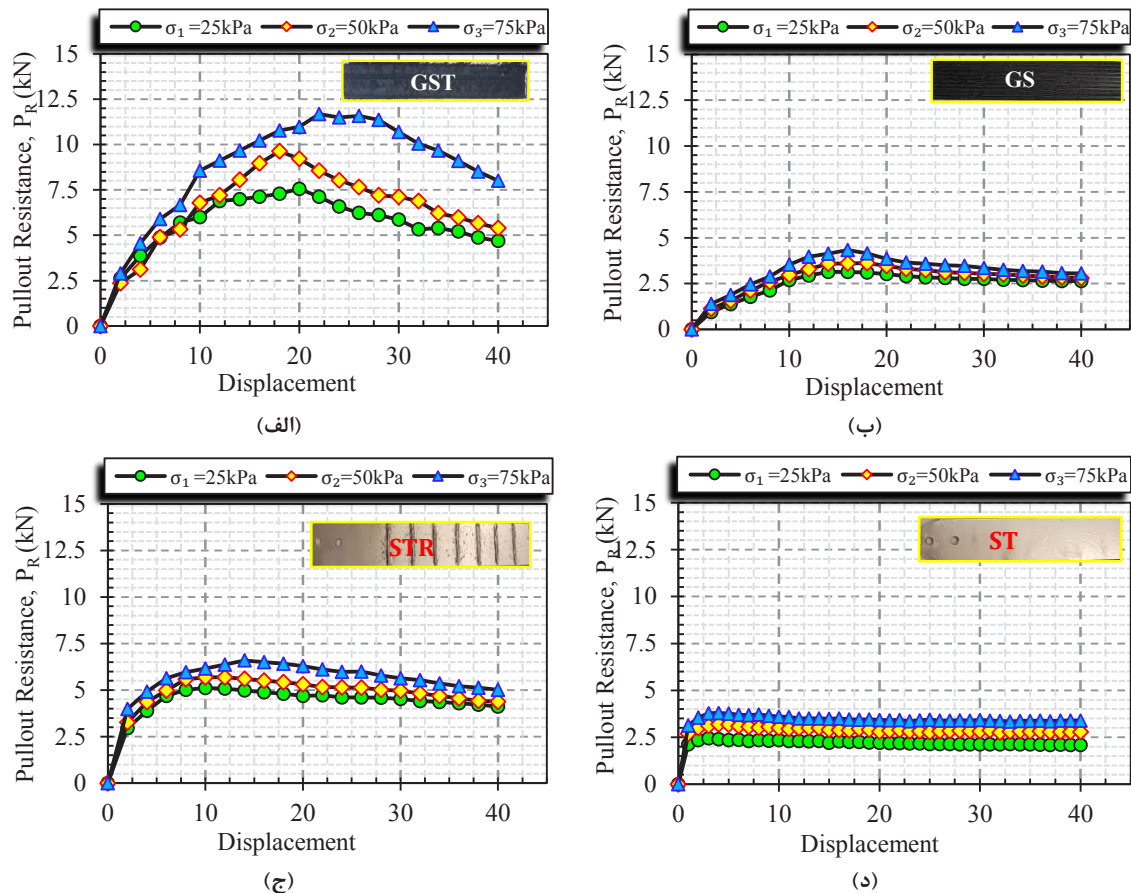
به منظور حداقل رساندن اثرات اصطکاک دیواره جلویی از دو غلاف<sup>۲</sup> به عرض ۲۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر در بالا و پائین گیره بر اساس استاندارد ASTM D۶۷۰۶ استفاده شده است.

استاندارد ASTM D۶۷۰۶ پیشنهاد می‌کند در صورتی که فاصله حداقلی ۱۵۰ میلی‌متر از طرفین بین مسلح کننده و دیواره‌ها حفظ گردد میتوان از اثرات مربوط به اصطکاک جداره‌ها صرف نظر کرد. در این مقاله با توجه به اینکه مسلح کننده پیشنهادی از نوع سیستم نواری است و حداقل فاصله‌های مذکور ارضا می‌گردد، لذا از اتخاذ روش‌هایی به منظور به حداقل رساندن اصطکاک صرفه نظر گردیده است.

یکی از نکات حائز اهمیتی که باید در انجام آزمایش بیرون کشش به آن توجه شود، نحوه‌ی اعمال فشار سربار است. معمولاً روش‌های مختلفی برای انجام این مهم استفاده می‌شود. یکی از روش‌های بارگذاری استفاده از جک هیدرولیکی در بالای نمونه‌ی خاکی است که دلیل اعمال نیرو در مرکز یک صفحه‌ی فولادی توزیع تنش کاملاً یکنواختی در خاک حاصل نمی‌شود. از جمله روش‌هایی که باعث ایجاد توزیع تنش یکنواخت می‌شوند می‌توان به استفاده از فشار هوا و سیال اشاره کرد. در این مقاله از سیستم فشار هوا، از طریق کیسه هوا به منظور اعمال فشار سربار استفاده شده است. کیسه‌ی هوا در بالاترین تراز نمونه‌ی خاکی قرار گرفته و اتصالات مربوط به ورود هوا به آن وصل می‌شوند. از طریق یک کمپرسور هوا با ظرفیت مناسب هوا به داخل کیسه وارد شده و کیسه شروع به افزایش حجم می‌کند، با توجه به اینکه فضای بسیار کمی بین کیسه و در وجود دارد، بعد از رسیدن کیسه به در جعبه، افزایش فشار ناشی از هوا را با تماس در و جعبه به خاک منتقل می‌کند. البته لازم به ذکر است برای عدم تغییر شکل در جعبه، از در با صفحه‌ی فولادی با ضخامت بالا و همچنین

- 1 LVDT
- 2 Sleeve
- 3 Clamp

4 Relative Density ( $D_r$ )



شکل ۷. مقاومت بیرون کشیدگی در مقابل جابجایی برای مسلح کننده‌های مختلف الف) نوار لاستیکی ب) نوار ژئوسینتتیکی ج) نوار فولادی آجدار د) نوار فولادی

Fig. 7. Pullout resistance versus displacement for different strips a) GST b) GS c) STR d) ST

و مقدار مقاومت بیرون کشیدگی گیره با استفاده از آزمایش حاصل می‌شود و در گام بعد مسلح کننده به گیره اضافه شده و مقدار مقاومت بیرون کشیدگی بدست می‌آید. مقاومت خالص بیرون کشیدگی برای هر مسلح کننده از اختلاف بین مقاومت بیرون کشیدگی گیره - مسلح کننده با گیره حاصل می‌شود. شکل ۷ نتایج آزمایش‌های بیرون کشیدگی را برای سه نوع مختلف مسلح کننده مرسوم و نوار لاستیک فرسوده با عرض ۷۰ و طول ۸۵۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد. برای تمامی مسلح کننده‌ها مقاومت بیرون کشیدگی با افزایش جابجایی زیاد شده تا مقدار ماکزیمم نیروی بیرون کشیدگی<sup>۲</sup> حاصل شود و با افزایش سربار مقاومت افزایش یافته است. دلیل رسیدن به مقدار بیشینه، غلبه بر نیروی قفل‌شدگی بین دانه های ماسه ی متراکم بوده‌است. همچنین بیشتر مقاومت بیرون کشیدگی به دلیل عدم وجود اعضای عرضی، ناشی از مقاومت اصطکاکی بین سطوح مختلف مسلح کننده با خاک بوده‌است (شکل ۷).

