

بررسی تأثیر دورپیچی به کمک ژئوگرید بر پارامترهای مقاومت برشی بالاست

مرتضی اسماعیلی*، استاد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
علی پوررشنو، دانشجوی کارشناسی ارشد خط و سازه‌های ریلی، دانشکده مهندسی راه‌آهن،
دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

Email: m_esmaeili@iust.ac.ir

دریافت ۱۳۹۹/۱۲/۰۸ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۷

چکیده

در پژوهش حاضر، با به‌کارگیری دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس، تأثیر دورپیچی بر پارامترهای مقاومت برشی بالاست بررسی شده است. برای این منظور، از دو گروه بالاست با اندازه متوسط دانه‌ای (D_{50}) برابر ۴۱/۳۱ و ۳۱/۵۵ میلی‌متر و همچنین سه نوع ژئوگرید دوسویه GP۳۵/۳۵، GP۴۰/۲۰ و GP۶۰/۲۰ استفاده شد. آزمایش‌ها تحت تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال با نرخ برش یک میلی‌متر در دقیقه انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در حالت بدون دورپیچی، رفتار برشی بالاست متأثر از اندازه بیشینه قطر سنگدانه، ضریب یکنواختی و همچنین تنش قائم اعمالی است. به‌گونه‌ای که با افزایش درصد مصالح درشت‌دانه و ضریب یکنواختی بالاست، مقاومت برشی آن افزایش می‌یابد. ولی با افزایش مقادیر تنش قائم از ۵۰ به ۱۵۰ کیلوپاسکال، زاویه اصطکاک داخلی بالاست‌های گروه‌های یک و چهار به ترتیب از $65/56^\circ$ و $63/90^\circ$ به $54/39^\circ$ و $52/16^\circ$ کاهش یافته است. به‌طور مشابه، برای دو گروه دانه‌بندی مذکور، مقدار میانگین زاویه اتساع به ترتیب $16/69$ و $12/85$ درصد کاهش یافت. از سوی دیگر، دورپیچی بالاست با ژئوگرید باعث بهبود رفتار برشی آن شده، به‌طوری که برای گروه دانه‌بندی یک، حداکثر زاویه اصطکاک داخلی متناظر با تنش‌های قائم ۵۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال به ترتیب $74/5^\circ$ و $68/96^\circ$ بوده، که مضاف بر آن، میانگین زوایای اتساع، $32/22$ درصد کاهش یافت. در بالاست گروه چهار، بیشینه زاویه اصطکاک، در حضور تنش‌های قائم ۵۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال، در مقایسه با حالت بدون دورپیچی، به ترتیب $11/77$ و $24/80$ درصد افزایش یافت؛ میانگین زوایای اتساع نیز $27/86$ درصد کاهش یافت. همچنین، مطالعه حاضر نشان داد که رفتار برشی بالاست متأثر از اندازه چشمه ژئوگرید (A) است. جمع‌بندی نتایج نشان می‌دهد که استفاده از روش دورپیچی سبب بهبود قابل ملاحظه‌ی رفتار برشی بالاست شده، که می‌توان از این روش برای حفظ پایداری خطوط بالاستی در قوس‌ها بهره برد.

واژه‌های کلیدی: بالاست گروه‌های یک و چهار، مقاومت برشی بیشینه، زاویه اصطکاک داخلی، زاویه اتساع، ژئوگرید، دورپیچی

۱. مقدمه

بالاست یکی از اجزای مهم خطوط ریلی بالاستی است که یکی از وظایف اصلی آن توزیع بار ناشی از حرکت قطار در سطح قابل تحمل برای لایه بستر است. مصالح بالاست به علت ماهیت دانه‌ای و غیریکپارچه، تحت عبور بار تکراری و دینامیک ناوگان دچار خرابی‌هایی مانند شکستگی، سایش، گسترش جانبی و نشست می‌شود. تکرار این مشکلات منجر به کاهش ایمنی مسیر، افزایش حجم عملیات تعمیر و نگهداری و متعاقباً افزایش زمان انسداد خط و کاهش کارایی و بهره‌وری شبکه ریلی خواهد شد. یکی از راهکارهای مؤثر برای رفع مشکلات فوق، تثبیت و مسلح‌سازی بالاست با مصالح ژئوستنتیک به نام ژئوگرید است. ژئوگریدها مصالح پلیمری هستند که از اتصال مجموعه‌ای از تسمه‌های کششی، در اندازه و شکل چشمه گوناگون (مربعی، مستطیلی و مثلثی) تحت فرآیندهایی مثل بافته شده^۱، جوش خورده^۲ و رانش با فشار^۳، در انواع مختلفی نظیر تک‌سویه، دوسویه و چندسویه تولید می‌شوند (داس، ۲۰۱۶؛ اسوتا و حسینی، ۲۰۱۸). ژئوگریدها به‌طور گسترده برای افزایش سختی، کاهش نشست و کنترل گسترش جانبی خطوط بالاستی استفاده شده‌اند (داس، ۲۰۱۶؛ حسینی و همکاران، ۲۰۱۵؛ ایندراواتنا و همکاران، ۲۰۱۳). با بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه خطوط بالاستی مسلح شده با ژئوگرید تحت بار قائم و جانبی، مشخص می‌شود که عمدتاً ژئوگریدها به دو صورت کلی: الف) در درون یا در کف لایه بالاست (ایندراواتنا و همکاران، ۲۰۱۱؛ اسماعیلی و همکاران، ۲۰۱۷؛ اسوتا و حسینی، ۲۰۱۸؛ صادقی و همکاران، ۲۰۲۰) و ب) داخل لایه زیر بالاست یا سطح فوقانی بستر (بیابانی و همکاران، ۲۰۱۵؛ بیابانی و ایندراواتنا، ۲۰۱۶؛ چاولا و شاهو، ۲۰۱۶؛ فرناندز و

همکاران، ۲۰۰۸، اوه، ۲۰۱۳؛ یو و همکاران، ۲۰۱۳)؛ به-کار رفته‌اند. تا کنون مطالعات زیادی برای بررسی مطالعه رفتار برشی بالاست مسلح شده با ژئوگرید انجام شده است. ایندراواتنا و همکاران (۲۰۱۱)، طی یک مطالعه آزمایشگاهی روی رفتار برشی بالاست آلوده به زغال‌سنگ، نشان دادند که تسلیح با ژئوگرید، مقاومت برشی بالاست تمیز را تا ۲۳/۳۳ درصد افزایش داده است. با این وجود، متناسب با افزایش مقدار آلودگی، میزان کارایی ژئوگرید کاهش یافته است. به‌طوری که با افزایش درصد آلودگی به بیش از ۷۰٪، مقاومت برشی بالاست مسلح شده با ژئوگرید تا ۲۵٪ کاهش یافته است. اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۷)، در یک مطالعه آزمایشگاهی و میدانی، با به‌کارگیری یک و دو لایه ژئوگرید در درون لایه بالاست، نشان دادند که مقاومت جانبی تراورس منفرد در آزمایش STPT^۴ به ترتیب ۳۱٪ و ۴۲٪ افزایش یافته، در حالی که اثر تسلیح‌سازی به روش مذکور بر افزایش مقاومت جانبی پانل خط TPD^۵ به ترتیب ۲۹٪ و ۴۰٪ بوده است. در مطالعه دیگری، اسوتا و حسینی (۲۰۱۸)، با انجام آزمایش برش مستقیم بزرگ-مقیاس نشان دادند که با افزایش نرخ برش، مقاومت برشی بالاست کاهش یافته؛ در مقابل، نصب ژئوگرید در سطح تماس دو جعبه‌ی دستگاه برش مستقیم، مضاف بر بهبود عملکرد برشی بالاست، سبب کاهش درصد شکستگی دانه‌های آن از ۵/۱۲ درصد به ۳/۲۶ درصد شده است. میرمحمدصادقی و همکاران (۲۰۲۰)، در یک مطالعه آزمایشگاهی به کمک دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس نشان دادند که وجود ژئوگرید سبب افزایش ۲۵٪ مقاومت برشی بالاست آلوده به ماسه مناطق کویری شده است. لیکن با افزایش میزان آلودگی به بیش از ۲۴٪، رفتار برشی بالاست عادی و مسلح شده با ژئوگرید تفاوت چندانی نشان نداده است. مرور ادبیات فنی فوق نشان می‌دهد که

4- Single Tie Push Test

5- Track Panel Displacement Test

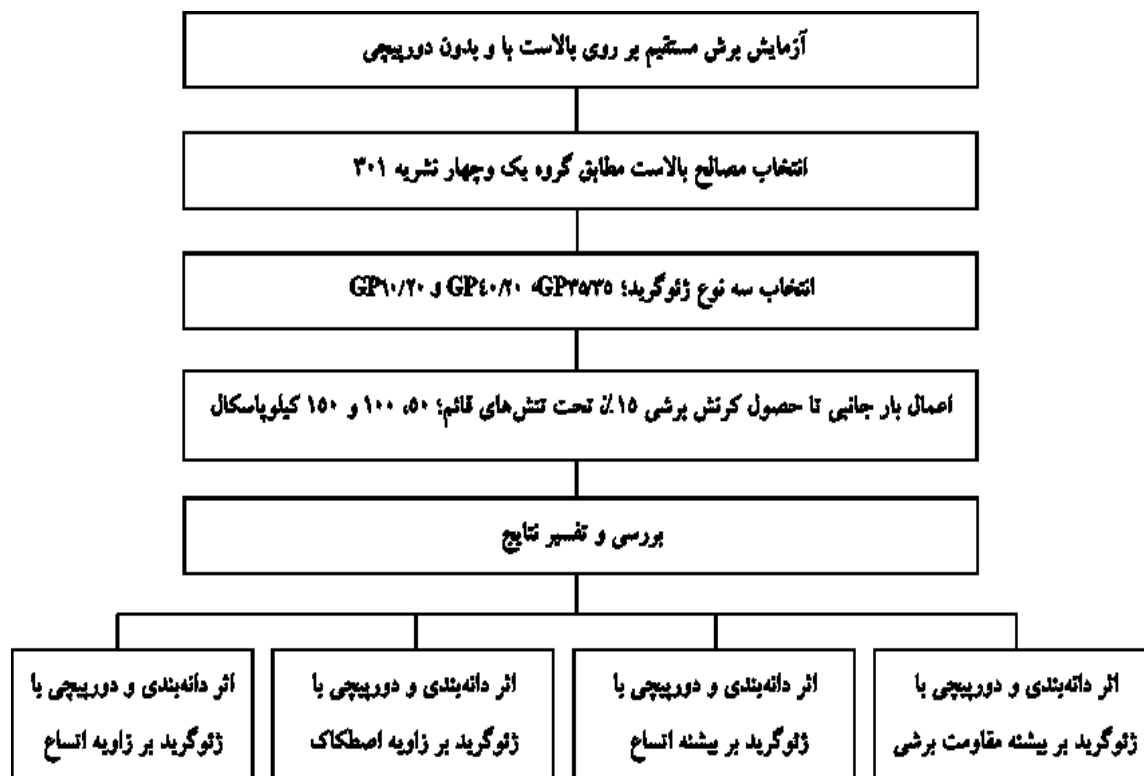
1- Woven geogrid

2- Welded geogrid

3- Extruded geogrid

صعب‌العبور، تقاطعات و انشعابات یا نواحی انتقال استفاده کرد که به علت اعمال بارهای جانبی، عدم امکان زیرکوبی، تغییر ماهیت و شدت نیروی اعمالی در نواحی انتقال، گسترش جانبی بالاست را افزایش داده و متعاقباً نشست خط را به دنبال خواهد داشت. لذا، استفاده از روش دورپیچی می‌تواند منجر به افزایش دوام و باربری لایه بالاست و کاهش زوال خط شود. در تحقیق حاضر، با به‌کارگیری دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس، تأثیر دورپیچی بر رفتار برشی و پارامترهای مقاومت برشی بالاست بررسی شده است. برای این منظور، از سه نوع ژئوگرید با شکل، اندازه چشمه و مقاومت کششی متفاوت استفاده شده است. شکل ۱، برنامه آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام شده را نشان می‌دهد.

