

بررسی تأثیر ابعاد چشمه شبکه ژئواسکرپ بر رفتار مقاومت برشی بالاست به کمک آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس

مرتضی اسماعیلی*، استاد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
حمیدرضا حیدری، استادیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
سارا درویشی، دانشجوی کارشناسی ارشد خط و سازه‌های ریلی، دانشکده مهندسی راه‌آهن،
دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
مازیار مختاری، دانشجوی کارشناسی ارشد خط و سازه‌های ریلی، دانشکده مهندسی راه‌آهن،
دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

Email: m_esmaeili@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۳ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۰

چکیده

تسلیح بالاست به کمک ژئوگریدها یکی از روش‌هایی است که تا کنون در ادبیات فنی برای افزایش باربری و همچنین کاهش زوال بالاست، از طریق کاهش خردشدگی و نشست، مورد بررسی محققین مختلف قرار گرفته است. در این مقاله، با معرفی نوع جدیدی از ژئوگریدهای ساخته‌شده به کمک تسمه‌های لاستیک فرسوده به نام ژئواسکرپ، تأثیر آن‌ها بر رفتار برشی بالاست در آزمایش برش بزرگ‌مقیاس بررسی شده است. در این راستا و به منظور بررسی تأثیر ابعاد چشمه ژئواسکرپ بر رفتار برشی بالاست و با قرار دادن ژئواسکرپ با ابعاد چشمه‌های ۵×۵، ۱۰×۱۰ و ۲۵×۲۵ سانتی‌متر در لایه بالاست، آزمایش‌های مختلفی تحت سربارهای قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال انجام شده و نتایج در قالب منحنی تنش برشی - جابه‌جایی افقی، مقاومت برشی حداکثر، زاویه اصطکاک داخلی و زاویه اتساع ارائه شده است. جمع‌بندی نتایج نشان می‌دهد که چشمه ۵×۵ سانتی‌متر، مطلوب‌ترین شرایط را از نظر افزایش مقاومت برشی، افزایش زاویه اصطکاک داخلی و کاهش زاویه اتساع، برای بالاست فراهم کرده است، به طوری که با قرار دادن شبکه ژئواسکرپ با ابعاد چشمه ۵×۵ سانتی‌متر، مقاومت برشی، زاویه اصطکاک داخلی و زاویه اتساع به طور میانگین نسبت به حالت بالاست بدون تسلیح به ترتیب ۲۰٪ افزایش، ۷٪ افزایش و ۳۰٪ کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: ژئواسکرپ، تثبیت بالاست، مقاومت برشی، زاویه اصطکاک داخلی، زاویه اتساع.

۱. مقدمه

راه و راه آهن استفاده نمود. همچنین، در شرایط خاصی که ابعاد چشمه های شبکه ژئوگرید به اندازه کافی کوچک باشد و یا استفاده از این شبکه ها همراه با لایه های ژئوتکستایل صورت پذیرد، می توان از آن ها به عنوان لایه های زهکشی و یا فیلتر نیز استفاده نمود. در صورت استفاده از این شبکه ها در میان لایه های زیرسازی و یا روسازی، می توان از ضخامت لایه های خاکریزی و یا قشرهای روسازی کاست (ایندراراتنا و همکاران، ۲۰۰۶؛ سلیگ و واترز، ۱۹۹۴). محققین بسیاری از طریق بررسی های آزمایشگاهی به تأثیر ژئوگرید در تثبیت بالاست اشاره کرده اند. برای نمونه، ایندراراتنا و همکاران (۲۰۱۱) رفتار تنش-نشست بالاست تمیز و آلوده به زغال سنگ با ژئوگرید مسلح شده را با انجام یک سری آزمایش برش مستقیم بزرگ بررسی کردند. نتایج تحقیق آنان به این صورت بود که بیشینه تنش برشی تحمل شده نمونه مسلح شده با ژئوگرید از بالاست مسلح نشده بیشتر است که دلیل آن را می توان به قفل شدگی و چفت شدن بالاست با چشمه ژئوگرید نسبت داد. همچنین، نیمبالکار و ایندراراتنا (۲۰۱۶) با انجام آزمایش میدانی گسترده در شهر سینگلتون استرالیا به بررسی تأثیرات استفاده از ژئوستتیک ها در لایه زیربالات پرداختند و به این نتیجه رسیدند که ژئوستتیک ها نشست بالاست را تقریباً ۳۵ درصد کاهش داده اند. صادقی و همکاران (۲۰۲۰) نیز طی تحقیقی، به بررسی اثر تسلیح با ژئوگرید در بهبود رفتار مکانیکی بالاست آلوده به ماسه پرداختند. در این تحقیق، نشان داده شد که مسلح سازی با ژئوگرید سبب افزایش مقاومت برشی نسبت به حالت بدون ژئوگرید شده است. در مطالعه ای دیگر، حسینی و اسوتا (۲۰۱۹) از آزمایش های برش مستقیم در مقیاس بزرگ برای ارزیابی عملکرد بالاست و زیربالات مسلح شده با ژئوگرید و به دنبال آن آزمایش های سه محوری برای بررسی تغییر شکل و پاسخ زوال بالاست مسلح شده با ژئوگرید

گسترده خطوط ریلی بالاستی در سراسر جهان به نسبت سایر ساختارهای خطوط ریلی بیشتر بوده و این گستره در دوران حاضر در حال گسترش است. خطوط ریلی بالاستی علاوه بر مزایایی نظیر هزینه ساخت اولیه کم، مستهلک نمودن ارتعاشات، زهکشی جریان های آب وارده به خط، دارای نقائصی نظیر شکست، نشست و آلودگی بوده است که عمده دلیل آن وجود ساختار دانه ای و غیریکپارچه بالاست بوده که به علت عبور ناوگان ریلی پس از مدتی ذرات بالاست دچار نشست و شکستگی شده و در نتیجه تشدید ناپایداری خط ریلی را به دنبال داشته است (سُل سانچز و دآنجلو، ۲۰۱۷). از جمله روش هایی که می توان رفتار بالاست را کنترل کرد و زوال آن را کاهش داد، روش های اصلاح و تثبیت بالاست است که این روش ها به دو دسته مکانیکی و غیرمکانیکی طبقه بندی می شوند. روش های تثبیت غیرمکانیکی بالاست شامل روش هایی نظیر تزریق قیر و مخلوط های قیری و تزریق ملات قیر-سیمان است که در آن ها ماده ای با خواص اصلاح کننده و بهبوددهنده به مجموعه بالاست تزریق شده و رفتار مجموعه بالاست را بهبود می بخشد. در روش تزریق قیر و مخلوط های قیری، خواص قیر و آسفالت و امولسیون های قیری باعث می شوند که استفاده از آن ها به عنوان یک ماده در حمل و نقل ریلی گزینه مناسبی باشد و در جهت بهبود عملکرد لایه بالاست مؤثر واقع شود. روش های مکانیکی تثبیت بالاست شامل قرارگیری ژئوستتیک ها (مانند ژئوگریدها و ژئوسل ها) در لایه بالاست است که در این روش ها، با قرارگیری این مصالح در لایه بالاست، تثبیت بالاست و بهبود عملکرد آن حاصل می شود.