با ادامه‌ی آزمایش مقدار نیروی بیرون کشیدگی به دلیل گسیختگی خاک در باند برشی کاهش یافته است. در میان مسلح

بالایی جعبه آزمایش نیز در ۴ لایه مطابق نیمه پایینی جعبه آزمایش کوبیده و متراکم گردیده و کیسه هوا بر سطح بالای خاک کوبیده شده، قرار داده می‌شود. برای حصول اطمینان از تراکم یکنواخت در لایه‌های مختلف از قوطی‌های با وزن مشخص استفاده شده‌است. بعد از نمونه سازی کامل قوطی‌ها با احتیاط بیرون آورده و وزن می‌شوند. برای حصول اطمینان کامل این کار چندین بار تکرار شده‌است. مقدار تراکم داخل جعبه.  $\gamma_{dmax} (0.95 \pm 0.44\%)$  بوده، که به تراکم یکنواختی با روش مذکور در لایه‌ها مختلف دست پیدا شده‌است.

#### ۴- تحلیل نتایج

##### ۱-۵- مقاومت بیرون کشیدگی انواع مسلح کننده‌ها

به منظور ارزیابی عملکرد ژئو اسکرپ تاپر با اعضای عرضی افقی سه نوار مرسوم فولادی، فولادی آجدار و ژئوسینتتیکی با شرایطی دقیقاً مشابه نوار لاستیکی تحت آزمایش بیرون کشش قرار گرفتند. بدین منظور با توجه به اینکه سیستم طراحی شده از نوع گیره<sup>۱</sup> داخلی است، ابتدا گیره بدون مسلح کننده در خاک قرار گرفته

بصورت زیر تعریف می‌گردد:

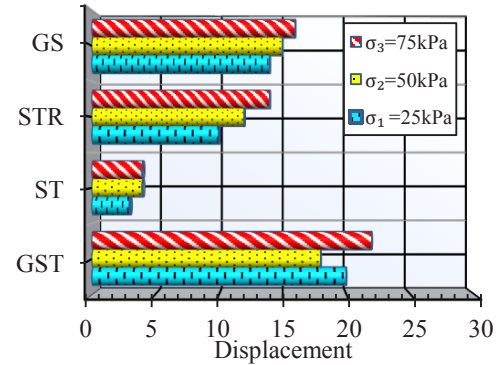
$$PRR_D = \frac{\text{Pullout resistance of GST}}{\text{Pullout resistance of other reinforcement}} \quad (1)$$

شکل ۹ مقادیر مربوط به  $PRR_D$  را برای مسلح کننده‌های مختلف را نشان می‌دهد. با افزایش سربار برای نوارهای ژئوسینتتیکی و فولادی آجدار،  $PRR_D$  افزایش می‌یابد و برای نوار فولادی تقریباً ثابت است. نوار لاستیکی مقاومت بیرون کشیدگی را در مقایسه با نوار ژئوسینتتیکی و نوار فولادی بیش از ۱۶۰ و ۲۱۰ درصد افزایش می‌دهد (برای تنش ۲۵ کیلوپاسکال نوار لاستیکی مقاومت بیرون کشیدگی را نسبت به نوار ژئوسینتتیکی و نوار فولادی ۱۴۰ و ۲۲۰ درصد افزایش داده، مقدار افزایش برای تنش ۵۰ کیلوپاسکال ۱۶۸ و ۲۰۸ درصد بوده است. به ازای تنش ۷۵ کیلوپاسکال مقاومت بیرون کشیدگی را ۱۸۲ و ۲۰۷ درصد افزایش داده است). این نتیجه ناشی از پارامترهای هندسی نوار لاستیکی نسبت به سایر مسلح کننده ها و همچنین اتساع خاک در سربارهای مختلف بوده است [۳۷]. در سربارهای کم توانایی خاک برای اتساع افزایش یافته و ضخامت بیشتر نوار لاستیکی نسبت به سایر المان‌های تسلیح (ضخامت نوار لاستیکی حدود ۵ برابر سایر مسلح کننده بوده است) باعث شده است که خاک اتساع یافته در مجاورت نوار لاستیکی اصطکاک بیشتری داشته باشد و به تبع آن مکانیزم اندرکنش سه بعدی رخ دهد [۴۴]. در نتیجه مقاومت بیرون کشیدگی افزایش یافته است. بنابراین می‌توان با استفاده از نوار لاستیکی مقاومت بیرون کشیدگی را تقریباً ۲/۶، ۳/۱ و ۱/۶۹ برابر نوار ژئوسینتتیکی، نوار فولادی و نوار فولادی آجدار افزایش داد. یکی از مشکلاتی که در اجرای دیوارهای خاکی مسلح در فضای شهری وجود دارد عدم وجود فضای کافی برای تامین طول مورد نیاز مسلح کننده است. با توجه به نتایج آزمایشگاهی، نوار لاستیکی طول کمتری را در مقایسه با سایر مسلح کننده‌ها دیگر نیاز دارد و این مهم می‌تواند ارائه راهکاری برای عدم تامین طول مسلح کننده در فضاهای شهری باشد.

بیشتر مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده‌های به شکل نواری ناشی از مقاومت برشی و یا به عبارتی اصطکاک بین خاک و مسلح کننده است. لذا مقایسه مقاومت برشی مسلح کننده‌های مختلف کمک به سزایی به ارزیابی مسلح کننده ی پیشنهادی می‌کنند. در این راستا مقاومت برشی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و معادله ی ۲ محاسبه می‌شود:

$$P_f = 2L_e w \tau \quad (2)$$

که در آن  $P_f$  نیروی بیرون کشیدگی،  $L_e$  طول کل مسلح کننده‌ی محصور شده با خاک،  $w$  عرض مسلح کننده و  $\tau$  مقاومت



شکل ۸. جابجایی مورد نیاز برای رسیدن به حداکثر مقاومت بیرون کشیدگی

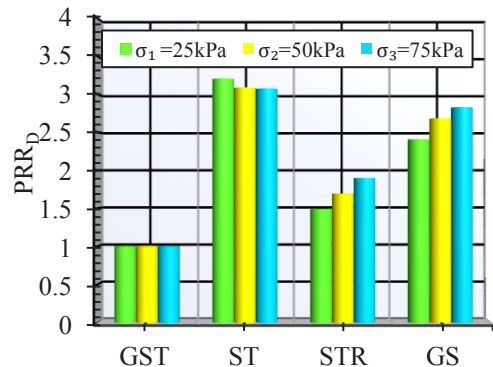
Fig. 8. Required displacement for reach peak force

کننده‌های مورد آزمایش بیشترین مقدار مقاومت بیرون کشیدگی توسط نوار لاستیک فرسوده پیشنهادی کسب شده است.

مقدار جابجایی لازم برای رسیدن به حداکثر مقاومت بیرون کشیدگی برای مسلح کننده‌های مختلف متفاوت بوده است و در نوار لاستیکی نسبت به سایر مسلح کننده‌ها جابجایی بیشتری برای بسیج‌شدگی کامل نیرو نیاز بوده است (۱۸ تا ۲۲ میلی‌متر). نوار فولادی با توجه به اینکه سطحی کاملاً صاف داشته است در جابجایی‌های بسیار کم (۳ تا ۴ میلی‌متر) به حداکثر مقدار مقاومت بیرون کشیدگی دست یافته است (شکل ۸). افزودن آج‌های ۲ میلی‌متری به نوار فولادی افزایش مقاومت بیرون کشیدگی و به تبع آن افزایش جابجایی برای رسیدن به بیشینه‌ی مقدار را در برداشته است. نوار ژئوسینتتیکی در هر دو طرف خود، دارای برجستگی است و این برجستگی‌ها سبب بسیج‌شدگی کامل نیرو در جابجایی بین ۱۴ تا ۱۶ میلی‌متر شده است.