عمده تحقیقات انجام شده در خصوص مطالعه رفتار برشی بالاست تسلیح شده با ژئوگرید منوط به استفاده از ژئوگرید به صورت لایه‌های مسطح بوده که تعداد آنها در عمق بالاست متغیر است. لیکن به نظر می‌رسد هیچ‌یک از مطالعات ادبیات فنی مشخصاً رفتار برشی بالاست دورپیچ شده با ژئوگرید را مورد بررسی قرار نداده است. از سوی دیگر، فرآیند دورپیچی، که در آن به‌جای استفاده از ژئوگرید به صورت صفحات گسترده در عمق لایه بالاست، محیط پیرامونی لایه بالاست را احاطه کرده، به‌علاوه بر کاهش گسترش جانبی، انتظار می‌رود به علت افزایش اندرکنش و سطح تماس بین بالاست- چشمه ژئوگرید، سبب ارتقای عملکرد برشی آن شود. می‌توان از این روش در نقاط و گلوگاه‌های خطوط ریلی نظیر قوس‌ها، نقاط



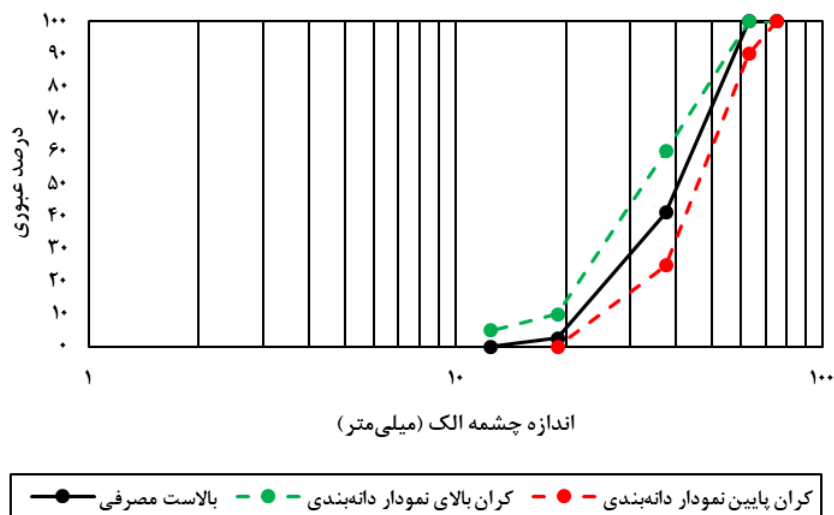
شکل ۱. برنامه آزمایش‌های آزمایشگاهی برش مستقیم بزرگ‌مقیاس برای ارزیابی اثر دانه‌بندی و دورپیچی بالاست بر مقاومت برشی آن

۲. آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس

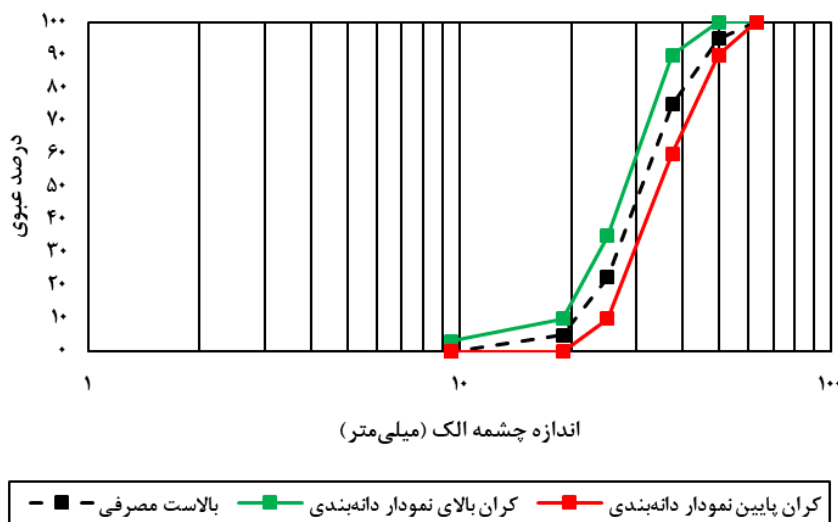
۱-۲. مشخصات مصالح مورد استفاده

بالاست آندزیتی به کار رفته در تحقیق حاضر، از معدن شهریار استان تهران تهیه شد. توزیع دانه بندی بالاست مصرفی در تمام آزمایش‌های آزمایشگاهی مطابق با منحنی‌های دانه بندی بالاست گروه‌های یک و چهار نشریه ۳۰۱ سازمان مدیریت و برنامه ریزی ایران (نشریه

۳۰۱، ۱۳۸۴) بوده که نمودار و مشخصات دانه بندی به ترتیب در شکل ۲ و جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین، در این پژوهش از سه ژئوگرید GP۳۵/۳۵، GP۴۰/۲۰ و GP۶۰/۲۰ با شکل، اندازه چشمه و مقاومت کششی مختلف که توسط شرکت ژئوپارسیان تولید شده، استفاده گردید. تصویر ژئوگریدهای استفاده شده، مشخصات فیزیکی و مکانیکی آنها به ترتیب در شکل ۳ و جدول ۲ ارائه شده است.



(الف)

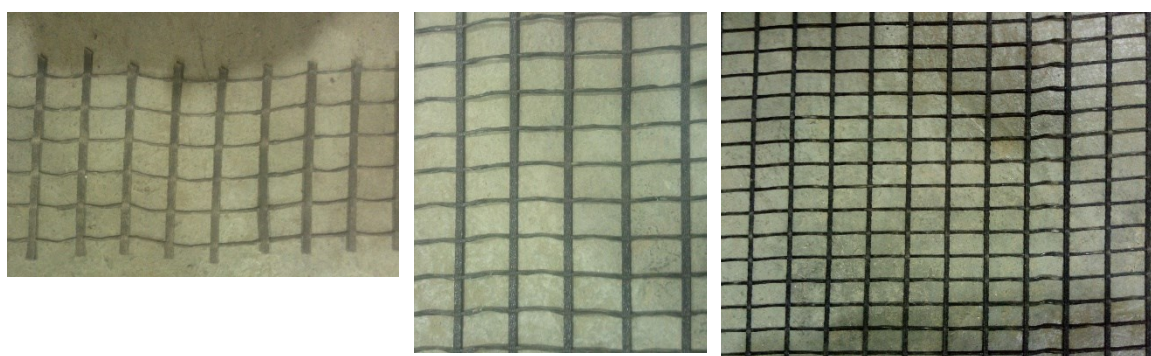


(ب)

شکل ۲. منحنی دانه بندی بالاست: (الف) گروه یک و (ب) گروه چهار

جدول ۱. مشخصات دانه‌بندی بالاست‌های گروه‌های یک و چهار (نشریه ۳۰۱، ۱۳۸۴)

مصالح	D _{max}	D _{min}	D ₅₀	D ₃₀	D ₁₀	C _u	C _c
	(میلی‌متر)	(میلی‌متر)	(میلی‌متر)	(میلی‌متر)	(میلی‌متر)	ضریب یکنواختی	ضریب خمیدگی
بلاست گروه یک	۵۰	۱۲/۵	۴۱/۳۱	۳۲/۱۸	۲۲/۶۱	۲/۰۲	۱/۰۰۳۵
بلاست گروه چهار	۵۰	۹/۵	۳۱/۵۵	۲۶/۷۹	۲۰/۷۱	۱/۶۴	۱/۰۲۱



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۳. ژئوگریدهای استفاده شده در آزمایش؛ (الف) ژئوگرید GP۳۵/۳۵، (ب) ژئوگرید GP۴۰/۲۰ و (ج) ژئوگرید GP۶۰/۲۰

جدول ۲. مشخصات ژئوگریدهای مورد استفاده (ژئوپارسیان، ۲۰۲۰)

نوع ژئوگرید	GP۳۵/۳۵	GP۴۰/۲۰	GP۶۰/۲۰
جنس		پلی‌استر (دوسویه)	
در راستای ماشین‌کاری	۳۵	۴۰	۶۰
در راستای عرضی	۳۵	۲۰	۲۰
درصد کشیدگی در مقاومت مشخصه (رواداری ±۱۰٪)	۱۲	۱۲	۱۲
اندازه چشمه (میلی‌متر)			
در راستای ماشین‌کاری	۳۵	۳۵	۳۵
در راستای عرضی	۲۵	۲۵	۳۵

۲-۲. روش آماده‌سازی نمونه و انجام آزمایش

(طول) ۵۴۰ میلی‌متر (جعبه تحتانی) و (ارتفاع) ۱۸۰ × (عرض) ۴۴۰ × (طول) ۴۴۰ میلی‌متر (جعبه فوقانی) می‌باشد که جزئیات آن در شکل ۴ نشان داده شده است. در طول آزمایش، جعبه تحتانی آزادانه حرکت کرده و جعبه فوقانی ثابت است.



شکل ۴. نمای دستگاه آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس

این مطالعه آزمایشگاهی، با استفاده از دستگاه جعبه برش بزرگ‌مقیاس آزمایشگاه زیرسازی مسیر پیشرفته دانشکده مهندسی راه‌آهن دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شده است. دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس مذکور متشکل از دو جعبه به ابعاد (ارتفاع) ۱۸۰ × (عرض) ۴۴۰ ×

قرار دادن جعبه فوقانی، طول مازاد ژنوگرید در راستای بُعد ۱۸۰ میلی‌متری، از دو طرف بالا آمده و پس از افزودن و تراکم بالاست جعبه فوقانی در دو لایه، دو طرف ژنوگرید با استفاده از مفتول گالوانیزه با رعایت ناحیه هم‌پوشانی ۱۰۰ میلی‌متری به هم متصل شد. مراحل آماده‌سازی نمونه و نمای شماتیک از بالاست دورپیچ شده در دستگاه به برش مستقیم به ترتیب در شکل ۵ و شکل ۶ نمایش داده شده است.