از مجموعه شبکه های ژئوگرید به علت دارا بودن مشخصات ممتاز نظیر مقاومت کششی مناسب و انعطاف پذیری قابل توجه می توان به طور مستقیم در تسلیح و جداسازی لایه های خاکریز و لایه های روسازی

سخت‌تر (سنگ آتشفشانی)، نسبت به سنگی که به‌راحتی شکسته می‌شود، باعث کاهش بیشتر سایش در بالاست شده است. در تحقیقی دیگر، اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۷) تأثیر خرده لاستیک را در بالاست آلوده شده به ماسه مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق، ۱۲ نمونه با درصد‌های مختلف ماسه و خرده لاستیک، تحت آزمایش جعبه بالاست تا ۱۰۰۰۰۰ سیکل بار، قرار گرفتند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ماسه در بالاست بدون خرده لاستیک تا ۱۰۰٪ نشست را افزایش می‌دهد. در حالی که اگر ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد خرده لاستیک به بالاست آلوده اضافه شود، نشست در این نمونه‌ها به ترتیب، ۶۸، ۹۰ و ۶۷ درصد افزایش می‌یابد. همچنین، تحقیق تجربی دیگری توسط اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۶) جهت تعیین خصوصیات دینامیک بالاست با خرده لاستیک از طریق آزمایش مودال با شیکر با استفاده از دانه‌بندی استاندارد AREMA No. 4 بدون خرده لاستیک و با ۱۱، ۲۲ و ۳۳ درصد خرده لاستیک در محفظه بارگذاری انجام شده است. طبق نتایج به‌دست آمده از این تحقیق، پس از افزودن خرده لاستیک، پاسخ دینامیک سیستم کاهش یافته و فرکانس‌های رزونانس به فرکانس‌های پایین‌تری تبدیل می‌شوند. پس از افزودن ۱۱٪ خرده لاستیک، میرایی سیستم افزایش یافته و دو برابر بالاست خالص می‌شود و سختی سیستم تا حدود نصف سختی اولیه کاهش می‌یابد. با افزودن درصد بیشتری خرده لاستیک به بالاست نیز سختی کاهش و میرایی افزایش یافته است؛ اما کاهش سختی بیشتر از افزایش میرایی بوده است. در تحقیق کاربرد نئوبالاست در خطوط ریلی، اسماعیلی و نمایی (۲۰۲۲)، به بررسی تأثیر مقاومت سنگ مادر بر زوال بالاست پوشش داده شده با لاستیک^۲ (RCB) پرداختند. با این هدف، ابتدا روش بهینه پوشش سنگ‌دانه‌های بالاست با تمرکز بر انتخاب درصد مناسب لاستیک مخلوط با چسب، توسط آزمایش لس‌آنجلس و تجزیه و

تحت بارگذاری سیکلی استفاده کردند. با بررسی نتایج، مشخص شد که زوایای اصطکاک داخلی و اتساع بالاست و زیربالاست، با افزایش تنش عمودی و نرخ سرعت بارگذاری برشی، به ترتیب از ۶۳/۲۴ به ۴۷/۸۲ درجه و از ۱۴/۵۶ به ۵/۲۳ کاهش می‌یابد. علاوه بر آن، نشان داده شد که قرار دادن ژئوگریدها موجب افزایش مقاومت برشی لایه بالاست و زیربالاست می‌شود.

در سال‌های اخیر، طبق آمارهای منتشر شده، تولید لاستیک فرسوده به طرز چشمگیری پیوسته در حال افزایش است. این حجم از تولید انبوه لاستیک خطرات جبران‌ناپذیری به دنبال دارد و دفع آن نیز به‌آسانی ممکن نیست. در سال‌های اخیر نیز محققان بسیاری به امکان سنجی استفاده از لاستیک‌های فرسوده در خطوط ریلی و به‌طور مشخص در ترکیب با مصالح بالاست پرداخته‌اند. از جمله این تحقیقات می‌توان به کاربردهای خرده لاستیک و نئو بالاست در خطوط ریلی اشاره نمود. به‌عنوان نمونه، تحقیقی توسط گو و همکاران (۲۰۱۹) انجام شده است که سه جنس مختلف بالاست (گرانیت، سنگ آتشفشانی و ماسه‌سنگ)، سه اندازه خرده لاستیک (۳ تا ۵، ۱۰ تا ۱۵ و ۲۰ تا ۲۵ میلی‌متر) و سه درصد متفاوت خرده لاستیک (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق، آزمایش LAA^۱ با اسکن لیزری برای مقایسه تأثیر اندازه و درصد خرده لاستیک بر کاهش زوال بالاست انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که نمونه با ۳۰ درصد خرده لاستیک و اندازه ۳ تا ۵ میلی‌متر، کمترین عدد LAA را دارد. اما در اندازه‌های ۱۰ تا ۱۵ میلی‌متر و ۲۰ تا ۲۵ میلی‌متر، با افزودن بیش از ۱۰ درصد خرده لاستیک، تغییر قابل توجهی مشاهده نمی‌شود. همچنین، در ترکیب بالاست با خرده لاستیک دارای اندازه ۳ تا ۵ میلی‌متر کمترین و با اندازه ۲۰ تا ۲۵ میلی‌متر بیشترین میزان سایش مشاهده شده است. به‌علاوه، افزودن خرده لاستیک با اندازه ۳ تا ۵ میلی‌متر به بالاست

²- Rubber Coated Ballast

¹-Los Angeles Abrasion Test

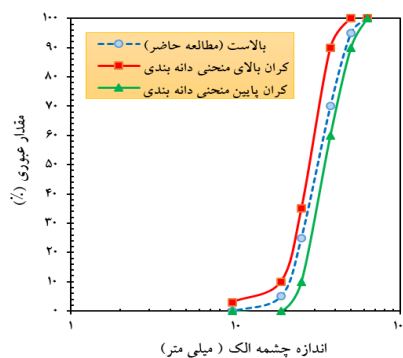
آهن نیز با توجه به گستردگی حیطه عملکردی و حجم زیاد فعالیت‌های عمرانی آن، یک منبع بالقوه عظیم برای استفاده از شکل‌های مختلف المان‌های لاستیکی تولیدی از لاستیک‌های فرسوده فراهم است. اما تا کنون در زمینه تثبیت و اصلاح بالاست با نوارهای لاستیکی پژوهشی صورت نگرفته است. لذا، در این پژوهش، تلاش‌هایی برای بررسی اثر تسلیح بالاست ژئواسکرپ در رفتار برشی بالاست انجام شده است. برای این منظور، آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس روی بالاست با دانه‌بندی گرید ۴ نشریه ۳۰۱ ایران که با ژئوگریدهای ساخته شده از نوارهای لاستیکی تثبیت شده‌اند، صورت گرفت. اثر تسلیح بالاست به وسیله شبکه ژئواسکرپ با اندازه چشمه ۵×۵، ۱۰×۱۰ و ۲۵×۲۵ سانتی‌متر بررسی شد. نتایج مطالعه بررسی تأثیر این راهکار بر رفتار برشی بالاست در تحقیق حاضر ارائه و تشریح گردیده است.

۲. برنامه مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱. مشخصات مصالح

در تست‌های آزمایشگاهی مطالعه حاضر، از بالاست تازه، از جنس آندزیت (آذرین بیرونی) با دانه‌بندی گرید ۴ نشریه ۳۰۱ ایران در معدن شهریار واقع در نزدیکی استان تهران استفاده شده است. توزیع دانه‌بندی و مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌دانه‌های بالاست به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۱ قابل مشاهده است.