به منظور مقایسه توان مسلح کننده پیشنهادی در افزایش مقاومت بیرون کشیدگی نسبت به سایر مسلح کننده‌های مرسوم، پارامتری تحت عنوان نسبت مقاومت بیرون کشیدگی ( $PRR_D$ )

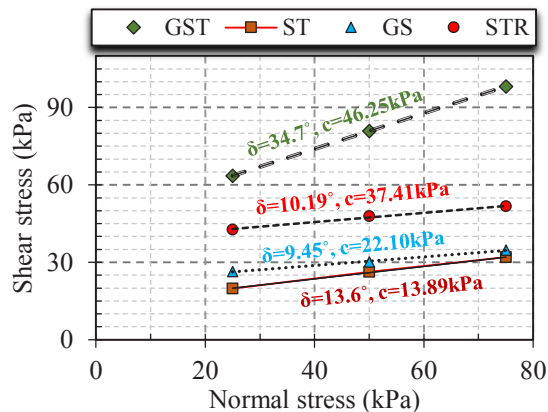
1 Pullout Resistance Ratio for Different Reinforcement



شکل ۹. نسبت  $PRR_D$  برای مسلح کننده‌های مختلف

Fig. 9. Pullout resistance ratio (PRR\_D) for different strips

با سایر عناصر تسلیح است. لذا برای محاسبه ی ضریب اندرکنش در گام اول نیاز به انجام آزمایش برش مستقیم است. لازم به ذکر است سیستم طراحی شده بدین منظور قابلیت انجام برش مستقیم در مقیاس بزرگ را دارد. نتایج مربوط به مقاومت برشی مسلح کننده های مختلف با استفاده از آزمایش بیرون کشش و معادله ۲ قابل محاسبه است. نسبت ضریب اندرکنش مقاومت بیرون کشیدگی برای نوار فولادی آجدار، نوار ژئوسینتتیک و نوار فولادی به ترتیب ۱/۷، ۲/۶ و ۳/۱ است. نتایج مذکور بیان می کند که به هنگام استفاده از المان تسلیح پیشنهادی ژئو اسکرپ تایر در مقایسه با نوار فولادی آجدار، نوار ژئوسینتتیک و نوار فولادی اندرکنش بین خاک و مسلح کننده به میزان ۷۰، ۱۶۰ و ۲۱۰ درصد افزایش یافته است



شکل ۱۰. پارامترهای مقاومت برشی مسلح کننده های مختلف

Fig. 10. Shear stress versus normal stress for different strips

### ۱-۶. مقاومت بیرون کشیدگی ژئو اسکرپ تایر (GST) بایک

#### عضو عرضی افقی (n=1)

یکی از پارامترهای بسیار مهمی که نقش اساسی در مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده بازی می کند، اعضای عرضی و به تبع آن مقاومت غیر فعال<sup>۲</sup> است. لذا در این راستا در این مقاله به منظور استفاده از قسمت های مختلف لاستیک فرسوده و همچنین افزایش مقاومت بیرون کشیدگی از کناره های لاستیک به عنوان اعضای عرضی به صورت افقی استفاده شده است. فاصله ی اولین عضو عرضی از گیره ۱۷۰ میلی متر، ارتفاع و عرض اعضای عرضی ۲۰ و ۷۰ میلی متر بوده است. شکل ۱۰ نتایج آزمایش های بیرون کشیدگی را برای نوار لاستیکی (GST) و نوار لاستیکی با یک عضو عرضی (GST<sub>1</sub>) را در مقابل جابجایی نشان می دهد. برای نوار لاستیکی و نوار لاستیکی با یک عضو عرضی افزایش مقاومت بیرون کشیدگی تا رسیدن به مقدار بیشینه زیاد بوده و بعد از بیشینه به تدریج کاهش یافته است. دلیل این امر اثر قفل شدگی دانه های خاک ماسه ای متراکم و گسیختگی در باند برشی (رفتار نرم شوندگی کرنش) بوده است. افزودن یک عضو عرضی افزایش مقاومت بیرون کشیدگی را در برداشته است و مقدار این افزایش در تنش های سربار بالا بیشتر بوده است. به عبارتی افزودن یک عضو عرضی رفتار بیرون کشیدگی مسلح کننده را از اصطکاکی به اصطکاکی - برابر تغییر داده است. برای سربارهای مختلف ماکزیمم مقاومت بیرون کشیدگی در جابجایی های ۱۸ تا ۲۴ میلی متر رخ داده است. افزودن یک عضو عرضی باعث شده تا بیشینه مقدار نیروی بیرون کشیدگی در جابجایی بیشتری نسبت به نوار لاستیک فرسوده اتفاق بیافتد.

پیش بینی مقاومت غیر فعال اعضای عرضی یکی از موضوع های مورد علاقه ی محققین مختلف بوده است. معادلات تئوری و

برشی است. شکل ۱۰ تنش برشی المان های تسلیح مختلف را به ازای تنشهای قائم ۲۵، ۵۰ و ۷۵ کیلو پاسکال را نشان می دهد. در میان مسلح کننده های مختلف نوار لاستیکی بیشترین زاویه اصطکاک را به خود اختصاص داده است. نسبت مقاومت برشی بین خاک و مسلح کننده های مختلف با استفاده از آزمایش های برش مستقیم و بیرون کشیدگی ضریب اندرکنش (f) نامیده شده و با استفاده از معادله ی زیر محاسبه می شود:

$$f = \frac{(\sigma'_v \tan \delta_a + c_a)}{(\sigma'_v \tan \phi + c)} \quad (3)$$

$\delta_a$  و  $c_a$ . زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی بین خاک و مسلح کننده.