در حالت بدون دورپیچی، پس از دانه‌بندی بالاست براساس نمودارهای دانه‌بندی نشان داده شده در شکل ۲، هر جعبه دستگاه برش مستقیم با دو لایه ۹۰ میلی‌متری از مصالح بالاست پر شده و با یک کوبه فلزی تا چگالی ۱۵۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب متراکم شده است. برای آماده‌سازی نمونه‌ی بالاست دورپیچ شده با ژنوگرید، پس از پهن کردن ژنوگرید در جعبه تحتانی سنگدانه‌های بالاست، نظیر حالت بدون دورپیچی، در دو لایه اضافه و متراکم شدند. پس از اتمام تراکم بالاست جعبه تحتانی و



(ب)



(الف)



(د)



(ج)



(و)

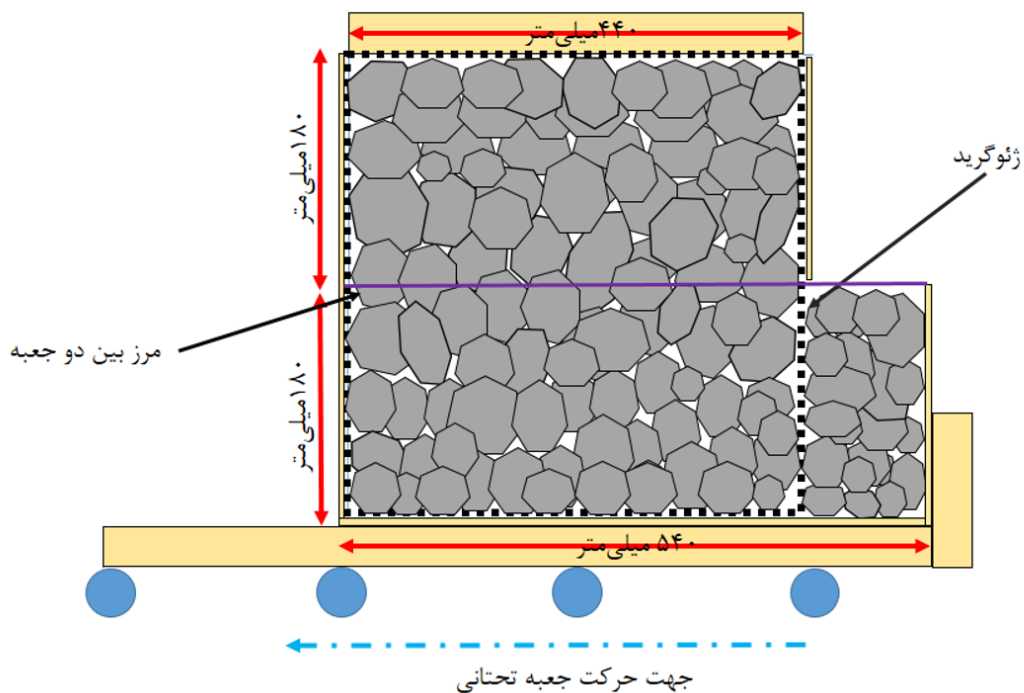


(ه)



(ز)

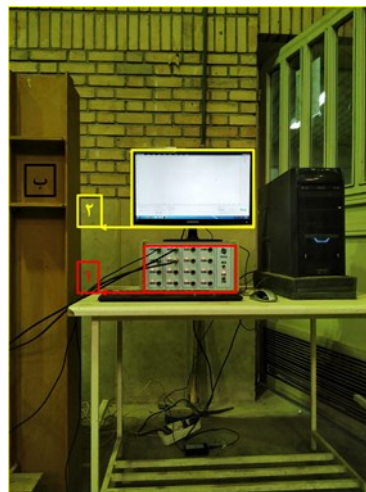
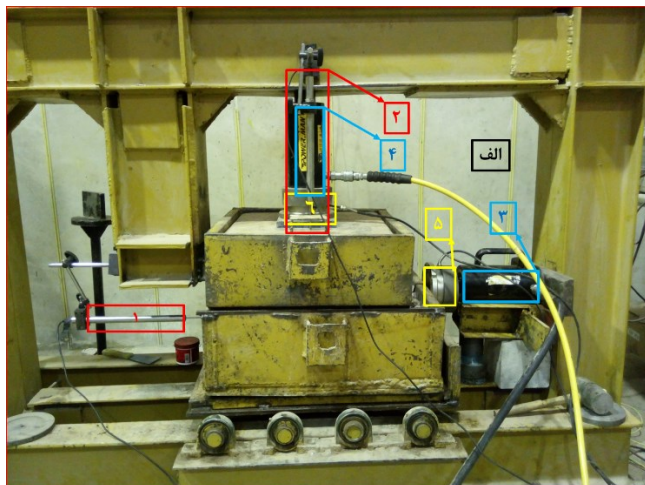
شکل ۵. مراحل آماده‌سازی نمونه در حالت دورپیچی: الف) جعبه تحتانی، ب) پهن کردن ژنوگرید در جعبه تحتانی، ج) لایه اول ۹ سانتی‌متری متراکم‌شده در جعبه تحتانی، د) پر و متراکم کردن جعبه تحتانی، ه) لایه اول ۹ سانتی‌متری متراکم‌شده در جعبه فوقانی، و) پر و متراکم نمودن جعبه فوقانی و اتصال دو لبه با مفتول و ز) رعایت فاصله ۱۰۰ میلی‌متری هم‌پوشانی



شکل ۶. تصویر شماتیک دستگاه آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس در حالت بالاست تسلیح‌شده با ژنوگرید (نما از رو به رو)

دو جک هیدرولیکی ۲۰۰ کیلونیوتن با دامنه جابجایی ۱۰۰ میلی‌متر به نمونه اعمال شد. ظرفیت نیرو سنج‌های قائم و افقی به کار برده شده برای اعمال نیرو، ۱۰۰ کیلونیوتن است. از سوی دیگر، تغییر مکان‌سنج‌های افقی و قائم دستگاه دارای کورس ۱۰۰ میلی‌متر و دقت ۰/۰۱ میلی‌متر می‌باشند. در عین

تمام آزمایش‌های برش مستقیم تحت سه تنش قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال تا تغییر مکان برشی ۶۶ میلی‌متر که متناظر با کرنش برشی ۱۵٪ است با نرخ برش ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد (ASTM، ۲۰۱۱؛ طلوع‌کیان و همکاران، ۲۰۱۸؛ صادقی و همکاران، ۲۰۲۰). نیروی قائم و برشی در طول آزمایش به وسیله



الف) دستگاه جعبه برش در حالت ابزاربندی شده		ب) دستگاه ثبت داده	
۲: تغییر مکان قائم	۱: تغییر مکان سنج افقی	۲) صفحه نمایش خروجی‌ها	۱) دستگاه ثبت داده (دیتالاگر ۱۶ کاناله)
۴: جک اعمال نیروی قائم	۳: جک اعمال نیروی افقی		
۶: نیروسنج قائم	۵: نیروسنج افقی		

شکل ۷. الف) دستگاه جعبه برش مستقیم ابزاربندی شده و ب) دستگاه ثبت داده

در این پژوهش، مجموعه‌ای مشتمل بر ۲۴ آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس روی بالاست گروه‌های دانه‌بندی یک و چهار در حالت بدون دورپیچی و دورپیچ شده با ژئوگریدهای مختلف، تحت تأثیر سه تنش قائم انجام شد. در ادامه، نتایج آزمایش‌ها به تفصیل مورد بررسی قرار داده می‌شود.

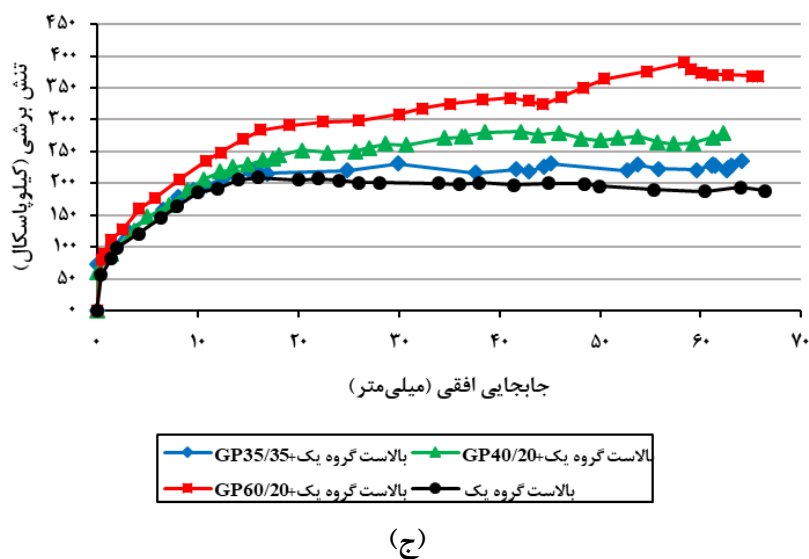
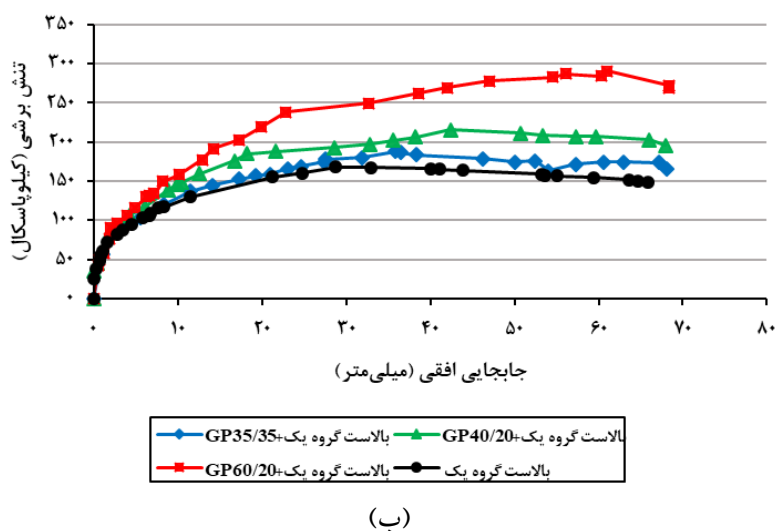
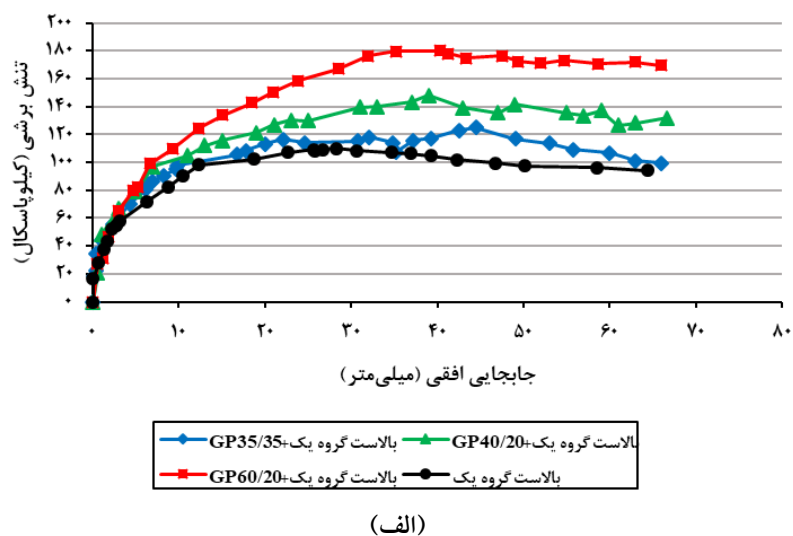
حال، سیستم دیتالاگر ۱۶ کاناله مورد استفاده جهت ثبت اطلاعات مدل ECL و فرکانس داده‌برداری ۱۰هرتز بوده است. شکل ۷، ابزاربندی نمونه و نحوه اعمال بارگذاری و ثبت نتایج را نشان می‌دهد.