تحلیل Minitab مورد ارزیابی قرار گرفته است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد ذرات لاستیک مخلوط شده با چسب، سایدگی نمونه‌ها کاهش یافته، اما جایگزینی بالاست با مواد RCB، نشست کوتاه‌مدت را افزایش داده است. بنابراین، با توجه به اهمیت حفظ و پایداری لایه بالاست با روش‌های تثبیت (مانند استفاده از ژئوگرید) و از سویی استفاده از مصالح ضایعاتی (مانند لاستیک فرسوده)، در مطالعه حاضر، ایده استفاده از لاستیک‌های فرسوده به‌عنوان نوار لاستیکی تسلیح‌کننده در لایه بالاست مورد بررسی و تحقیق قرار گرفت. در این راهکار، از لاستیک فرسوده به‌عنوان شبکه ژئوگرید استفاده شده تا ضمن کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی در جهت تثبیت و پایداری لایه بالاست به‌کار گرفته شود. از جمله تحقیقات انجام گرفته در زمینه تثبیت خاک با نوارهای لاستیکی، می‌توان به کار تحقیقاتی تاج‌آبادی و همکاران (۲۰۲۱) اشاره کرد. این محققان، با استفاده از آزمایش‌های بیرون کشش بزرگ‌مقیاس (۸/۸×۰/۸×۰/۸ متر) به ارزیابی عملکرد نوارهای لاستیک فرسوده با اعضای عرضی افقی (ژئواسکرپ تایلر) به‌عنوان المان‌های تسلیح در دیوارهای خاک مسلح پرداختند. نتایج آزمایش‌های بیرون کشش نشان می‌دهند که مسلح‌کننده پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به سایر مسلح‌کننده‌های متداول داشته و مقاومت بیرون‌کشیدگی را نسبت به نوار فولادی، نوار ژئوستتیک و نوار فولادی آجدار بیش از ۳، ۲/۵ و ۱/۵ برابر افزایش می‌دهد. در راه



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی بالاست

جدول ۱. ویژگی‌های مکانیکی سنگدانه‌های بالاست

ویژگی‌ها	نماد	شماره آزمایش	مقادیر مجاز (نشریه ۳۰۱ ایران)	مقادیر/نوع
نوع سنگ	-	-	-	آندزیت
چگالی (kg/m^3)	Gs	ASTM C127	$\geq 2/6$	۲/۷۸
مقاومت فشاری نامحدود سنگ مادر (MPa)	UCS	ASTM D7012	-	۱۵۸/۹۵
سایش لس آنجلس (%)	LAA	ASTM C535	≤ 30	۱۹/۵۶
جذب آب (%)	WA	ASTM C127	≤ 1	۰/۵۵

و سپس با برش به نوارهای با طول کمتر تبدیل شد (تاج-آبادی و همکاران، ۲۰۲۱). جهت سرهم‌بندی نمودن نوارها و تبدیل به ژئواسکرپ، از اتصالات پیچی مطابق شکل ۲- الف استفاده شد. نوع پیچ از دو منظر می‌تواند بر رفتار مسلح کننده مؤثر باشد. اولاً باید به گونه‌ای باشد که نوارهای لاستیک را کاملاً به یکدیگر مقید نماید و منجر به برش لاستیک نشود. ثانیاً چنانچه دارای زائده-هایی باشد منجر به درگیری با مصالح سنگدانه‌ای می‌شوند که در بلندمدت می‌تواند اتصال را تضعیف نماید. از این رو، نوع اتصالات به گونه‌ای انتخاب شد تا با توجه به ضخامت دو نوار لاستیکی روی یکدیگر، پیچ‌ها در نوارها دفن شوند و نوارها را به یکدیگر مقید سازد. مناسب‌ترین نوع پیچ برای این منظور، پیچ شش‌گوش^۱ می‌باشد که یکی از پیچ‌های مستحکم در صنعت به شمار می‌آید که دارای سری به شکل شش‌گوش (با گل درشت یا گل ریز) و به صورت تمام رزوه یا نیمه‌رزوه می‌باشد. در مطالعه حاضر، از نوع تمام رزوه آن جهت مقیدسازی بهتر نوارها و سرگل ریز به منظور درگیری کمتر با مصالح دانه‌ای استفاده شد.

در این تحقیق، جهت ساخت ژئواسکرپ از نوارهای تایلر فرسوده کامیون استفاده شد. برای این منظور، نمونه-های مختلفی از لاستیک‌های با ابعاد بزرگ (لاستیک کامیون) جمع‌آوری گردید و پس از جداسازی قسمت-های زائد، تبدیل به نوارهای شبکه مسلح‌کننده شدند. برای این منظور، در گام اول، طوقه‌های لاستیک کامیون (با قطر تقریباً معادل ۲/۱ متر) جدا شدند و در مرحله بعد لاستیک بدون طوقه از وسط برش خورد تا تبدیل به یک نوار با طول تقریباً ۴ متر شود. در ضمن، لازم به ذکر است که کناره آجدار لاستیک با توجه به عدم مقاومت کافی و عدم وجود سیم حتماً بایستی جدا گردد. بعد از جدا شدن کناره‌ها، بخش‌های میانی نوار باقیمانده با عرض مورد نظر می‌تواند به‌عنوان شبکه ژئواسکرپ مورد استفاده قرار گیرد. تهیه نمونه‌ها با توجه به اینکه لاستیک‌ها در ابعاد بزرگ بوده کاری بسیار مشکل است. اما با صرف وقت و امتحان کردن راه‌های مختلف، به راهکاری مناسب و ابداعی رسیده شده است. شکل ۲، مراحل تبدیل لاستیک فرسوده به شبکه ژئواسکرپ تایلر را نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر، از هر تایلر فرسوده کامیون نواری لاستیکی به عرض ۳۸۰ میلی‌متر و طول حدوداً ۴ متر استخراج شد

¹- Hex bolt

بررسی تأثیر ابعاد چشمه شبکه ژئواسکرپ بر رفتار مقاومت برشی بالاست به کمک آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۲. مراحل مختلف تبدیل تایر فرسوده کامیون به ژئواسکرپ: الف) تهیه لاستیک فرسوده کامیون، ب) جدا کردن طوقه و کناره آجدار، ج) برش نوارهای لاستیک و د) مسلح‌کنندهی ژئواسکرپ

مروری بر ادبیات فنی، حداکثر ابعاد چشمه‌های ژئوگرید-های معمول استفاده شده در خطوط ریلی، ۵×۵ سانتی‌متر می‌باشد که در این مطالعه نیز ابعاد چشمه یکی از شبکه‌ها ۵×۵ سانتی‌متر انتخاب شده است. همچنین، جهت بررسی کامل‌تر اثر اندازه چشمه شبکه ژئواسکرپ، با توجه به عرض زیاد نوارها در این مطالعه (۴ سانتی‌متر)، تنها ساخت شبکه با ابعاد چشمه ۱۰×۱۰ و ۲۵×۲۵ سانتی‌متر امکان‌پذیر بود.