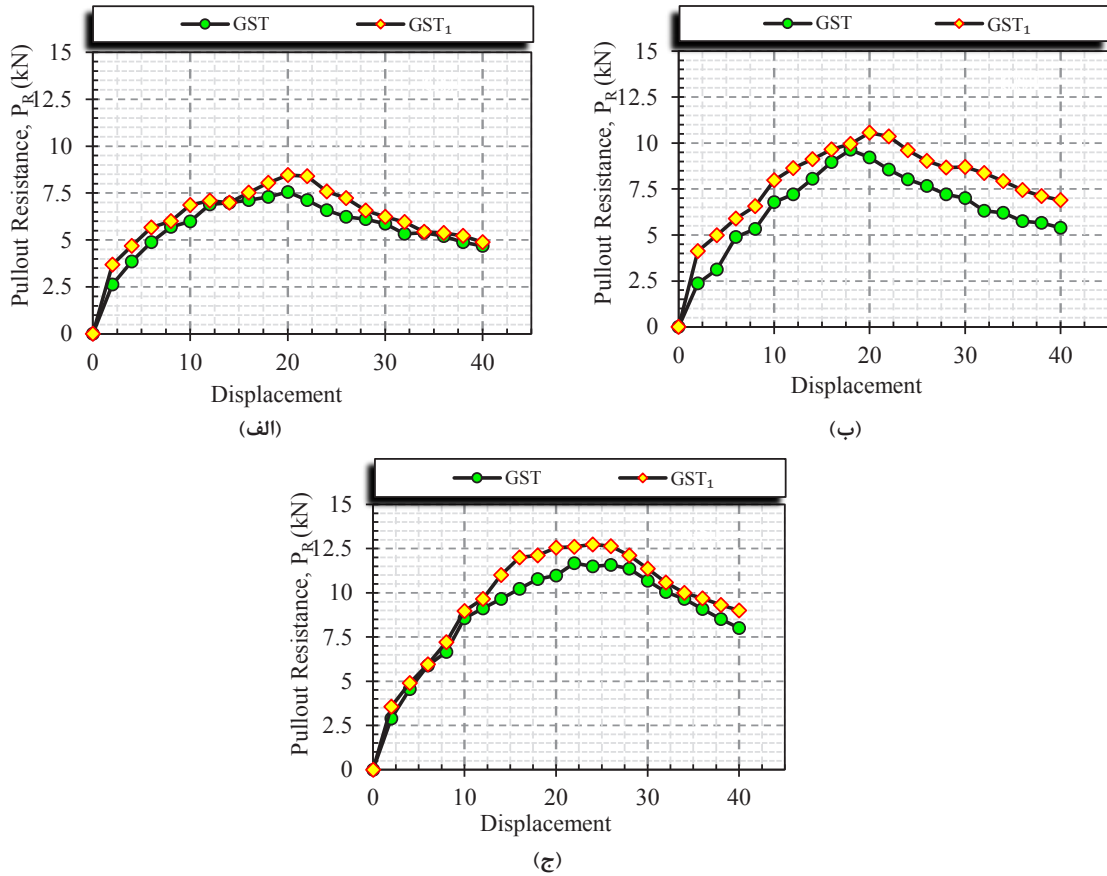
$\phi$  and  $c$  زاویه اصطکاک و چسبندگی خاک.

به منظور ارزیابی اندرکنش ک و نوار لاستیکی در مقایسه با سه مسلح کننده ی متداول، نسبت ضریب اندرکنش مقاومت بیرون کشیدگی<sup>۱</sup> به شکل زیر تعریف شده است:

$$ICR_p = \frac{f_{GST}}{f_{DS}} \quad (4)$$

که در آن  $f_{GST}$ . ضریب اندرکنش نوار لاستیکی و  $f_{DS}$ . ضریب اندرکنش سایر مسلح کننده ها است.

نسبت ضریب اندرکنش مقاومت بیرون کشیدگی به منظور ارزیابی و مقایسه ی اندرکنش مسلح کننده ی پیشنهادی در مقایسه



شکل ۱۱. نتایج آزمایش‌های بیرون کشش (الف) تنش نرمال ۲۵ kPa (ب) تنش نرمال ۵۰ kPa (ج) تنش نرمال ۷۵ kPa

Fig. 11. Pullout test results for GST and GST1 a) 25 kPa b) 50 kPa c) 75 kPa

که در آن  $\varphi$  زاویه اصطکاک داخلی خاک،  $\beta$  زاویه صفحه‌ی گسیختگی و  $K$  ضریب فشار جانبی خاک است. تحقیقات محققین مختلف مقدار  $\beta$  و  $k$  را  $\frac{\pi}{2}$  و پیشنهاد می‌کنند [۴۲، ۴۳، ۴۵].

شکل ۱۲ مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و تئوری ماکزیمم مقدار مقاومت غیرفعال به ازای تنش‌های سربار مختلف برای نوار لاستیکی با یک عضو عرضی را نشان می‌دهد. در تنش‌های سربار کم، مقاومت بیرون کشیدگی غیرفعال به ماکزیمم برش پانچ اصلاح شده نزدیکتر بوده‌است. به ازای سربارهای بیشتر (۵۰ و ۷۵ کیلوپاسکال) مقادیر پیش‌بینی شده توسط پانچ برش پانچ مطابقت خوبی با نتایج آزمایش‌های بیرون کشش داشته است.

$$N_q = \exp \left[ \left( \frac{\pi}{2} + \varphi \right) \tan \varphi \right] \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \quad \text{مکانیزم برش پانچ (۷)}$$

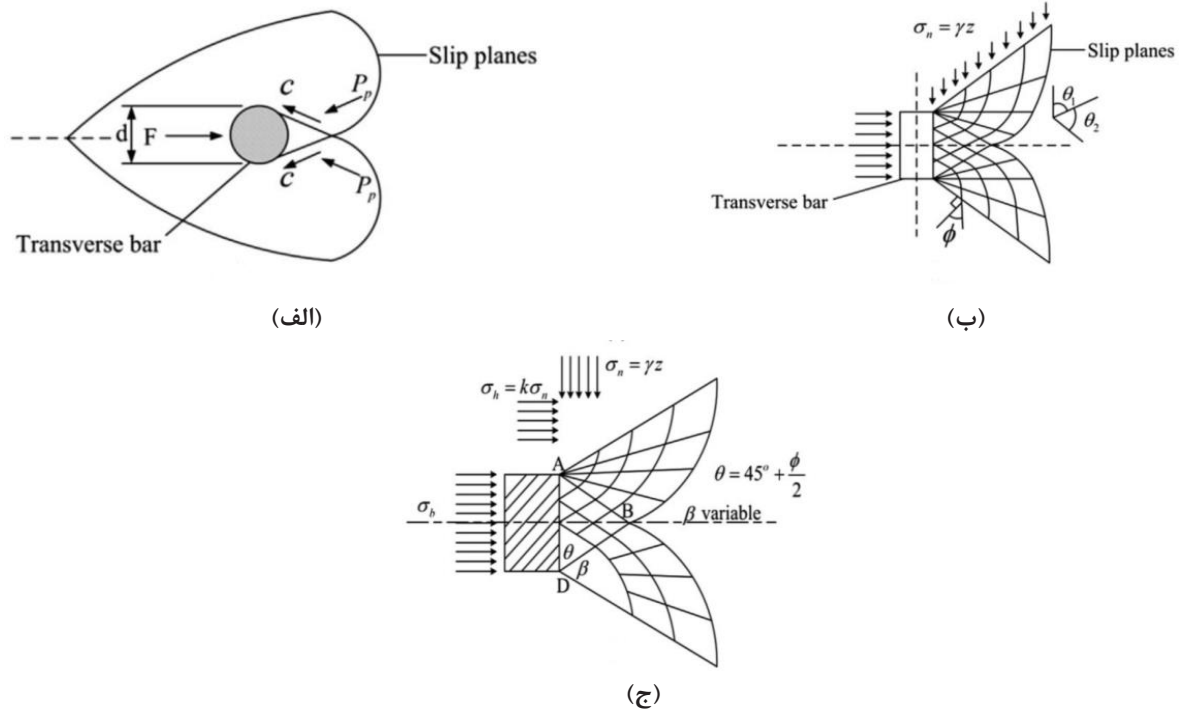
$$N_q = \left[ \frac{1+k}{2} + \frac{1-k}{2} \sin(2\beta - \varphi) \right] \frac{1}{\cos \varphi} \exp [2\beta \tan \varphi] \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \quad \text{مکانیزم پانچ اصلاح شده (۸)}$$