۳. نتایج آزمایشگاهی و بحث

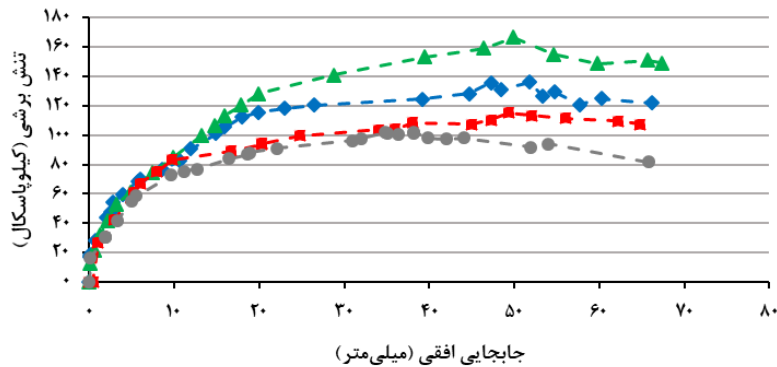
۳-۱. مقاومت برشی

منحنی تنش برشی - جابجایی افقی بالاست بدون تسلیح و دورپیچ شده با ژئوگریدهای گوناگون در شکل‌های ۸ و ۹ در حضور تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بدون توجه به دانه‌بندی و دورپیچی با افزایش تنش قائم، تنش برشی تا دست‌یابی به یک مقدار بیشینه افزایش و پس از آن دچار افت می‌شود که دلیل آن را می‌توان به از بین رفتن گوشه‌داری مصالح بالاست و شکست بالاست نسبت داد (ایننداراتنا و همکاران، ۲۰۱۱؛ دانش و همکاران، ۲۰۱۸؛ سوهر و همکاران، ۲۰۱۸؛ طلوع‌کیان و همکاران، ۲۰۱۸). همانطور که در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است، دانه‌بندی گروه یک با ضریب یکنواختی (G_u) ۲/۰۲ و بیشینه اندازه قطر سنگدانه (D_{max})، ۵۰ میلی‌متر نسبت به گروه چهار، در حضور همه تنش‌های قائم، مقاومت برشی بیشتری را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، تحت تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال، بیشینه مقاومت برشی بالاست گروه یک به ترتیب عبارتند از: ۱۱۰/۰۳، ۱۶۸/۱۴ و ۲۰۹/۴۵ کیلوپاسکال؛ لیکن، در مقابل، مقادیر فوق برای بالاست گروه چهار عبارتند از: ۱۰۲/۰۸، ۱۴۹/۶۹ و ۱۹۳/۱۳ کیلوپاسکال. مقدار بیشینه مقاومت برشی بالاست گروه یک را می‌توان به سهم بیشتر مصالح درشت‌دانه در دانه‌بندی گروه یک و یکنواختی بیشتر آن نسبت داد. زیرا، انتظار می‌رود عمده بار اعمالی توسط ذرات درشت‌دانه تحمل شده و با افزایش مقدار آن ظرفیت برشی افزایش یابد. همچنین، مقادیر بیشتر

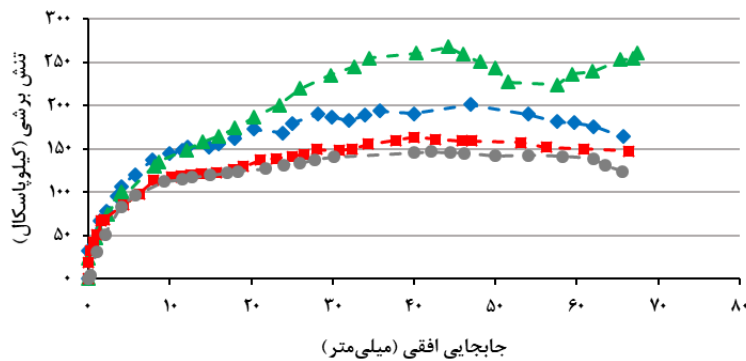
ضریب یکنواختی سبب قفل‌شدگی بهتر دانه‌ها می‌شود. در حالت دورپیچی بالاست با ژئوگرید، تنش برشی به‌طور قابل ملاحظه‌ای تا بازه جابجایی افقی ۳۰-۴۰ میلی‌متر در هر دو گروه دانه‌بندی بالاست افزایش یافته، پس از آن، با یک نرخ کاهشی، به افزایش مقاومت برشی خود ادامه می‌دهد که مشابه با حالت بدون دورپیچی، خردشدگی و زوال دانه‌های بالاست دلیل اصلی آن است (ایننداراتنا و همکاران، ۲۰۱۱). از سوی دیگر، با در نظر گرفتن تمام حالات بالاست دورپیچ شده با ژئوگرید، مشاهده می‌شود که با افزایش تنش قائم، تنش برشی نیز افزایش چشمگیری دارد. به‌عنوان مثال، تحت دورپیچی با ژئوگرید GP۳۵/۳۵، بیشینه مقاومت برشی بالاست گروه‌های یک و چهار به ترتیب از ۱۲۵/۱۶ و ۱۳۵/۸۵ کیلوپاسکال به ۲۳۹/۵۹ و ۲۷۰/۲۶ کیلوپاسکال افزایش یافته است (افزایش تنش قائم از ۵۰ به ۱۵۰ کیلوپاسکال). افزایش مقاومت برشی در حالت دورپیچی را می‌توان به افزایش میزان قفل‌شدگی و اندرکنش بین دانه‌های بالاست - چشمه ژئوگرید، که متعاقباً سبب پایداری بیشتر و افزایش ظرفیت باربری برشی آنها شده، نسبت داد. با توجه به شکل‌های ۱۰ و ۱۱، آشکار است که بیشینه مقاومت‌های برشی به‌دست آمده برای بالاست گروه‌های یک و چهار به ترتیب تحت دورپیچی با ژئوگریدهای GP۶۰/۲۰ و GP۴۰/۲۰ به‌دست آمده است. در این میان، نمونه بالاست گروه چهار دورپیچ شده با ژئوگرید GP۶۰/۲۰ کمترین میزان افزایش را از خود نشان داد، که دلیل اصلی آن کاهش قفل‌شدگی بین بالاست - چشمه ژئوگرید است.



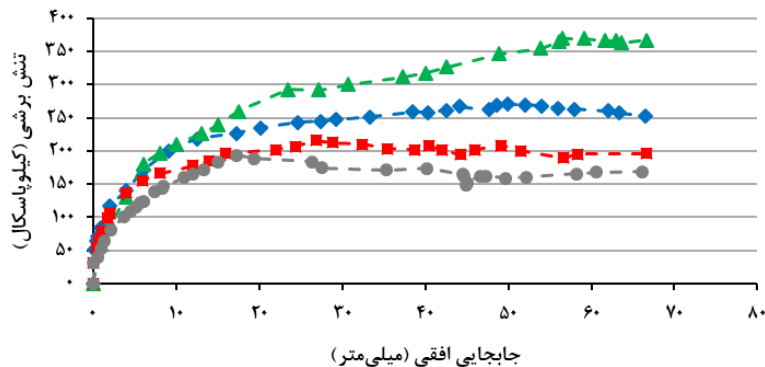
شکل ۸. نمودار تنش برشی - جابجایی افقی بالاست گروه یک در حالت با و بدون دورپیچی: الف) تحت تنش قائم ۵۰ کیلوپاسکال، ب) تحت تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال و ج) تحت تنش قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال



(الف)

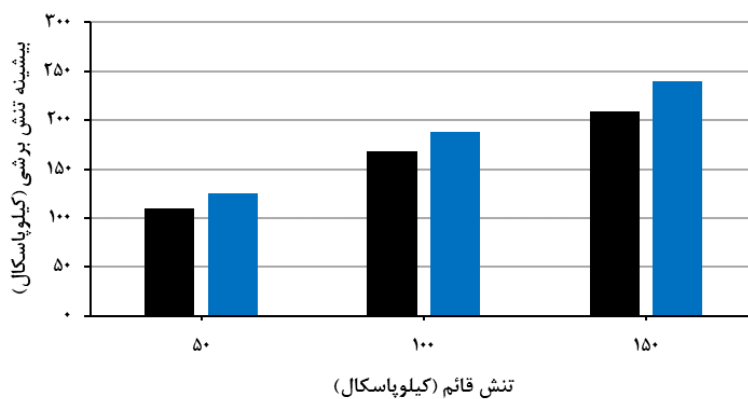


(ب)

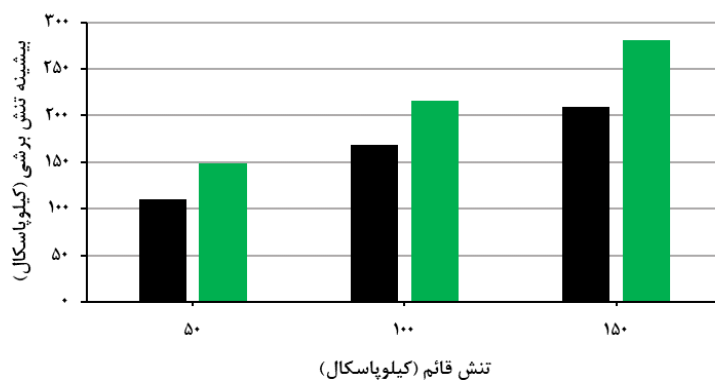


(ج)