به منظور مطالعه اثر تسلیح‌سازی بالاست با شبکه ژئواسکرپ، سه نوع ژئواسکرپ با اندازه چشمه‌های ۵×۵، ۱۰×۱۰ و ۲۵×۲۵ سانتی‌متر در آزمایشگاه به وسیله اتصال نوارهای لاستیکی به یکدیگر توسط پیچ، ساخته شده و در عمق ۱۲ سانتی‌متر از کف جعبه پایینی دستگاه برش مستقیم قرار گرفتند. تصویر ژئواسکرپ قرارگرفته در جعبه تست برش مستقیم بزرگ مقیاس در شکل ۲-ب قابل مشاهده می‌باشد. مشخصات فیزیکی و فنی نوارهای ژئواسکرپ نیز در جدول ۲ ارائه شده است. با

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و مکانیکی نوارهای لاستیکی

ویژگی	مقدار	واحد
تنش کششی حداکثر (T_{ult})	۱۳۵	(kN)
مقاومت کششی در نقطه تسلیم	۴۰/۵۲	(kN)
افزایش طول نقطه تسلیم	۱۰	(%)
مدول الاستیسیته	۴۰۰	(MPa)
ابعاد نوارها	۳۱۰×۴۰×۲۰	(mm ³)
چگالی	۱/۴۷۵	($\frac{gr}{cm^3}$)

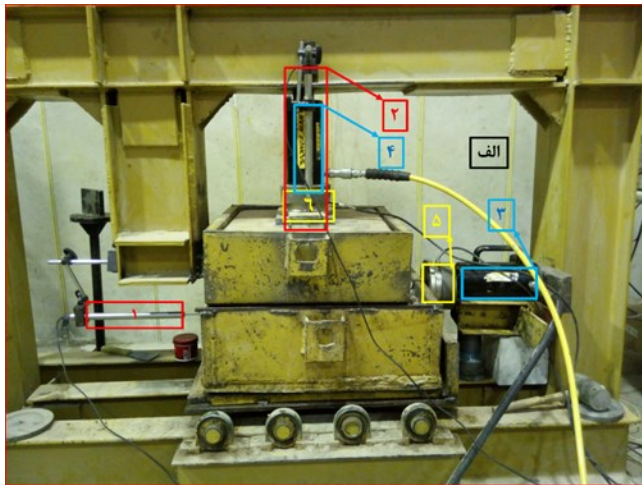
۲-۲. آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس

تست‌های آزمایشگاهی با استفاده از یک دستگاه آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس مطابق شکل ۳ انجام گرفت. این دستگاه از دو جعبه تشکیل شده که جعبه تحتانی دارای ابعاد $۱۸۰ \times ۵۴۰ \times ۴۴۰$ میلی‌متر و جعبه فوقانی $۱۸۰ \times ۴۴۰ \times ۴۴۰$ میلی‌متر هستند. جزئیات این دستگاه در شکل ۳ نشان داده شده است. در طول آزمایش، جعبه تحتانی آزادانه حرکت کرده و جعبه فوقانی ثابت است. تمام آزمایش‌های برش مستقیم تحت سه سربار ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال انجام شد. بر اساس استاندارد ASTM D3080 (2003) آزمایش‌های برش مستقیم زمانی پایان یافت که یا حداکثر نیروی برشی به دست آمده یا جابه‌جایی افقی نسبی (dh) به ۱۵٪ بعد طولی جعبه برش، با نرخ برش ۱ میلی‌متر بر دقیقه رسید (طلوع‌کیان و همکاران، ۲۰۱۸؛ سهر و همکاران، ۲۰۱۸؛ روه‌رمن و هو، ۲۰۱۹؛ لیو و همکاران، ۲۰۰۹). نیروی قائم و برشی در طول آزمایش توسط دو جک هیدرولیکی ۲۰۰ کیلونیوتنی با محدودیت جابه‌جایی ۱۰۰ میلی‌متر به نمونه اعمال شد (اسماعیلی و پوررشنو، ۲۰۲۲). ظرفیت لودسل‌های عمودی و افقی مورد استفاده برای اندازه‌گیری نیرو، ۱۰۰ کیلونیوتن است. همچنین، جابه‌جایی‌های افقی و عمودی (dv) نمونه‌ها توسط نیرو تغییر مکان‌سنج (LVDT) افقی و عمودی، با حد ۱۰۰

میلی‌متر و دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. برای ثبت نیرو و جابه‌جایی در جهات قائم و افقی از سیستم دیتالاگر چندکانالی ECL استفاده شد. این دیتالاگر ۱۶ کاناله بوده و قابلیت ثبت داده‌های بارسنج^۱ و LVDT را دارد. فرکانس جمع‌آوری داده‌ها ۱۰ هرتز بود که حجم داده‌های مورد نیاز برای ثبت در این مطالعه را پوشش می‌دهد. پس از دانه‌بندی، توزین و اختلاط دانه‌های بالاست، در حالت بدون تسلیح‌سازی، در هر جعبه، دو لایه از مصالح بالاست با ضخامت ۹۰ میلی‌متر ریخته شده و سپس در هر جعبه در دو لایه به ضخامت ۹۰ میلی‌متر با یک کوبه فلزی ۱۰ کیلوگرمی با ۴۸ ضربه متراکم و چگالی هر لایه بالاست به عدد ۱۵۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌رسید. سپس سنگ‌دانه‌های بالاست تحت سربار قائم ثبات و نیروی برشی قرار گرفتند. جهت بررسی رفتار برشی بالاست با تسلیح توسط شبکه ژئواسکرپ، ابتدا مصالح بالاست با ضخامت ۶۰ میلی‌متر درون جعبه پایین ریخته شده و توسط کوبه فلزی متراکم شدند. سپس شبکه ژئواسکرپ با چشمه ۵×۵ سانتی‌متر در عمق ۱۲ سانتی‌متری از کف جعبه، درون جعبه پایینی قرار گرفت. آزمایش با همین روند ذکر شده با سه نوع شبکه با ابعاد ۵×۵، ۱۰×۱۰ و ۲۵×۲۵ سانتی‌متر برای یافتن چشمه بهینه انجام شد.

¹- Load cell

بررسی تأثیر ابعاد چشمه شبکه ژئواسکرپ بر رفتار مقاومت برشی بالاست به کمک آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس



الف) دستگاه جعبه برش در حالت ایزاربندی شده
 ۱: تغییر مکان سنج افقی ۲: تغییر مکان قائم

ب) دستگاه ثبت داده
 ۱) دستگاه ثبت داده ۲) صفحه نمایش خروجی ها
 (دیتالاگر) ۱۶ کاناله

۳: جک اعمال نیروی افقی ۴: جک اعمال نیروی قائم

۵: نیروسنج افقی ۶: نیروسنج قائم

شکل ۳. مجموعه کامل آزمایش برش مستقیم؛ الف) دستگاه جعبه برش مستقیم ایزاربندی شده و ب) دستگاه ثبت داده

۳. تأثیر چشمه ژئواسکرپ بر رفتار برشی

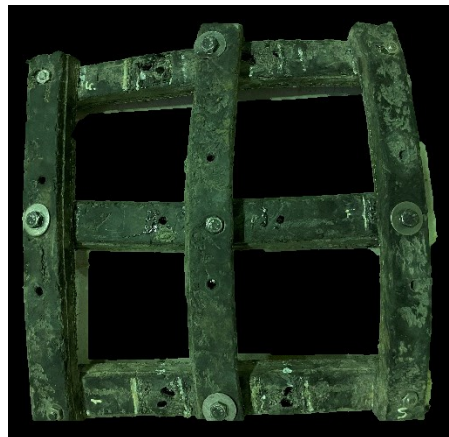
بالاست

تحلیل قرار گرفت. در این بخش، اثرات قرارگیری چشمه‌های 5×5 ، 10×10 و 25×25 سانتی‌متر بر رفتار برشی بالاست و انتخاب چشمه بهینه بررسی می‌شود. شکل ۴، تصاویری از شبکه ژئواسکرپ 25×25 سانتی-متر و نحوه قرارگیری آن در دستگاه تست برش مستقیم را نشان می‌دهد.