مکانیزم‌های گسیختگی متعددی در این ارتباط ارائه شده‌است که می‌توان از مهم‌ترین آن‌ها به مکانیزم‌های زیر اشاره کرد: مکانیزم گسیختگی برش کلی [۴۰] (شکل ۱۱. الف) مکانیزم برش پانچ [۳] (شکل ۱۱. ب) مکانیزم برش پانچ اصلاح شده [۴۱] (شکل ۱۱. ج) تعیین مقاومت غیرفعال (پسیو) اعضای عرضی ( $\sigma_b$ ) شبیه مسائل مربوط به تعیین ظرفیت باربری بوده و با استفاده از معادله ی ۵ قابل ارزیابی است:

$$\sigma_{b \max} = cN_c + \sigma_v N_q \quad (۵)$$

که در آن  $N_c$  و  $N_q$  ضرایب ظرفیت باربری و  $\sigma_v$  تنش قائم است. ضریب بی بعد  $N_q$  با توجه به مکانیزم گسیختگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک از معادلات زیر قابل محاسبه است:

$$N_q = \exp [\pi \tan \varphi] \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \quad \text{مکانیزم گسیختگی برش کلی (۶)}$$



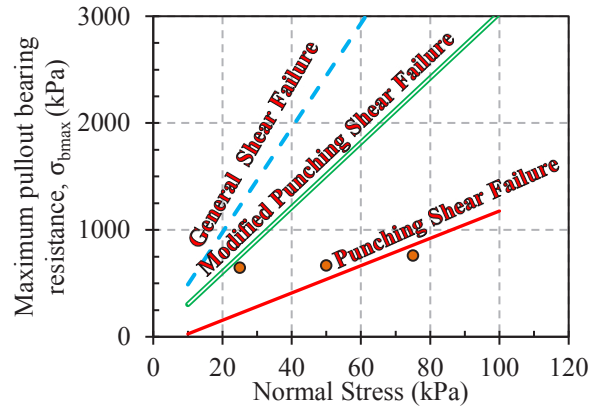
شکل ۱۲. مکانیزم‌های مختلف گسیختگی اعضای باربر الف) گسیختگی برش کلی [۴۰] ب) برش پانچ [۳] ج) مکانیزم برش پانچ اصلاح شده [۴۱]  
**Fig. 12. A different mechanism of bearing failure a) General shear failure mode [40] b) Punching shear failure mode [3] c) Modified punching failure mode [41]**

فاصله‌ی اولین عضو عرضی از گیره ۱۷۰ میلی‌متر بوده که در تمامی آزمایشها این مقدار ثابت است. الگوی رفتاری نوار لاستیکی و نوار لاستیکی با اعضای عرضی مختلف مشابه است با افزایش جابجایی مقدار نیرو تا رسیدن به بیشینه افزایش یافته و بعد مقدار بیشینه به تدریج کاهش می‌یابد. برای نوار لاستیکی با ۱ تا ۲ عضو عرضی بیشترین مقدار افزایش نیرو نسبت به نوار لاستیکی در سربار ۲۵ کیلوپاسکال اتفاق افتاده است (۳۳/۰۹ و ۴۴/۰۴ درصد). در میان اعضای عرضی مختلف (۱ تا ۵) به ازای تمامی سربارها افزودن سه عضو عرضی بیشترین مقدار مقاومت بیرون کشیدگی را در برداشته است و مقدار این افزایش نسبت به نوار لاستیکی به ازای سربارهای ۲۵،۵۰ و ۷۵ کیلوپاسکال ۹۲/۴، ۹۰/۱ و ۹۸/۵ درصد بوده‌است. برای اعضای عرضی بیش از ۳ علیرغم افزایش تعداد اعضای عرضی مقاومت بیرون کشیدگی کاهش یافته است و دلیل این امر تداخل اعضای عرضی و ایجاد شدن ناحیه نرم شوندگی در جلوی اعضا بوده‌است (شکل ۱۴).

برگادو و همکاران در سال ۱۹۹۶ به منظور ارزیابی اثر تداخل اعضای عرضی متناسب با مقدار فاصله‌ی بین آنها، پارامتر بی بعد فاصله به عرض اعضا را پیشنهاد دادند [۴۱]. در این مقاله تداخل اعضای عرضی متناسب با عرض اعضا در مقدار مقاومت بیرون کشیدگی ژئو اسکرپ تایر (GST) با

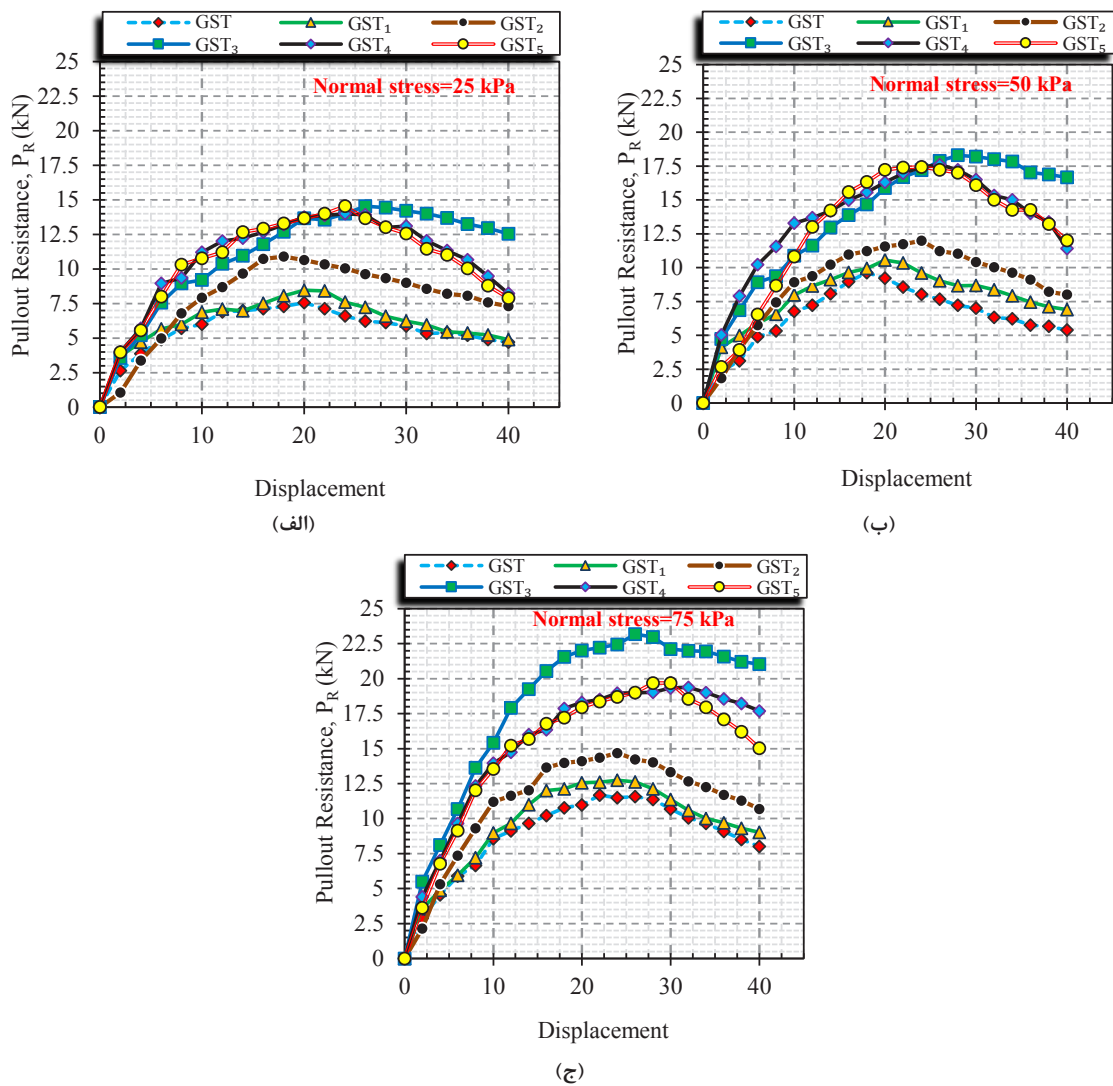
#### ۴-۱- مقاومت بیرون کشیدگی ژئو اسکرپ تایر (GST) با اعضای عرضی مختلف ( $n > 1$ )