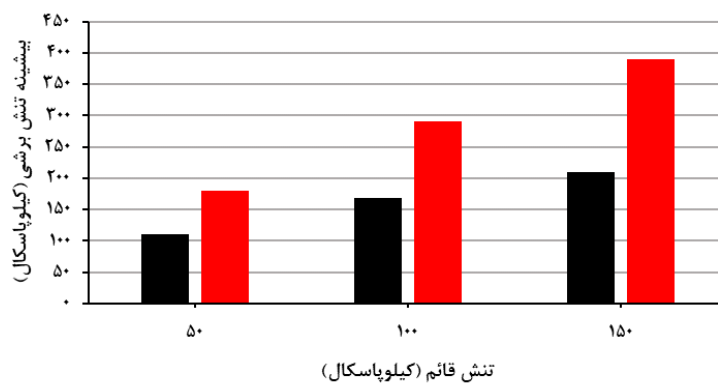
شکل ۹. نمودار تنش برشی - جابجایی افقی بالاست گروه چهار در حالت با و بدون دورپیچی: الف) تحت تنش قائم ۵۰ کیلوپاسکال، ب) تحت تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال و ج) تحت تنش قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال



(الف)

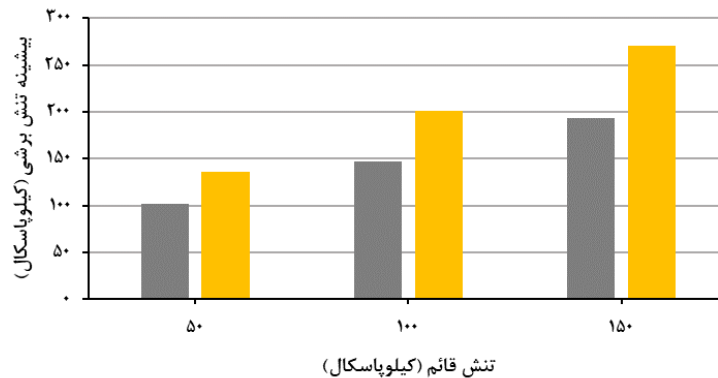


(ب)

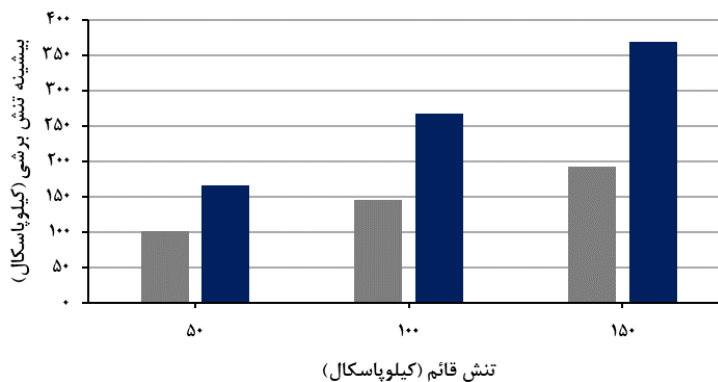


(ج)

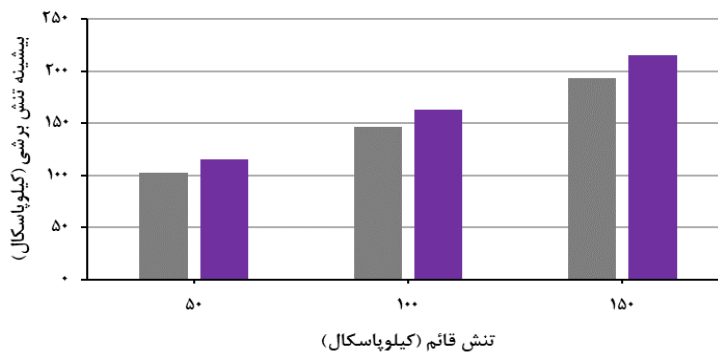
شکل ۱۰. نمودار بیشینه تنش برشی - تنش قائم بالاست گروه یک در حالت با و بدون دورپیچی: الف) ژنوگرید GP۳۵/۳۵، ب) ژنوگرید GP۴۰/۲۰ و ج) ژنوگرید GP۶۰/۲۰



(الف)



(ب)



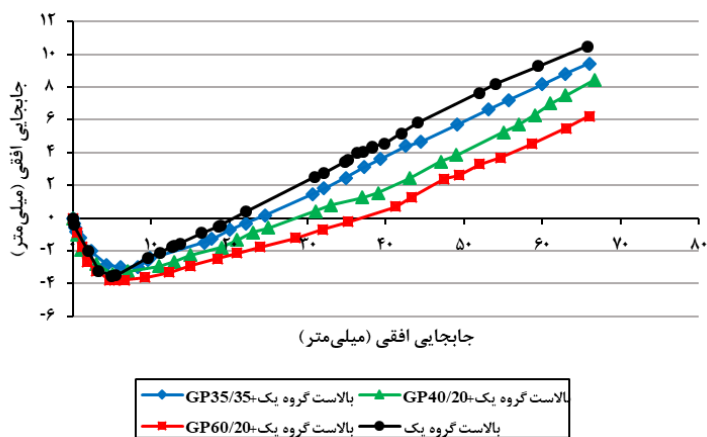
(ج)

شکل ۱۱. نمودار بیشینه تنش برشی - تنش قائم بالاست گروه چهار در حالت با و بدون دورپیچی: الف) ژنوگرید GP۳۵/۳۵، ب) ژنوگرید GP۴۰/۲۰ و ج) ژنوگرید GP۶۰/۲۰

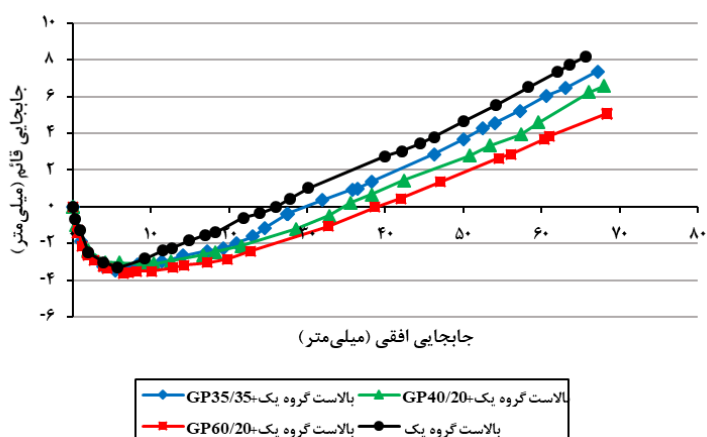
۳-۲. منحنی‌های جابجایی قائم - جابجایی افقی

نمودارهای جابجایی قائم - جابجایی افقی بالاست‌های گروه‌های یک و چهار در حالت‌های بدون ژئوگرید و دورپیچ شده با ژئوگرید در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است. بدون لحاظ اثر دانه‌بندی و دورپیچی بالاست، مشاهده می‌شود که در حضور همه‌ی تنش‌های قائم، تمام نمونه‌ها در ابتدای آزمایش منقبض شده‌اند. سپس، با پیشروی آزمایش، با یک رفتار اتساعی که منحصر به مصالح دانه‌ای متراکم بوده، دنبال می‌شود (دانش و همکاران، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۰؛ گانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ ایندراراتنا و همکاران، ۲۰۱۱، ۲۰۱۴؛ خارنقی و برابود، ۲۰۲۰؛ جیا و همکاران، ۲۰۱۹؛ میشرا و محمود، ۲۰۱۷؛ سوهر و همکاران، ۲۰۱۸؛ اسوتا و حسینی، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹؛ طلوع‌کیان و همکاران، ۲۰۱۸). باید خاطر نشان کرد که تغییرشکل نمونه‌های بالاست متأثر از توزیع دانه‌بندی آنها است (دانش و همکاران، ۲۰۱۸). به بیان دیگر، کمیت‌های دانه‌بندی نظیر بیشینه اندازه سنگ‌دانه و ضریب یکنواختی بر کرنش حجمی تأثیر می‌گذارند. مشاهده می‌شود که هنگامی که از طیف وسیع‌تری از دانه‌ها استفاده می‌شود، میزان اتساع کاهش می‌یابد که این مشاهده با یافته‌های دانش و همکاران (۲۰۱۸) و یان و دانگ (۲۰۱۱)، هماهنگی دارد. علاوه بر این، به دلیل آن که گروه یک نسبت به گروه چهار میزان درصد درشت‌دانه بیشتری دارد، لذا به هنگام اعمال نیروی برشی و جابجایی افقی طی فرآیند آزمایش برش مستقیم مشاهده می‌شود که مقدار جابجایی بالاست گروه یک در مقایسه با بالاست گروه چهار بیشتر است، که این رفتار

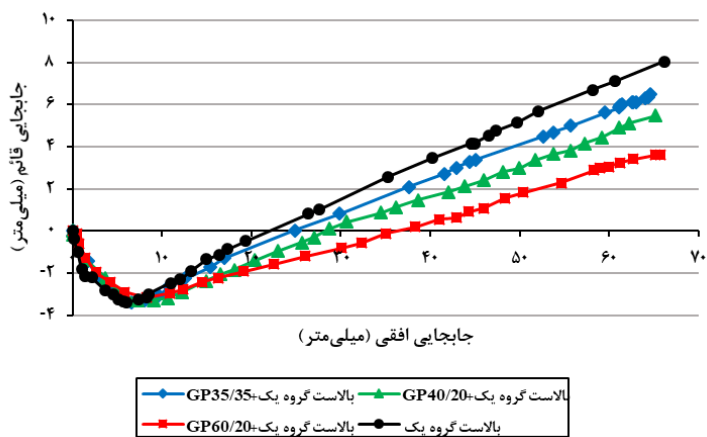
نیز با نتایج گزارش شده توسط باقرزاده خلخالی و میرقاسمی (۲۰۰۹) و سوهر و همکاران (۲۰۱۸) هماهنگی و سازگاری دارد. به عنوان مثال، تحت تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال، بیشینه اتساع بالاست‌های گروه‌های یک و چهار به ترتیب ۹ میلی‌متر و ۸/۳۲ میلی‌متر است. علاوه بر این، بر اساس شکل‌های ۱۲ و ۱۳ می‌توان گفت که فرآیند دورپیچی نیز میزان اتساع را کاهش داده است. کاهش اتساع ایجاد شده بر اثر دورپیچی در تحقیق حاضر، مشابه با مطالعات پیشین است (ایندراراتنا و همکاران، ۲۰۰۶، ۲۰۱۱، ۲۰۱۴، ۲۰۱۸؛ اسوتا و حسینی، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹). علت کاهش اتساع در حالت دورپیچی را می‌توان به این حقیقت نسبت داد که تسلیح بالاست با ژئوگرید سبب تشکیل مکانیسم قفل‌شدگی دانه بالاست - چشمه ژئوگرید می‌شود که نهایتاً منجر به مقیدسازی دانه‌های بالاست در درون چشمه‌های ژئوگرید و کاهش تغییرشکل آنها شده است (ایندراراتنا و همکاران، ۲۰۰۶، ۲۰۱۱، ۲۰۱۳، ۲۰۱۴؛ حسینی و همکاران، ۲۰۱۵، ۲۰۱۶؛ اسوتا و حسینی، ۲۰۱۹؛ صادقی و همکاران، ۲۰۲۰؛ انگو و همکاران، ۲۰۱۷، یو و همکاران، ۲۰۱۹). مطابق با شکل‌های (۱۲) و (۱۳)، ژئوگریدهای GP۶۰/۲۰ و GP۴۰/۲۰ به ترتیب بیشترین میزان کاهش اتساع را در گروه‌های یک و چهار داشته‌اند. به عنوان مثال، تحت تنش قائم ۵۰ کیلوپاسکال، بیشینه اتساع بالاست گروه یک دورپیچ شده با ژئوگرید GP۶۰/۲۰ از ۱۰/۴۸ به ۶/۲۲ میلی‌متر کاهش یافته است. این در حالی است که مشابه این رفتار در بالاست گروه چهار دورپیچ شده با ژئوگرید GP۴۰/۲۰ مشاهده می‌شود؛ یعنی کاهش بیشینه اتساع از مقدار ۹/۳۸ به ۶/۶۸ میلی‌متر.