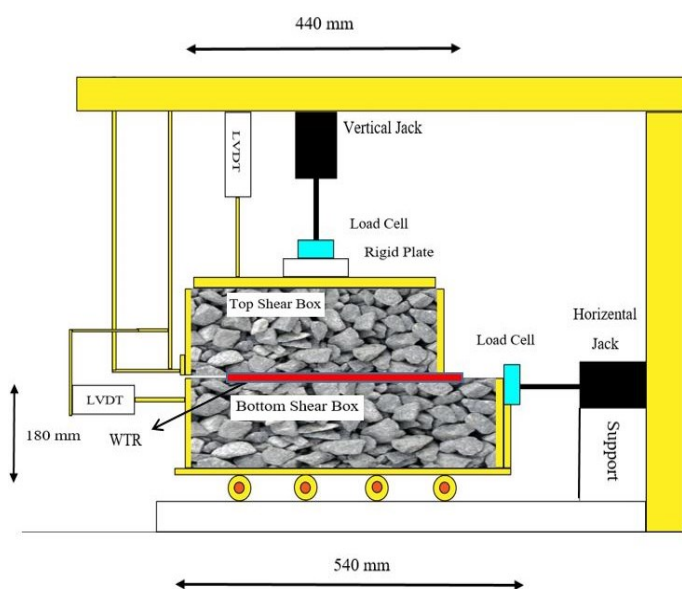
به منظور بررسی اثر مسلح‌کننده ابعاد چشمه شبکه ژئواسکرپ بر رفتار برشی بالاست، عملکرد این مسلح‌کننده با سه نوع شبکه به ابعاد 5×5 ، 10×10 و 25×25 سانتی‌متر روی پارامترهای مقاومت برشی بالاست (مانند تنش برشی، زاویه اصطکاک داخلی، زاویه اتساع) با انجام آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس مورد بررسی و



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۴. تصویر ژئواسکرپ ۲۵×۲۵ سانتی‌متر: (الف) نمای کلی شبکه با اتصالات پیچی، (ب) قرارگیری در جعبه تست برش مستقیم و (ج) شماتیک جانمایی مسلح‌کننده در دستگاه برش مستقیم

۳-۱. مقاومت برشی

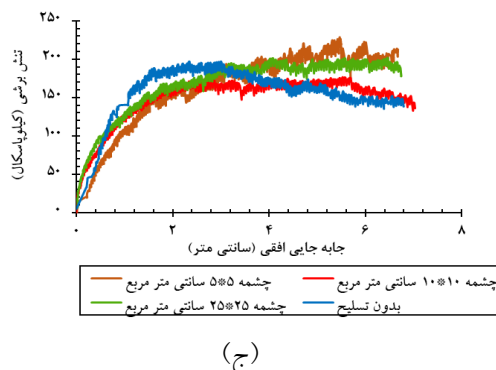
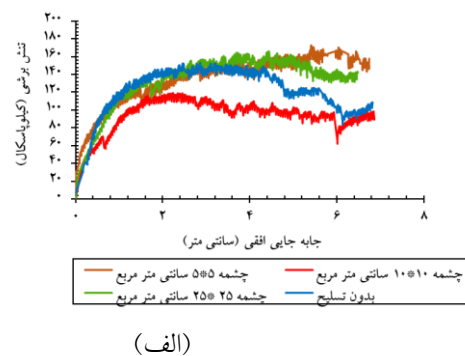
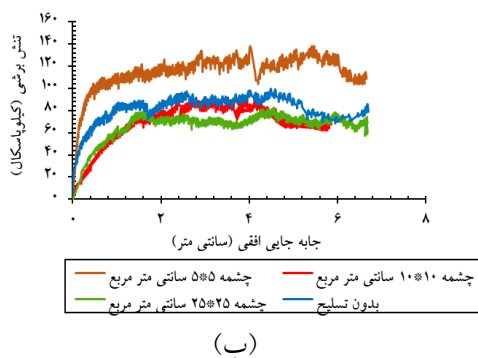
مقاومت برشی نسبت به حالت ^۱NR و بعضی موجب کاهش مقاومت برشی شده‌اند. در سربار ۵۰ کیلوپاسکال، تمامی چشمه‌ها به‌جز چشمه ۵×۵، سانتی‌متر، منجر به کاهش مقاومت برشی نسبت به حالت NR شده‌اند. در سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال، از جابه‌جایی افقی ۴/۲ سانتی‌متر به بعد، چشمه ۵×۵ سانتی‌متر و سپس چشمه ۲۵×۲۵ سانتی‌متر موجب افزایش حداکثری مقاومت برشی نسبت

در شکل ۵، نمودار تنش برشی- جابه‌جایی افقی برای سه سربار ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال با سه چشمه مختلف ۵×۵، ۱۰×۱۰ و ۲۵×۲۵ سانتی‌متر ارائه شده است. همچنین، در شکل ۶، نمودار نسبت مقاومت برشی حداکثر حالت با تسلیح توسط ژئواسکرپ به حالت بدون تسلیح، نشان داده شده است. با مشاهده نمودارها می‌توان دریافت که بعضی چشمه‌ها موجب افزایش

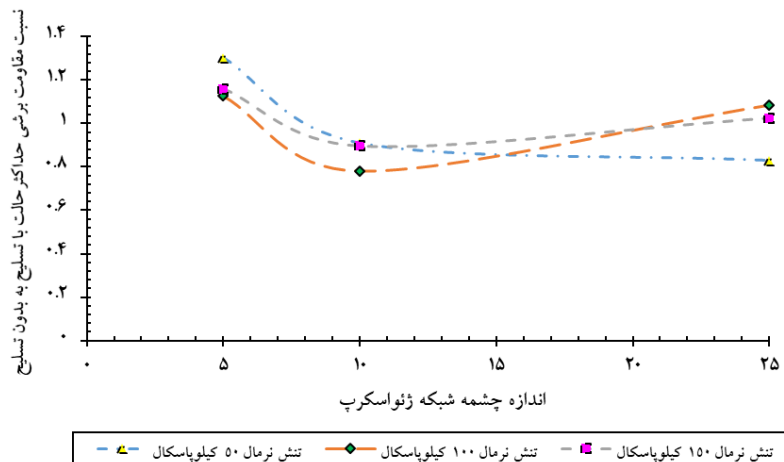
^۱- Non Reinforced

افزایش مقاومت برشی در صورت استفاده از مسلح-کننده را می‌توان ناشی از این دانست که سنگدانه‌ها در فضای مابین شبکه نوارها محبوس می‌شوند و این موضوع ضمن افزایش سطوح تماس موجب افزایش اصطکاک برشی می‌شود. با توجه به اینکه در کوچکترین چشمه یعنی شبکه ۵×۵ سانتی‌متر، اندرکنش و سطوح اصطکاکی بیشتری ایجاد می‌شود، لذا میزان افزایش مقاومت برشی نیز بیشتر بوده است. از سویی، در برخی حالت‌ها، بخصوص چشمه‌های درشت، کاهش مقاومت برشی نیز مشاهده شده است. این موضوع را می‌توان به سُرخوردن و غلتیدن سنگ‌دانه‌های بالاست روی نوارهای لاستیکی شبکه ژئواسکرپ و ضخامت زیاد این نوارها (۲ سانتی‌متر) نسبت داد که این ضخامت زیاد مانع قفل-ویست شدن سنگ‌دانه‌های بالاست به درون چشمه‌های شبکه ژئواسکرپ گردیده است.