یکی از راه‌های افزایش مقاومت بیرون کشیدگی افزایش طول مسلح کننده است. اما نکته‌ی حائز اهمیت این است که امروزه دیوارهای خاک مسلح زیادی در مناطق شهری ساخته می‌شوند و به دلیل محدودیت فضا امکان افزایش طول وجود ندارد. بنابراین عدم تامین طول و به تبع آن ضریب اطمینان در مقابل بیرون کشیدگی مهندسی را در طراحی دیوارهای خاک مسلح دچار مشکل می‌کند. لذا افزایش مقاومت بیرون کشیدگی با افزودن اعضای عرضی می‌تواند راهکاری مناسب برای حل این مشکل باشد. در این راستا در این مقاله با استفاده از لاستیک فرسوده به عنوان اعضای عرضی بر روی المان تسلیح ژئو اسکرپ تایر در صدد افزایش مقاومت بیرون کشیدگی گام برداشته شده‌است. تلاش‌های محققین مختلف نشان می‌دهد افزایش مقاومت بیرون کشیدگی ناشی از افزودن اعضای عرضی وابستگی زیادی به مقدار فاصله‌ی بین اعضای عرضی متفاوت دارد [۴، ۴۱، ۴۵]. در این راستا به منظور یافتن فاصله بهینه بین اعضای عرضی، فاصله‌ی مرکز تا مرکز اعضای عرضی تغییر کرده و سپس مورد آزمایش قرار داده شده‌است. شکل ۱۳ نتایج آزمایش‌های بیرون کشیدگی را برای نوار لاستیکی و نوار لاستیکی با اعضای عرضی مختلف را نشان می‌دهد.



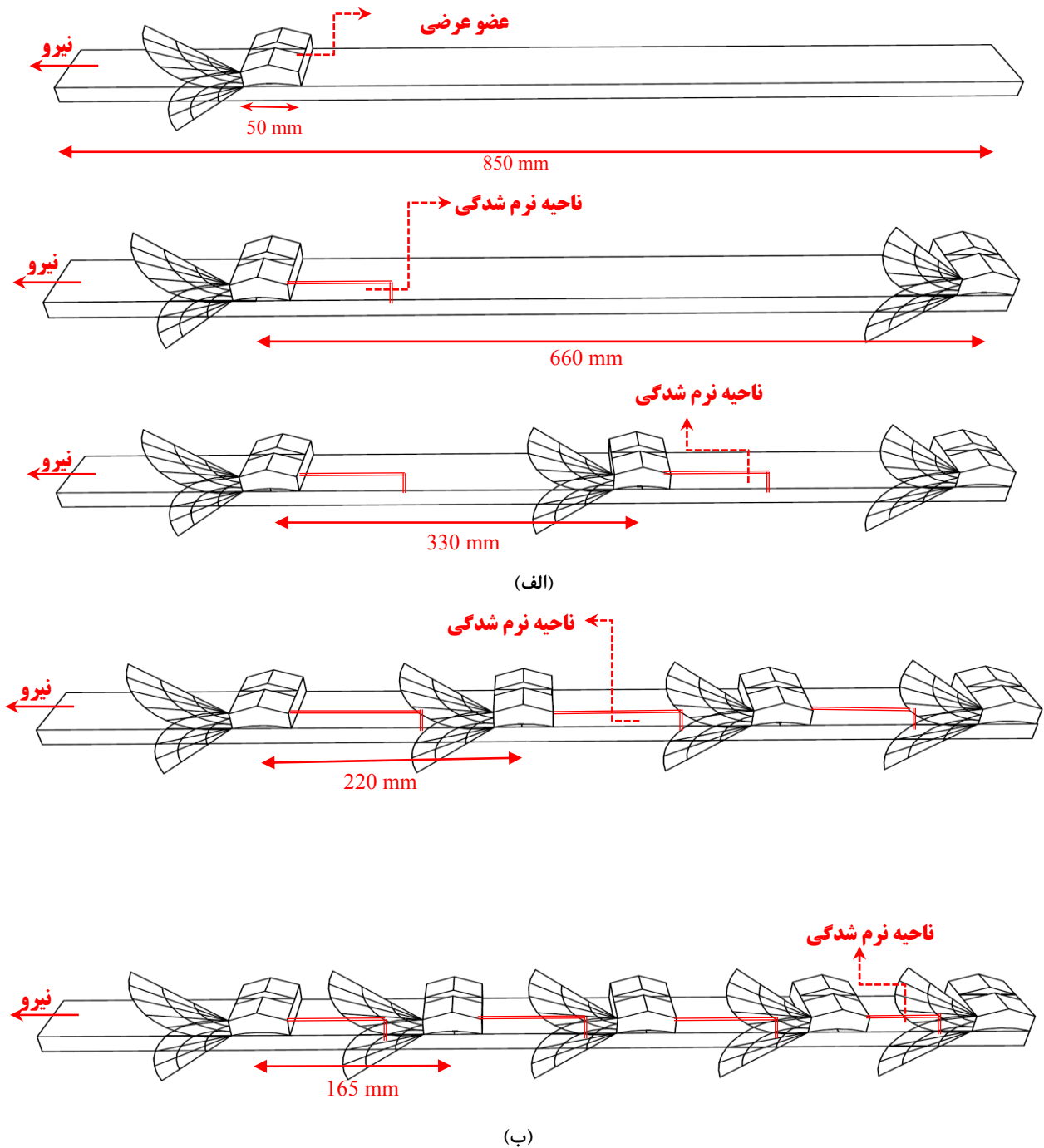
شکل ۱۳. پیشینه ی مقاومت بیرون کشیدگی غیرفعال در تنش های سربار مختلف برای نوار لاستیکی با یک عضو عرضی

Fig. 13. Maximum pullout bearing resistance versus different normal stresses for GST with a single transverse member



شکل ۱۴. مقاومت بیرون کشیدگی در مقابل جابجایی برای اعضای عرضی مختلف (الف) تنش نرمال ۲۵ kPa (ب) تنش نرمال ۵۰ kPa (ج) تنش نرمال ۷۵ kPa

Fig. 14. Pullout resistance versus displacement for different transverse members a) 25 kPa b) 50 kPa c) 75 kPa



شکل ۱۵. مکانیزم‌های گسیختگی مختلف (الف) انفرادی (ب) تداخلی

Fig. 15. The failure mechanism of transverse members a) Individual b) interference

از  $4/7$  مقاومت بیرون کشیدگی افزایش یافته و بیشترین مقدار در نسبت  $4/7$  حاصل شده است.