(الف)

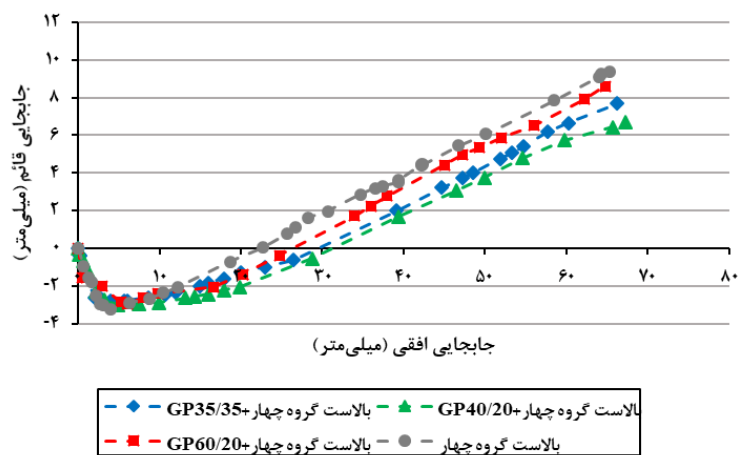


(ب)

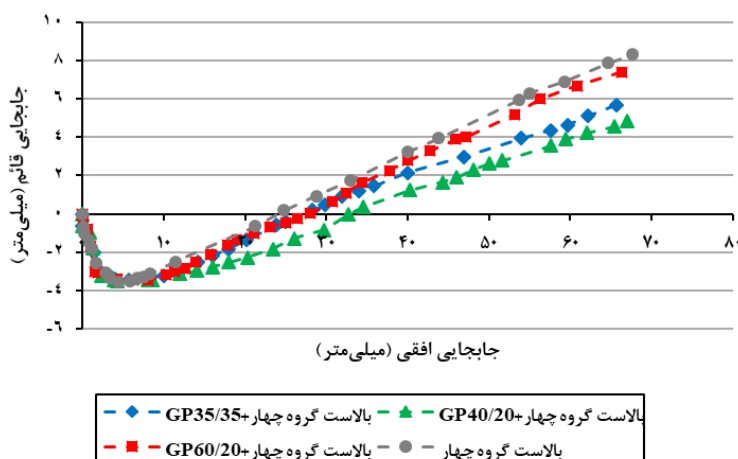


(ج)

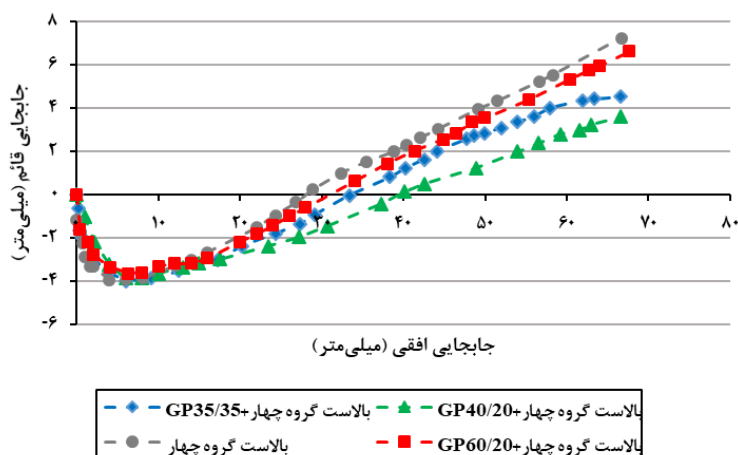
شکل ۱۲. نمودار جایجایی قائم-جایجایی افقی بالاست گروه یک در حالت با و بدون دورپیچی: (الف) تحت تنش قائم ۵۰ کیلوپاسکال، (ب) تحت تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال و (ج) تحت تنش قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال



(الف)



(ب)



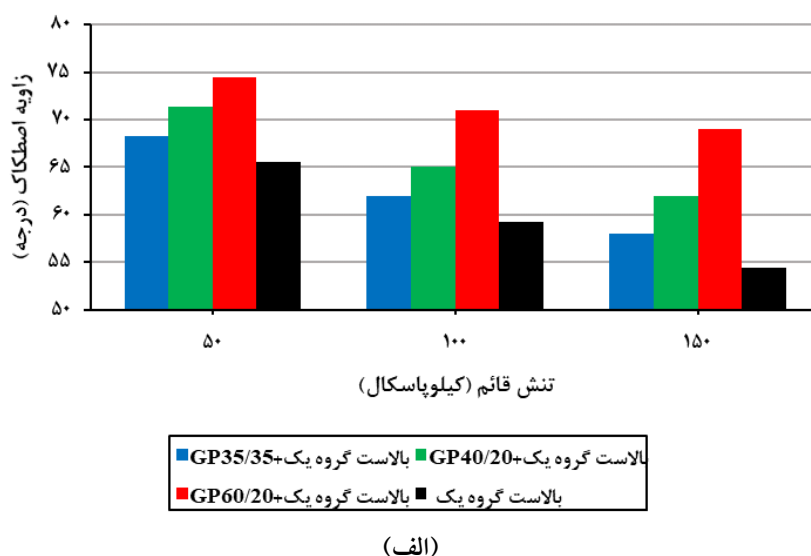
(ج)

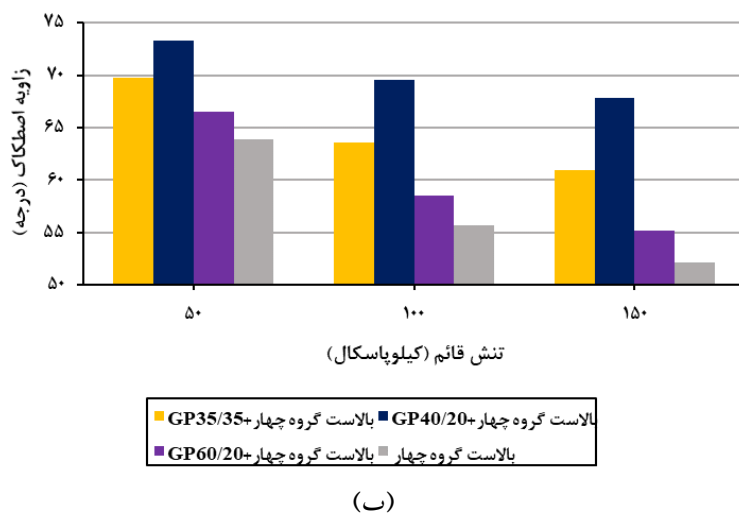
شکل ۱۳. نمودار جابجایی قائم-جابجایی افقی بالاست گروه چهار در حالت با و بدون دورپیچی: (الف) تحت تنش قائم ۵۰ کیلوپاسکال، (ب) تحت تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال و (ج) تحت تنش قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال

۳-۳. زاویه اصطکاک داخلی بالاست

تغییرات زاویه اصطکاک داخلی بالاست (φ) در حالت بدون و با دورپیچی بر حسب تنش قائم اعمالی در شکل ۱۴ ارائه شده است. زاویه اصطکاک در این پژوهش بر اساس تانژانت معکوس نسبت تنش (τ/σ_n) محاسبه شده است (دانش و همکاران، ۲۰۱۸؛ اسوتا و حسینی، ۲۰۱۹). مشاهده می‌شود که در حالت بالاست عادی، مقادیر زاویه اصطکاک بالاست گروه یک بیشتر از مقادیر به دست برای بالاست گروه چهار است. به عنوان مثال، مقدار φ بالاست عادی گروه‌های یک و چهار تحت تنش قائم ۵۰ کیلوپاسکال به ترتیب $65/56^\circ$ و $63/90^\circ$ است، که آن را می‌توان به مقاومت برشی زیاد ناشی از وجود ذرات درشت دانه موجود در گروه یک که منجر به افزایش ظرفیت باربری برشی شده نسبت داد (دانش و همکاران، ۲۰۱۸). با این حال، آشکار است که با افزایش تنش قائم، مقدار زاویه اصطکاک کاهش می‌یابد. برای مثال، با افزایش تنش قائم از ۵۰ کیلوپاسکال به ۱۰۰ کیلوپاسکال، زاویه اصطکاک بالاست گروه‌های یک و چهار به میزان

۱۷/۰۴ و $18/37^\circ$ درصد کاهش یافته که علت اصلی را می‌توان افزایش مقدار شکستگی دانه‌ها با افزایش تنش قائم دانست (اسوتا و حسینی، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹). با اعمال فرآیند دورپیچی برای بالاست گروه‌های یک و چهار، مقدار زاویه اصطکاک بالاست مسلح شده نسبت به حالت عادی آنها افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در حالت‌های دورپیچی بالاست گروه‌های یک و چهار با ژئوگرید GP۳۵/۳۵ تحت تنش قائم ۵۰ کیلوپاسکال، زاویه اصطکاک به ترتیب از $65/56^\circ$ و $63/90^\circ$ به $68/22^\circ$ و $69/79^\circ$ افزایش یافته که بیانگر افزایش $4/06$ و $9/22$ درصد است. همچنین، مقدار افزایش زاویه اصطکاک تحت تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال در بالاست گروه‌های یک و چهار به ترتیب عبارت است از $4/56$ و $14/06$ درصد. لیکن مشابه با حالت بدون دورپیچی، مقدار زاویه اصطکاک با افزایش تنش قائم کاهش می‌یابد. این مشاهدات با نتایج ارائه شده توسط اینداراراتنا و همکاران (۱۹۹۸، ۲۰۱۲)، لیو و همکاران (۲۰۱۵) و اسوتا و حسینی (۲۰۱۸، ۲۰۱۹) هماهنگی و سازگاری دارد.