به حالت NR شده‌اند. چشمه ۱۰×۱۰ سانتی‌متر نیز همانند سربار ۵۰ کیلوپاسکال، منجر به کاهش مقاومت برشی نسبت به حالت NR شده است. در سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال، از جابه‌جایی افقی ۲/۴ سانتی‌متر به بعد، تمامی چشمه‌ها مقاومت برشی بالاست را نسبت به حالت NR افزایش داده‌اند و در این سربار نیز چشمه ۵×۵ سانتی‌متر منجر به افزایش حداکثری مقاومت برشی شده است. از نمودار شکل ۶ نیز دریافت می‌شود که بیشترین درصد افزایش مقاومت برشی مربوط به چشمه ۵×۵ سانتی‌متر در حضور سه سربار ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال، حدوداً به ترتیب ۳۰، ۱۳ و ۱۶ درصد، بوده است. بیشترین درصد کاهش مقاومت برشی نسبت به حالت NR نیز مربوط به تراز ۱۰×۱۰ سانتی‌متر با کاهش ۹، ۲۲ و ۱۰ درصد، برای سه سربار ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال بوده است.



شکل ۵. تنش برشی - جابه‌جایی افقی با و بدون شبکه ژئواسکرپ: (الف) تنش نرمال ۵۰ کیلوپاسکال، (ب) تنش نرمال ۱۰۰ کیلوپاسکال و (ج) تنش نرمال ۱۵۰ کیلوپاسکال



شکل ۶. نسبت مقاومت برشی حداکثر حالت با تسلیح توسط ژئواسکرپ به حالت بدون تسلیح

۳-۲. تغییر شکل حجمی بالاست

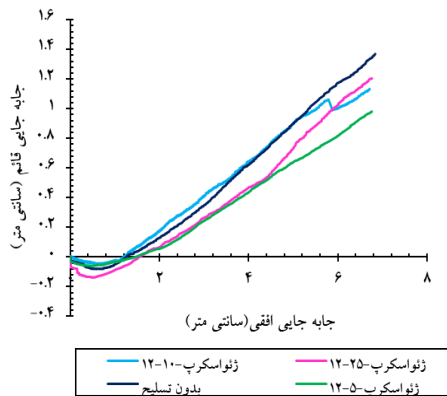
نمودارهای تغییر شکل حجمی بالاست به صورت تغییرات جابه‌جایی قائم- جابه‌جایی افقی تحت تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال بالاست گروه ۴ در شکل ۷ نمایش داده شده است. در حضور هر تنش قائم، تمامی چشمه‌ها در ابتدا یک رفتار انقباضی داشته که با پیشروی آزمایش در ادامه آن، با رفتار اتساعی دنبال شده که یک رفتار مخصوص به مصالح دانه‌ای متراکم است (ایندراراتنا و همکاران، ۲۰۱۱؛ اسوتا و حسینی، ۲۰۱۹؛ کانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ جیا و همکاران، ۲۰۱۹؛ دانش و همکاران، ۲۰۱۸). مواد دانه‌ای متراکم در هنگام برش ابتدا تمایل به انقباض (کاهش حجم) و سپس تمایل به اتساع (افزایش حجم) دارند. این رفتار بر خلاف رفتار مواد جامد بوده و دلیل آن قفل شدن و عدم رهایی دانه‌ها در حالت متراکم است. اعمال تنش به این گونه مواد باعث به وجود آمدن حرکت اهرمی بین دانه‌های مجاور و افزایش حجم ماده می‌شود. در طرف مقابل، با اعمال برش به یک ماده دانه‌ای سست، به جای اتساع و افزایش حجم، تراکم و کاهش حجم رخ خواهد داد. این رفتار در حالت بالاست مسلح شده با ژئواسکرپ نیز مشاهده می‌شود. همان طور که ملاحظه می‌شود، ژئواسکرپ‌های با ابعاد

چشمه زیاد تأثیر زیادی بر تغییر رفتار حجمی ندارند. متنها در حالت استفاده از ژئواسکرپ با ابعاد چشمه کم، تغییرات حجمی محسوس تر می‌باشد. این موضوع به دلیل آن است که در شبکه با ابعاد چشمه کمتر، درگیری مابین دانه‌ها بیشتر می‌شود و در نتیجه حرکات اهرمی دانه‌های مجاور که منجر به تغییر رفتار اتساعی خواهد شد، افزایش می‌یابد.

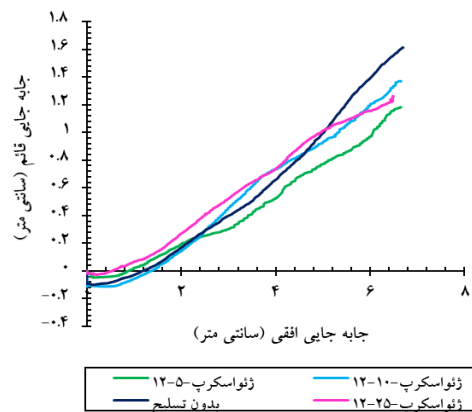
با دقت در نمودارها مشاهده می‌شود که در سربار ۵۰ کیلوپاسکال، تا جابه‌جایی افقی ۴/۸ سانتی‌متر، چشمه‌های ۱۰×۱۰ و ۲۵×۲۵ سانتی‌متر نسبت به حالت NR، نقشی در کاهش اتساع نداشته‌اند و پس از این جابه‌جایی افقی به بعد موجب کاهش اتساع شده‌اند. چشمه ۵×۵ سانتی‌متر از جابه‌جایی افقی ۲ سانتی‌متر به بعد موجب کاهش اتساع شده و این چشمه در این سربار، بیشترین اثر را در کاهش اتساع داشته است. در سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال، چشمه ۱۰×۱۰ سانتی‌متر از جابه‌جایی افقی ۵/۶ سانتی‌متر رفتار کاهشی خود را در کاهش اتساع نشان داده و چشمه‌های ۵×۵ و ۲۵×۲۵ سانتی‌متر هر دو رفتار کاهشی در مقدار اتساع را داشته‌اند. اما مجدداً اثر چشمه ۵×۵ سانتی‌متر در کاهش مقدار اتساع از باقی چشمه‌ها

کاهش خود را نشان داده‌اند. چشمه 5×5 سانتی‌متر نیز همانند باقی سربارها، بیشترین اثر را در کاهش اتساع داشته است. به طوری که مقدار اتساع را از $1/36$ سانتی‌متر به $0/98$ سانتی‌متر کاهش داده و کاهش آن حدوداً ۲۸ درصد بوده است.