برای مقادیر  $S/B$  بیش از  $4/7$  مکانیزم گسیختگی انفرادی رخ داده است (شکل ۱۴.الف). با کاهش نسبت  $S/B$  (مقادیر  $3/14$  و  $2/36$ ) به نظر می‌رسد مکانیزم تداخلی اتفاق افتاده است و ناحیه نرم شدگی در پشت اعضای عرضی و به تبع در جلوی سایر اعضا باعث عدم بسیج

کشیدگی سنجیده شده است. محققین مختلف مکانیزم‌های مختلفی را برای گسیختگی خاک در جلوی اعضای عرضی پیشنهاد داده اند. از جمله مهمترین مکانیزم‌های گسیختگی می‌توان به مکانیزم گسیختگی بلوکی، تداخلی و انفرادی اشاره کرد [۴۲، ۴۳، ۴۶].

شکل ۱۵ مقاومت بیرون کشیدگی به ازای نسبت‌های مختلف فاصله به عرض اعضا ( $S/B$ ) را تشریح می‌کند. برای مقادیر  $S/B$  بیش



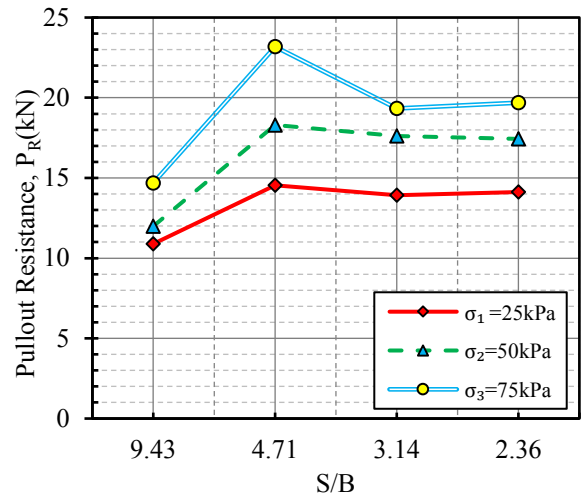
بیرون کشیدگی را در مقایسه با نوار فولادی و ژئوسینتیکی بیش از ۲۰۰ و ۱۵۰ درصد افزایش داده است.

بیشینه ی تنش غیرفعال اندازه گیری شده با یک عضو عرضی  $(\sigma_{bmax})$  در سربارهای کم به نتایج تئوری مکانیزم برش پانچ اصلاح شده نزدیکتر بوده است. به ازای سربارهای بیشتر (۵۰ و ۷۵ کیلوپاسکال) مقادیر پیش بینی شده توسط برش پانچ مطابقت خوبی با نتایج آزمایش های بیرون کشش داشته است.

یکی از بهترین گزینه ها برای افزایش مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده ها، افزایش تعداد اعضای عرضی است. در میان اعضای عرضی متفاوت بیشترین افزایش مقاومت بیرون کشیدگی در تمامی سربارها برای سه عضو عرضی حاصل شده است و مقدار این افزایش نسبت به نوار لاستیکی در تنش های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ کیلو پاسکال به ترتیب ۹۲، ۹۰ و ۹۸ درصد بوده است. در حالت کلی المان تسلیح ژئو اسکرپ تایر با سه عضو عرضی مقدار مقاومت بیرون کشیدگی را نسبت به نوار فولادی و ژئوسینتیکی بیش از ۴۹۰ و ۳۹۰ درصد افزایش داده است. این نتیجه بیان می کند که به هنگام استفاده از المان پیشنهادی به جای نوار فولادی و ژئوسینتیکی حداقل به میزان ۸۰ درصد از طول کل کمتری نیاز است. لذا با بهره گرفتن از این سیستم می توان مهندسی ژئوتکنیک را به سمت طراحی های دقیق تر و اقتصادی تر سوق داد.

## ۶- منابع

- [1] Design of Retaining Walls, Management and Planning Organization (in Persian), (2005).
- [2] D.T. Bergado, R. Shivashankar, M.C. Alfaro, j.-c. chai, S. Balasubramaniam, Interaction Behaviour of Steel Grid Reinforcements in A Clayey Sand, Geotechnique, 43(4) (1993) 589-603.
- [3] R. Jewell, G. Milligan, D. Dubois, Interaction Between Soil and Geogrids, in: Polymer grid reinforcement, Thomas Telford Publishing, 1984, pp. 18-30.
- [4] E. Palmeria, G. Milligan, Scale and Other Factors Affecting the Results Of Pull-Out Tests of Grids Buried in Sand, Geotechnique, 39(3) (1989) 511-542.
- [5] D.T. Bergado, J.C. Chai, H.O. Abiera, M.C. Alfaro, A.S. Balasubramaniam, Interaction Between Cohesive-Frictional soil and various grid reinforcements, Geotextiles and Geomembranes,



شکل ۱۶. مقاومت بیرون کشیدگی به ازای مقادیر مختلف S/B  
Fig. 16. Pullout resistance versus a different ratio of S/B

شدگی نیرو و در نتیجه کاهش مقاومت بیرون کشیدگی را به دنبال داشته است (شکل ۱۴ ب).

## ۵- نتیجه گیری

مقاله حاضر امکان پذیری استفاده از لاستیک فرسوده با اعضای عرضی افقی به عنوان المان تسلیح در دیوارهای خاک مسلح را با استفاده آزمایش های بزرگ مقیاس بیرون کشش مورد ارزیابی قرار داده است. مقاومت بیرون کشیدگی المان تسلیح پیشنهادی با و بدون اعضای عرضی که از کناره ی آجدار لاستیک ساخته شده در سربارهای قائم مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و با مسلح کننده مرسوم نوار فولادی، نوار ژئوسینتیکی و نوار فولادی آجدار مقایسه شده است. اعتبارسنجی نتایج آزمایشگاهی با مقادیر تئوری نیز صورت پذیرفته است. نتایج نشان می دهند که:

آزمایش های بزرگ مقیاس بیرون کشش نشان می دهند که نیروی بیرون کشیدگی المان تسلیح ژئو اسکرپ تایر (نوار لاستیکی GST) سریعاً با افزایش جابجایی، تا رسیدن به مقدار بیشینه ی خود افزایش یافته است و با ادامه آزمایش بعد از بیشینه با افزایش جابجایی مقدار نیروی بیرون کشیدگی کاهش یافته است. این رفتار ناشی از قفل شدگی بین ذرات خاک متراکم و همچنین گسیختگی خاک در باند برشی (رفتار نرم شوندگی کرنش) بوده است. در سایر مسلح کننده ها رفتار مشابه به نوار لاستیکی رخ داده است اما به دلیل پارامترهای ساختاری متفاوت مقدار بیشینه نیروی بیرون کشیدگی و جابجایی متناسب با آن متفاوت بوده است.