شکل ۱۴. نمودار زاویه اصطکاک- تنش قائم: الف) بالاست گروه یک در حالت با و بدون دورپیچی و ب) بالاست گروه چهار در حالت با و بدون دورپیچی

۳-۴. زاویه اتساع بالاست

زاویه اتساع محاسبه شده در این پژوهش بر اساس رابطه ارائه شده توسط بولتون (۱۹۸۶) و سیمونی و هولسبای (۲۰۰۶) استخراج گردیده است:

$$\psi = \tan^{-1} \frac{d(d_v)}{d(d_h)} \quad (1)$$

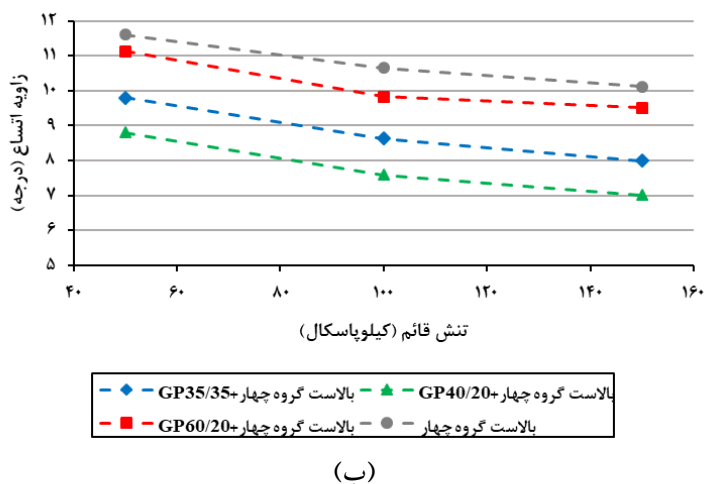
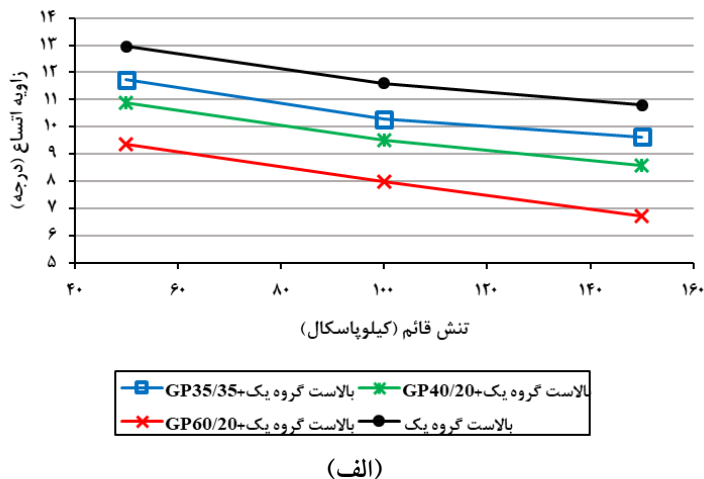
که ψ زاویه اتساع، $d(d_v)$ تغییرات جابجایی قائم و $d(d_h)$ تغییرات جابجایی افقی است.

شکل ۱۵ تغییرات زاویه اتساع را نسبت به تغییرات تنش قائم نشان می‌دهد. آشکار است که با افزایش تنش قائم در تمامی حالات، مقدار زاویه اتساع کاهش می‌یابد. با توجه به آنکه مقادیر بیشینه اتساع بالاست گروه یک نسبت به گروه چهار بزرگتر بوده است از همین رو تحت تنش‌های قائم یکسان، مقدار زاویه اتساع آن نسبت به گروه چهار نیز بیشتر است. برای مثال، تحت تنش قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال، زاویه اتساع گروه یک به ترتیب $12/97^\circ$ ، $11/60^\circ$ و $10/80^\circ$ است. در عوض، مقادیر اتساع بالاست گروه چهار تحت شرایط فوق عبارتند از $11/60^\circ$ ، $10/65^\circ$ و $10/11^\circ$. اما با به کارگیری ژئوگرید به عنوان لایه دورپیچ، مقادیر سبب کاهش مقادیر

زاویه اتساع می‌شود. برای مثال، به هنگام دورپیچی بالاست گروه‌های یک و چهار با ژئوگرید GP35/35 تحت تنش قائم ۵۰ کیلوپاسکال، مقدار زاویه اتساع به ترتیب عبارتند از $11/33^\circ$ و $9/8^\circ$ که بر کاهش $9/54$ و $15/45$ درصد دلالت می‌کند. دلیل اصلی کاهش زاویه اتساع در حالت دورپیچی نسبت به حالت بدون دورپیچی، قفل‌شدگی مؤثر دانه‌های بالاست- چشمه‌های ژئوگرید است که باعث کاهش جابجایی آنها می‌شود، که این روند با مطالعات اسوتا و حسینی (۲۰۱۸، ۲۰۱۹)، انگو و همکاران (۲۰۱۴، ۲۰۱۸) و اینداراراتنا و همکاران (۲۰۱۱، ۲۰۱۴) مطابقت دارد. لازم به ذکر است که بیشترین کاهش در مقدار زاویه اتساع تحت فرآیند دورپیچی با ژئوگرید برای گروه‌های یک و چهار به ترتیب به واسطه دورپیچی با ژئوگریدهای GP60/20 و GP40/20 به دست آمده به گونه‌ای که درصد کاهش زاویه اتساع در حضور تنش قائم ۵۰ کیلوپاسکال به ترتیب عبارتند از $27/92$ درصد (GP60/20) و $24/17$ درصد (GP40/20). با این وجود، ملاحظه می‌شود که در بالاست گروه چهار، علیرغم مقاومت کششی بیشینه

بالاست گروه چهار دورپیچ شده با ژنوگرید GP60/20 عبارت است از ۶/۰۸، ۷/۶۸ و ۵/۹۹ درصد، که نشان-دهنده کمترین درصد در مقایسه با سایر حالت‌های دورپیچی است.

ژنوگرید GP60/20، ژنوگرید مذکور کمترین میزان اثرگذاری را در کاهش زاویه اتساع داشته است؛ که دلیل عمده آن کاهش میزان قفل‌شدگی بالاست-چشمه ژنوگرید می‌باشد. به عنوان مثال، تحت تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال میزان کاهش زاویه اتساع برای



شکل ۱۵. نمودار زاویه اتساع-تنش قائم: الف) بالاست گروه یک در حالت با و بدون دورپیچی و ب) بالاست گروه چهار در حالت با و بدون دورپیچی

به عدم وجود قفل‌شدگی کامل دانه بالاست-دانه بالاست در مقایسه با قفل‌شدگی کامل بالاست-چشمه ژنوگرید در حالت تسلیح نسبت داد. به بیان دیگر، هنگامی که سنگدانه‌های بالاست با ژنوگرید دورپیچ شده، قفل‌شدگی مابین بالاست-چشمه ژنوگرید در مقایسه قفل‌شدگی بالاست-بالاست قوی‌تر شده که قادر به افزایش مقاومت برشی است. در بالاست گروه یک، عملکرد ژنوگرید

۳-۵. اثر نسبت اندازه چشمه به میانگین اندازه سنگدانه (A/D_{50}) بر رفتار برشی بالاست همانطور که انتظار می‌رفت، تسلیح بالاست با ژنوگرید، عملکرد برشی آن را نسبت به حالت بدون تسلیح، بهبود چشمگیری داد. دلیل تفاوت بین رفتار بالاست دورپیچ شده با بالاست بدون تسلیح‌سازی با ژنوگرید را می‌توان

گروه چهار، ژئوگرید GP۴۰/۲۰ بهترین عملکرد را در بین ژئوگریدهای مختلف داشته است. مضاف بر آن، مرور ادبیات فنی نشان می‌دهد که محققین برای بیان ارتباط بین اندازه دانه‌های بالاست و چشمه ژئوگرید از کمیته نظیر A/D_{50} (A) اندازه چشمه ژئوگرید و D_{50} میانگین اندازه سنگدانه بالاست) بهره برده‌اند (اینداراتنا و همکاران، ۲۰۱۲؛ اسوتا و حسینی ۲۰۱۸، ۲۰۱۹). به دلیل آنکه در این پژوهش از ژئوگریدهایی با چشمه‌های مربع و مستطیل شکل استفاده شده، لذا برای ژئوگرید مستطیلی، اندازه چشمه معادل به صورت ریشه دوم مساحت داخل چشمه تعریف می‌شود، که مقادیر آن در جدول ۳ ارائه شده است.

GP۴۰/۲۰ در مقایسه با ژئوگرید GP۳۵/۳۵ بهتر بوده که دلیل اصلی آن، افزایش مقاومت کششی ژئوگرید GP۴۰/۲۰ نسبت به ژئوگرید GP۳۵/۳۵ است. این روند نیز در بالاست گروه چهار دورپیچ شده با ژئوگریدهای مذکور قابل مشاهده است. اما با مقایسه پارامترهای برشی حاصل از دورپیچی با ژئوگرید GP۶۰/۲۰، مشاهده می‌شود که اثر دورپیچی بر رفتار برشی بالاست گروه یک نسبت به بالاست گروه چهار به مراتب بیشتر است. این تفاوت در کاهش کارایی ژئوگرید GP۶۰/۲۰ در دورپیچی بالاست گروه چهار را اساساً می‌توان به حرکت آزادانه دانه‌های بالاست در درون چشمه‌ی ژئوگرید نسبت داد که در نهایت منجر به مقاومت کمتر در طول برش می‌شود. ولیکن در مقابل، نتایج نشان می‌دهد که در

جدول ۳. مقدار کمیته A/D_{50} بالاست‌های گروه‌های یک و چهار در حالت دورپیچی

A/D_{50}	اندازه چشمه معادل، A (میلی‌متر)	ژئوگرید	میانگین اندازه سنگدانه بالاست، A/D_{50} (میلی‌متر)	بلاست
۰/۷۲	۲۹/۵۸	GP۳۵/۳۵		گروه یک
۰/۷۲	۲۹/۵۸	GP۴۰/۲۰	۴۱/۳۱	
۰/۸۴	۳۵	GP۶۰/۲۰		
۰/۹۴	۲۹/۵۸	GP۳۵/۳۵		گروه چهار
۰/۹۴	۵۸۲۹	GP۴۰/۲۰	۳۱/۵۵	
۱/۱	۳۵	GP۶۰/۲۰		

به دست آمده برای نسبت بهینه A/D_{50} را می‌توان به تفاوت در فرآیند تسلیح (افزایش میزان اندرکنش بالاست-ژئوگرید در حالت دورپیچی نسبت به حالت استفاده لایه) و همچنین محدودیت موجود در استفاده از دانه‌بندی و ژئوگریدها، چه از لحاظ شکل چشمه و چه از لحاظ اندازه چشمه، نسبت داد. بنابراین، نیاز است که این موضوع در مطالعات آتی برای نیل به هدف تعیین هرچه دقیق‌تر بازه مذکور با انواع مختلف ژئوگرید (شکل و اندازه چشمه مختلف) و دانه‌بندی‌های مختلف مورد

با توجه به مقادیر جدول ۳، مقادیر مناسب نسبت A/D_{50} برای بالاست‌های گروه‌های یک و چهار به ترتیب عبارتند از ۰/۸۴ و ۰/۹۲، که به واسطه آنها بهترین عملکرد برشی حاصل شده است. نتایج به دست آمده از مطالعات پیشین مرتبط با سطح تماس بالاست-ژئوگرید که یک مقدار بخصوص حداقل برای نسبت A/D_{50} به منظور دستیابی به فواید تسلیح با ژئوگرید تعیین کرده‌اند، نظیر مطالعات اینداراتنا و همکاران (۲۰۱۲) و اسوتا و حسینی (۲۰۱۸) مغایرت دارد. دلایل احتمالی برای تفاوت در مقادیر

مطالعه و بررسی قرار گیرد.