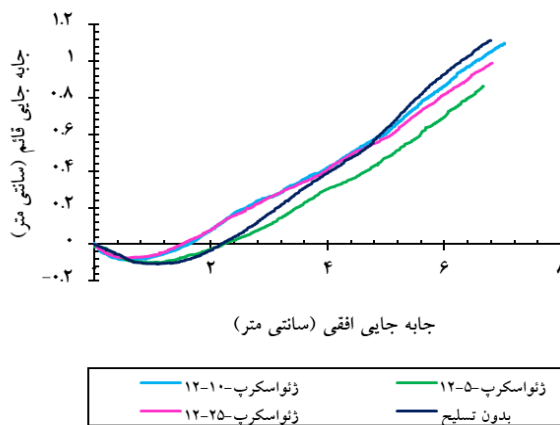
بیشتر است. به طوری که در سربار 100 کیلوپاسکال، مقدار اتساع را از $1/37$ سانتی‌متر به $0/98$ سانتی‌متر کاهش داده و کاهش آن حدوداً ۲۴ درصد بوده است. در سربار 150 کیلوپاسکال، تا جابه‌جایی افقی $4/8$ سانتی‌متر، چشمه‌های 10×10 و 25×25 سانتی‌متر اثری در کاهش اتساع نداشته‌اند و پس از این جابه‌جایی به بعد رفتار



(ب)



(الف)



(ج)

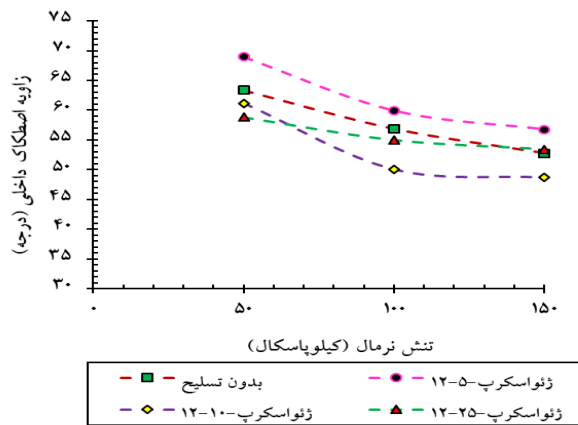
شکل ۷. جابه‌جایی قائم - جابه‌جایی افقی با و بدون شبکه ژئواسکرپ: (الف) تنش نرمال 50 کیلوپاسکال، (ب) تنش نرمال 100 کیلوپاسکال و (ج) تنش نرمال 150 کیلوپاسکال

مشاهده می‌باشد. مشاهده می‌شود که تنها چشمه 5×5 سانتی‌متر موجب افزایش زاویه اصطکاک داخلی نسبت به حالت NR شده است. به طوری که افزایش زاویه

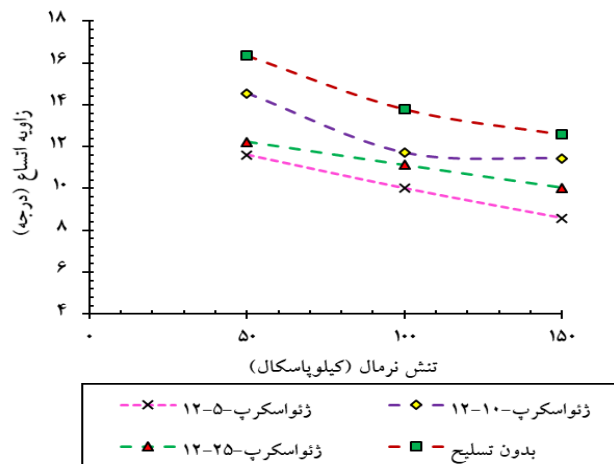
۳-۳. زاویه اصطکاک داخلی و زاویه اتساع
تغییرات زاویه اصطکاک برحسب تنش قائم برای چشمه‌های مختلف ژئواسکرپ در شکل ۸ قابل

برحسب تنش قائم برای چشمه‌های مختلف ژئواسکرپ در شکل ۹ نیز قابل مشاهده می‌باشد. در این نمودار، مشاهده می‌شود که تمامی چشمه‌ها موجب کاهش زاویه اتساع لایه بالاست نسبت به حالت NR شده‌اند. برای مثال، در سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال، برای چشمه‌های ۵×۵، ۱۰×۱۰ و ۲۵×۲۵ سانتی‌متر، زاویه اتساع از ۱۶ درجه به ترتیب حدوداً به ۱۰، ۱۲ و ۱۱ درجه کاهش پیدا کرده است.

اصطکاک داخلی برای سربارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال چشمه ۵×۵ سانتی‌متر حدوداً به ترتیب ۵، ۹ و ۸ درصد نسبت به حالت NR بوده است. این افزایش که به واسطه مسلح‌سازی با شبکه ژئواسکرپ در زاویه اصطکاک دیده می‌شود، در حقیقت مربوط به قفل‌شدگی بالاست-ژئواسکرپ بوده که در برابر لغزش یا حرکت آزادانه دانه‌های بالاست در این ترازها، مقاومت می‌کند. همچنین، مشاهده می‌شود که با افزایش تنش قائم، زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته است. تغییرات زاویه اتساع



شکل ۸. نمودار زاویه اصطکاک داخلی- تنش نرمال برای چشمه‌های مختلف شبکه ژئواسکرپ



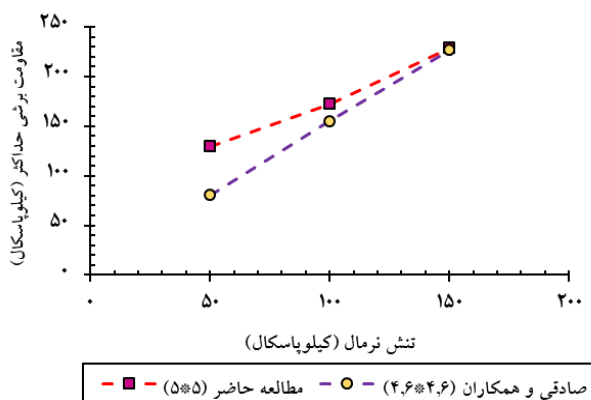
شکل ۹. نمودار زاویه اتساع- تنش نرمال برای چشمه‌های مختلف شبکه ژئواسکرپ

۴. مقایسه مقاومت برشی ژئواسکرپ و

ژئوگرید

زمینه بررسی رفتار بالاست تسلیح شده با ژئوگرید مشابه تفاوت‌هایی در نتایج به دست آمده مشهود است که در ادامه به شرح تفاوت‌های مشاهده شده پرداخته می‌شود. در شکل ۱۰، میزان مقاومت برشی حد اکثر بالاست تثبیت شده با شبکه ژئواسکرپ تحقیق حاضر در مقایسه با ژئوگریدهای با ابعاد چشمه مشابه در تحقیق صادقی و همکاران (۲۰۲۰) ترسیم شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، میزان مقاومت برشی حد اکثر در تمامی سربارها در حالت استفاده از ژئواسکرپ بیشتر از مقادیر مقاومت برشی حد اکثر در حالت استفاده از ژئوگرید می‌باشد. میانگین درصد افزایش مقاومت برشی توسط شبکه ژئواسکرپ ۵×۵ سانتی‌متر در سربارهای مختلف حدوداً ۲۰ درصد بوده که از میانگین درصد افزایش مقاومت برشی توسط ژئوگرید ۶/۶×۴/۶ سانتی‌متر تحقیق صادقی و همکاران (۲۰۲۰) حدوداً ۳ درصد بیشتر است.