عملکرد المان تسلیح پیشنهادی نوار لاستیکی نسبت به سایر مسلح کننده های مرسوم بهتر بوده است. المان نوار لاستیکی مقاومت

- Using Multilayer Spreading Pullout Test, *Advances in Materials Science and Engineering*, (2017).
- [16] G. Cardile, D. Giofrè, N. Moraci, L. Calvarano, Modelling interference between the geogrid bearing members under pullout loading conditions, *Geotextiles and Geomembranes*, 45(3) (2017) 169-177.
- [17] C. Kayadelen, T. ÖkkeşÖnal, G. Altay, Experimental Study for Pull-out Load of Reinforced Sand Soil with Geogrid, Measurement, (2017).
- [18] A. Noorzad, E. Badakhshan, Investigations on pullout behavior of geogrid-granular trench using CANAsand constitutive model, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, (2017).
- [19] A. Hegde, R. Roy, A Comparative Numerical Study on Soil–Geosynthetic Interactions Using Large Scale Direct Shear Test and Pullout Test, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, (2018).
- [20] F. malayeri, Evaluation and study of Latest Waste Tire Recycling Technologies, *Iranian Rubber Industry Journal (in Persian)*, (2014).
- [21] D.N. Humphrey, W.L. Nickels, Effect of tire chips as lightweight fill on pavement performance, *Proc., 14th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi, India,, (1997) 1617-1620.
- [22] J. Lee, R. Salgado, A. Bernal, C. Lovell, Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 125(2) (1999) 132-141.
- [23] Y.W. Yoon, S.H. Cheon, D. Kang, Bearing capacity and settlement of tire-reinforced sands, *Geotextiles and Geomembranes* 22(5) (2004) 439- 453.
- [24] S. Youwai, D.T. Bergado, Numerical analysis reinforced wall using rubber tire chips-sand mixtures as backfill material, *Computers and Geotechnics*, (2004) 103-114.
- [25] P. Gotteland, S. Lambert, L. Balachowski, Strength characteristics of tyre chips-sand mixtures, (2005).
- [26] N. Hataf, M. Rahimi, Experimental investigation of (1993).
- [6] E.M. Palmeira, Bearing force mobilisation in pull-out tests on geogrids, *Geotextiles and Geomembranes*, 22(6) (2004), 481-509.
- [7] M.R. Abdi , S.A. Sadrnejad, M.A. Arjomand, Clay reinforcement using geogrid embedded in thin layers of sand, *International Journal of Civil Engineering*, (2009).
- [8] A. Nayeri , K. Fakharian Study on Pullout Behavior Of Uniaxial HDPE Geogrids Under Monotonic and Cyclic Loads, *International Journal of Civil Engineering*, (2009).
- [9] S.H. Lajevardi, D. Dias, J. Racinais, Analysis of soil-welded steel mesh reinforcement interface interaction by pull-out tests, *Geotextiles and Geomembranes*, (2013).
- [10] K. Sukmak, P. Sukmak, S. Horpibulsuk, J. Han, S.-L. Shen, A. Arulrajah, Effect of fine content on the pullout resistance mechanism of bearing reinforcement embedded in cohesive–frictional soils, *Geotextiles and Geomembranes*, 43(2), (2015), 107-117.
- [11] C.S. Vieira, P.M. Pereira, M. de Lurdes Lopes, Recycled construction and demolition wastes as filling material for geosynthetic reinforced structures. interface properties, *Journal of Cleaner Production*, 124, (2016), 299-311.
- [12] M. Pinho-Lopes, A.M. Paula, M.L. Lopes, Soil–geosynthetic interaction in pullout and inclined-plane shear for two geosynthetics exhumed after installation damage, *Geosynthetics International*, (2016).
- [13] H. Aldeeky, O.A. Hattamleh, B.A. Alfoul, Effect of Sand Placement Method on the Interface Friction of Sand and Geotextile, *Int. J. Civ. Eng.*, (2016).
- [14] M. Abdi, H. Mirzaeifar, Experimental and PIV evaluation of grain size and distribution on soil–geogrid interactions in pullout test, *Soils and Foundations*, 57(6) (2017) 1045-1058.
- [15] D.K. Jong-Beom Park, S. Yang and J.H. Kim, Pullout Characteristics of Geosynthetics Reinforced Earth

- [36] ASTM D6706, Standard test method for measuring geosynthetic pullout resistance in soil, in, ASTM International West Conshohocken, PA, 2013.
- [37] N. Moraci, P. Recalcati, Factors affecting the pullout behaviour of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil, *Geotextiles and Geomembranes*, 24(4) (2006) 220-242.
- [38] R.j. fanninan, D.M. raju, on the pullout resistance of geosynthetics, *Can. Geotech. J.*, (1993).
- [39] M. Khedkar, J. Mandal, Pullout behaviour of cellular reinforcements, *Geotextiles and Geomembranes*, 27(4) (2009) 262-271.
- [40] L.M. Peterson, L.R. Anderson, Pullout resistance of welded wire mesh embedded in soil, Report to the Hilfiker Company, Utah State University, (1980).
- [41] D.T. Bergado, J.C. Chai, N. Miura, Prediction of pullout resistance and pullout force-displacement relationship for inextensible grid reinforcements, *Soils and foundations*, 36(4) (1996) 11-22.
- [42] D. Bergado, R. Shivashankar, M. Alfaro, J.-C. Chai, A. Balasubramaniam, Interaction behaviour of steel grid reinforcements in a clayey sand, *Geotechnique*, 43(4) (1993) 589-603.
- [43] S. Horpibulsuk, A. Niramitkornburee, Pullout resistance of bearing reinforcement embedded in sand, *Soils and Foundations*, 50(2) (2010) 215-226.
- [44] M. Alfaro, S. Hayashi, N. Miura, K. Watanabe, Pullout interaction mechanism of geogrid strip reinforcement, *Geosynthetics international*, 2(4) (1995) 679-698.
- [45] E.M. Palmeira, Soil-geosynthetic interaction: modelling and analysis, *Geotextiles and Geomembranes*, 27(5) 368-390 (2009).
- [46] C. Suksiripattanapong, S. Horpibulsuk, A. Chinkulkijniwat, J.C. Chai, Pullout resistance of bearing reinforcement embedded in coarse-grained soils, *Geotextiles and Geomembranes*, 36 (2013) 44-54.
- bearing capacity of sand reinforced with randomly distributed tire shreds, *Construction and Building Materials*, 20(10) (2006) 910-916.
- [27] S. Akbulut, S. Arasan, E. Kalkan, Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers, *Applied Clay Science*, 38(1-2) (2007) 23-32.
- [28] A. Nakhaee, S.M. Marandi, Reducing the forces caused by earthquake on retaining walls using granulated rubber-soil mixture, *International Journal of Engineering*, 24, No. 4, (2011) 337-350.
- [29] V.K. D. Mohan, H. Kim, U. Balunaini, M. Prezzi, Pullout capacity of ladder-type metal reinforcements in tire shred-sand mixtures, *Construction and Building Materials*, 113 (2016) 544-552.
- [30] G. Gill, R.K. Mittal, Use of waste tire-chips in shallow footings subjected to eccentric loading- an experimental study, *Construction and Building Materials*, 199 (2019) 335-348.
- [31] FHWA, Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, National, (2009).
- [32] ASTM D698-07, Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)), (2007).
- [33] ASTM D5321, Standard test method for determining the coefficient of soil and geosynthetic or geosynthetic and geosynthetic friction by the direct shear method, ASTM Designation: D5321-02, ASTM, U.S.A., (2009).
- [34] ASTM D6270, Standard practice for use of scrap tires in civil engineering applications, in, American Society for Testing and Materials West Conshohocken, PA, 2012.
- [35] K. Ab-Malek, A. Stevenson, The effect of 42 year immersion in sea-water on natural rubber, *Journal of materials science*, 21(1) 147-154 (1986).

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

*M. Tajabadipour, M. Deghani, B. Kalantari, S. H. Lajevardi. Evaluation of the Performance of Geo Scrap Tire Reinforcement with Horizontal Transverse Members by Large-Scale Pullout Test, Amirkabir J. Civil Eng., 53(4) (2021): 1459-1478.*

**DOI:** [10.22060/ceej.2019.16959.6408](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16959.6408)