۴. نتیجه گیری

در این تحقیق، اثر دورپیچ کردن بالاست با ژنوگرید بر مقاومت برشی دانه‌بندی‌های مختلف بالاست مطالعه شد. برای بررسی این موضوع، دو گروه دانه‌بندی مطابق با دانه‌بندی‌های نشریه ۳۰۱ انتخاب شد و اثر دورپیچی با سه نوع ژنوگرید با شکل، اندازه چشمه و مقاومت کششی مختلف با بهره‌گیری از آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس بر رفتار برشی آنها تحت سه تنش قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال بررسی شد. نتایج نشان داد که مقادیر کمیت‌های مقاومت برشی متأثر از دانه‌بندی استفاده شده و تنش قائم اعمالی است. همچنین، دورپیچی بالاست با ژنوگرید سبب بهبود رفتار برشی بالاست نسبت به حالت بدون تسلیح آن گردیده است. اهم نتایج به‌دست آمده به قرار زیر است:

- در حالت بدون دورپیچی، با تغییر دانه‌بندی از گروه چهار به گروه یک، مقاومت برشی، بیشینه اتساع، زاویه اصطکاک و زاویه اتساع را به‌طور میانگین به ترتیب ۱۰/۲۹، ۴/۴۱، ۱۰/۳۹ و ۹/۱۳ درصد افزایش می‌دهد.

- دورپیچ کردن بالاست باعث بهبود چشمگیر رفتار برشی آن شده، به گونه‌ای که در گروه یک، بهترین عملکرد به‌واسطه ژنوگرید GP۶۰/۲۰ حاصل شد. به طوری که تحت دورپیچی با آن ژنوگرید، بیشینه مقدار افزایش مقاومت برشی، زاویه اصطکاک، کاهش اتساع و کاهش زاویه اتساع به ترتیب عبارتند از ۸۶/۱۴، ۲۶/۷۸، ۵۵/۱۵ و ۳۷/۷۴ درصد.

- در گروه چهار، دورپیچی با ژنوگرید GP۴۰/۲۰ به ترتیب سبب افزایش ۹۱/۱۰ و ۳۰/۱۳ درصدی مقاومت برشی و زاویه اصطکاک شده، مضاف بر آن که بیشینه اتساع و زاویه اتساع را ۵۰/۴۴ و ۳۰/۶۱ درصد کاهش می‌دهد، که در مقایسه با سایر ژنوگریدها بهترین عملکرد را از خود نشان داد.

کارایی ژنوگرید در بهبود عملکرد برشی مصالح بالاست، علاوه بر این که تابعی از مقاومت کششی ژنوگریدها بوده، متأثر از نسبت A/D_{50} نیز می‌باشد. این مطالعه، آشکار ساخت که در فرآیند دورپیچی، بازه مناسب برای نسبت مذکور در حدود $1/1 < A/D_{50} \leq 0.74$ قرار دارد

۵. مراجع

- ASTM D3080. 2011. "Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions". ASTM International, West Conshohocken.
- Bagherzadeh-Khalkhali, A. and Mirghasemi, A. A. 2009. "Numerical and experimental direct shear tests for coarse-grained soils". *Particuol.*, 7(1): 83-91.
- Biabani, M. M. and Indraratna, B. 2015. "An evaluation of the interface behaviour of rail subballast stabilised with geogrids and geomembranes". *Geotext. Geomembranes*, 43(3): 240-249.
- Biabani, M. M., Indraratna, B. and Ngo, N. T. 2016. "Modelling of geocell-reinforced subballast subjected to cyclic loading". *Geotext. Geomembranes*, 44(4): 489-503.
- Bolton, M. 1986. "The strength and dilatancy of sands". *Geotech.*, 36(1): 65-78.
- Brown, S., Kwan, J. and Thom, N. 2007. "Identifying the key parameters that influence geogrid reinforcement of railway ballast". *Geotext. Geomembranes*, 25(6): 326-335.
- Chawla, S. and Shahu, J. 2016. "Reinforcement and mud-pumping benefits of geosynthetics in railway tracks: Model tests". *Geotext. Geomembranes*, 44(3): 366-380.
- Danesh, A., Mirghasemi, A. A. and Palassi, M. 2020. "Evaluation of particle shape on direct shear mechanical behavior of ballast assembly using discrete element method (DEM)". *Transport. Geotech.*, 23: 100357.
- Danesh, A., Palassi, M. and Mirghasemi, A. A. 2018a. "Effect of sand and clay fouling on the shear strength of railway ballast for different ballast gradations". *Granul. Matter*, 20(3): 1-14.

- Danesh, A., Palassi, M. and Mirghasemi, A. A. 2018b. "Evaluating the influence of ballast degradation on its shear behaviour". *Int. J. Rail Transport.*, 6(3): 145-162.
- Das, B. M. 2016. Use of "geogrid in the construction of railroads". *Innov. Infrastruct. Solutions*, 1(1): 1-12.
- Esmaeili, M., Zakeri, J. A. and Babaei, M. 2017. "Laboratory and field investigation of the effect of geogrid-reinforced ballast on railway track lateral resistance". *Geotext. Geomembranes*, 45(2): 23-33.
- Fernandes, G., Palmeira, E. M. and Gomes, R. C. 2008. "Performance of geosynthetic-reinforced alternative sub-ballast material in a railway track". *Geosynth. Int.*, 15(5): 311-321.
- 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.
- Geoparsian. 2020. "Geoparsian Geosynthetics". Retrieved from <https://geoparsian.com>
- Hussaini, S. K. K., Indraratna, B. and Vinod, J. S. 2015. "Performance assessment of geogrid-reinforced railroad ballast during cyclic loading". *Transport. Geotech.*, 2: 99-107.
- Hussaini, S. K. K., Indraratna, B. and Vinod, J. S. 2016. "A laboratory investigation to assess the functioning of railway ballast with and without geogrids". *Transport. Geotech.*, 6: 45-54.
- Indraratna, B., Ionescu, D. and Christie, H. 1998. "Shear behavior of railway ballast based on large-scale triaxial tests". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 124(5): 439-449.
- 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 Improvement*, 10(3): 91-101.
- Indraratna, B., Ngo, N. T. and Rujikiatkamjorn, C. J. G. 2011. "Behavior of geogrid-reinforced ballast under various levels of fouling". *Geotext. Geomembranes*, 29(3): 313-322.
- Indraratna, B., Hussaini, S. K. K. and Vinod, J. S. 2012. "On the shear behavior of ballast-geosynthetic interfaces". *Geotech. Test. J.*, 35(2): 305-312.
- Indraratna, B., Hussaini, S. K. K. and Vinod, J. 2013. "The lateral displacement response of geogrid-reinforced ballast under cyclic loading". *Geotext. Geomembranes*, 39: 20-29.
- Indraratna, B., Ngo, N. T., Rujikiatkamjorn, C. and Vinod, J. 2014. "Behavior of fresh and fouled railway ballast subjected to direct shear testing: Discrete element simulation". *Int. J. Geomech.*, 14(1): 34-44.
- 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.
- Kharanaghi, M. M. and Briaud, J. L. 2020. "Large-scale direct shear test on railroad ballast". *Proceedings of the Geo-Congress 2020: Modeling, Geomaterials, and Site Characterization*.
- Liu, J., Wang, P. and Liu, J. 2015. "Macro-and micro-mechanical characteristics of crushed rock aggregate subjected to direct shearing". *Transport. Geotech.*, 2: 10-19.
- Mishra, D. and Mahmud, S. N. 2017. "Effect of particle size and shape characteristics on ballast shear strength: A numerical study using the direct shear test". *Proceedings of the ASME/IEEE Joint Rail Conference*.
- Ngo, N. T., Indraratna, B. and Rujikiatkamjorn, C. 2014. "DEM simulation of the behaviour of geogrid stabilised ballast fouled with coal". *Comput. Geotech.*, 55: 224-231.
- Ngo, N. T., Indraratna, B. and Rujikiatkamjorn, C. 2017. "A study of the geogrid-subballast interface via experimental evaluation and discrete element modelling". *Granul. Matter*, 19(3): 1-16.
- Ngo, N. T., Indraratna, B., Ferreira, F. B. and Rujikiatkamjorn, C. 2018. "Improved performance of geosynthetics enhanced ballast: Laboratory and numerical studies". *Proc. Inst. Civ. Eng.-Ground Improvement*, 171(4): 202-222.
- Oh, J. 2013. "Parametric study on geogrid-reinforced track substructure". *Int. J. Railway*, 6(2): 59-63.
- 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.
- Simoni, A., Houlby, G. T. 2006. "The direct shear strength and dilatancy of sand-gravel mixtures". *Geotech. Geol. Eng.*, 24(3): 523-549.
- Suhr, B., Marschnig, S. and Six, K. J. G. 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. 2018. "Effect of shearing rate on the behavior of geogrid-reinforced railroad ballast under direct shear conditions". *Geotext. Geomembranes*, 46(3): 251-256.
- 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.
- 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.

- VPSPS. 2005. "Iranian national code 301: General technical specification of superstructure of ballasted railway track". VPSPS Islamic Republic of Iran, Tehran, Iran.
- Yan, W. and Dong, J. 2011. Effect of particle grading on the response of an idealized granular assemblage". *Int. J. Geomech.*, 11(4): 276-285.
- Yu, Z., Woodward, P., Laghrouche, O. and Connolly, D. P. 2019. True triaxial testing of geogrid for high-speed railways". *Transport. Geotech.*, 20: 100247.

لیست علائم اختصاری:

ϕ : زاویه اصطکاک

T : تنش برشی

σ_n : تنش قائم

λ : زاویه اتساع

A: اندازه چشمه معادل ژنوگرید