هدف از انجام این مطالعه، بررسی اثر تسلیح بالاست با شبکه ژئواسکرپ بر مقاومت برشی آن بوده است. لذا در این پژوهش، ایده استفاده از شبکه ژئواسکرپ به عنوان نوعی ژئوگرید برای تثبیت لایه بالاست مطرح شد. آزمایش‌های مختلفی تحت سربارهای قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال روی شبکه ژئواسکرپ با ابعاد چشمه-های ۵×۵، ۱۰×۱۰ و ۲۵×۲۵ سانتی‌متر در لایه بالاست، تحت آزمایش برش مستقیم، انجام شد. از نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که چشمه ۵×۵، سانتی‌متر دارای بهترین عملکرد از نظر افزایش مقاومت برشی، افزایش زاویه اصطکاک داخلی و کاهش زاویه اتساع است. لیکن، با مقایسه یافته‌های این پژوهش با کارهای انجام شده در



شکل ۱۰. نمودار مقایسه تنش برشی - جابه‌جایی افقی مطالعه صادقی و همکاران (۲۰۲۰) و تحقیق حاضر

۵. نتیجه‌گیری

ژئواسکرپ با چشمه‌های ۵×۵، ۱۰×۱۰ و ۲۵×۲۵ سانتی-متر جهت یافتن چشمه بهینه مورد آزمایش قرار گرفتند. مشاهده شد که چشمه ۵×۵ سانتی‌متر دارای بهترین عملکرد از نظر افزایش مقاومت برشی، افزایش زاویه اصطکاک داخلی و کاهش زاویه اتساع است. اهم نتایج این مطالعه به شرح زیر است:

در این مطالعه، ایده استفاده از شبکه ژئواسکرپ به عنوان نوعی ژئوگرید برای تثبیت لایه بالاست مطرح شد. شبکه ژئواسکرپ در تراز ۱۲ سانتی‌متر از کف جعبه پایینی جهت بررسی رفتار برشی بالاست و یافتن بهترین چشمه، تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفت. سه نوع

- ✓ در محدوده تنش‌های قائم اعمالی، میانگین درصد تغییر مقاومت برشی برای شبکه ژئواسکرپ منتخب در ترازهای ۶، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ سانتی‌متر حدوداً به ترتیب ۹ درصد کاهش، ۲۰ درصد افزایش، ۱ درصد افزایش و ۱۴ درصد کاهش بوده و در این بین، تراز ۱۲ سانتی‌متر با بیشترین درصد افزایش مقاومت برشی، تراز بهینه است.
- ✓ در محدوده تنش‌های قائم اعمالی برای شبکه ژئواسکرپ منتخب در تراز ۱۲ سانتی‌متر، میانگین زاویه اصطکاک داخلی و اتساع حدوداً به ترتیب ۷ درصد افزایش و ۳۰ درصد کاهش یافته است.
- ✓ در محدوده تنش‌های قائم اعمالی برای شبکه ۵×۵، ۱۰×۱۰ و ۲۵×۲۵ سانتی‌متر، میانگین زاویه اصطکاک داخلی حدوداً به ترتیب ۷ درصد افزایش، ۷ درصد کاهش و ۱ درصد کاهش یافته است. میانگین زاویه اتساع نیز حدوداً به ترتیب ۳۰ درصد کاهش، ۱۲ و ۲۱ درصد افزایش یافته است.
- ✓ با بررسی میزان افزایش مقاومت برشی توسط شبکه ژئواسکرپ منتخب، میانگین درصد افزایش مقاومت برشی نسبت به حالت بدون تسلیح در محدوده تنش‌های قائم اعمالی حدوداً ۲۰ درصد بوده است.

۶. مراجع

- Danesh, A., Palassi, M. and Mirghasemi, A. A. 2018. "Effect of sand and clay fouling on the shear strength of railway ballast for different ballast gradations". *Granul. Matter*, 20: 1-14.
- Esmaili, M., Zakeri, J. A., Ebrahimi, H. and Khadem Sameni, M. 2016. "Experimental study on dynamic properties of railway ballast mixed with tire derived aggregate by modal shaker test". *Adv. Mech. Eng.*, 8(5), DOI: 10.1177/1687814016640245
- Esmaili, M., Aela, P. and Hosseini, A. 2017. "Experimental assessment of cyclic behavior of sand-fouled ballast mixed with tire derived aggregates". *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 98: 1-11.
- Esmaili, M. and Namaei, P. 2022. "Effect of mother rock strength on rubber-coated ballast (RCB) deterioration". *Constr. Build. Mater.*, 316: 126106.
- Esmaili, M. and Pourrashnoo, A. 2022. "Experimental investigation of shear strength parameters of ballast encased with geogrid". *Constr. Build. Mater.*, 335: 127491.
- Gong, H., Song, W., Huang, B., Shu, X., Han, B., Wu, H. and Zou, J. 2019. "Direct shear properties of railway ballast mixed with tire derived aggregates: Experimental and numerical investigations". *Constr. Build. Mater.*, 200: 465-473.
- Guo, Y., Markine, V., Qiang, W., Zhang, H. and Jing, G. 2019. "Effects of crumb rubber size and percentage on degradation reduction of railway ballast". *Constr. Build. Mater.*, 212: 210-224.
- Hussaini, S. K. K. and Sweta, K. 2020. "Application of geogrids in stabilizing rail track substructure". *Front. Built Environ.*, 6: 20.
- Indraratna, B., Khabbaz, H., Salim, W. and Christie, D. 2006. "Geotechnical properties of ballast and the role of geosynthetics in rail track stabilisation". *Proc. Inst. Civ. Eng.-Ground Improve.*, 10(3): 91-101.
- Indraratna, B., Ngo, N. T. and Rujikiatkamjorn, C. 2011. "Behavior of geogrid-reinforced ballast under various levels of fouling". *Geotext. Geomembranes*, 29(3): 313-322.
- Jia, W., Markine, V., Guo, Y. and Jing, G. 2019. "Experimental and numerical investigations on the shear behaviour of recycled railway ballast". *Constr. Build. Mater.*, 217: 310-320.
- Liu, C. N., Ho, Y. H. and Huang, J. W. 2009. "Large scale direct shear tests of soil/PET-yarn geogrid interfaces". *Geotext. Geomembranes*, 27(1): 19-30.
- Nimbalkar, S. and Indraratna, B. 2016. "Improved performance of ballasted rail track using geosynthetics and rubber shockmat". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 142(8): 04016031.
- Rohrman, A. K. and Ho, C. L. 2019. "Effects of fouling containing plastic fines on abraded ballast strength and deformation properties". *Transport. Geotech.*, 21: 100278.

- Sadeghi, J., Kian, A. R. T., Ghiasinejad, H., Moqaddam, M. F. and Motevalli, S. 2020. "Effectiveness of geogrid reinforcement in improvement of mechanical behavior of sand-contaminated ballast". *Geotext. Geomembranes*, 48(6): 768-779.
- Selig, E. T. and Waters, J. M. 1994. "Track geotechnology and substructure management". Thomas Telford.
- Sol-Sánchez, M. and D'Angelo, G. 2017. "Review of the design and maintenance technologies used to decelerate the deterioration of ballasted railway tracks". *Constr. Build. Mater.*, 157: 402-415.
- Suhr, B., Marschnig, S. and Six, K. 2018. "Comparison of two different types of railway ballast in compression and direct shear tests: experimental results and DEM model validation". *Granul. Matter*, 20(4): 70.
- Sweta, K. and Hussaini, S. K. K. 2019. "Behavior evaluation of geogrid-reinforced ballast-subballast interface under shear condition". *Geotext. Geomembranes*, 47(1): 23-31.
- Tajabadipour, M., Dehghani, M., Kalantari, B. and Lajevardi, S. H. 2021. "Evaluation of the performance of Geo Scrap Tire reinforcement with horizontal transverse members by large-scale pullout test". *Amirkabir J. Civ. Eng.*, 53(4): 1459-1478.
- Toloukian, A. R., Sadeghi, J. and Zakeri, J. A. 2018. "Large-scale direct shear tests on sand-contaminated ballast". *Proc. Inst. Civ. Eng.-Geotech. Eng.*, 171(5): 451-461.