

تأثیر سرعت برش، سطح تنش عمودی و جنس بلوک‌های درگیر بر سختی برشی درزه‌های سنگی

مهدی موسوی^۱، هادی عطاپور^{۲*}

پذیرش مقاله: ۹۰/۱۲/۳

دریافت مقاله: ۹۰/۸/۴

چکیده

یکی از پارامترهای مهم درزه‌های سنگی، سختی برشی (Shear Stiffness) آنها است. سختی برشی درزه‌ها به همراه سختی عمودی، از داده‌های اصلی ورودی در مدل‌سازی‌های عددی توده‌سنگ‌های درزه‌دار است. عوامل مختلفی بر مقدار سختی برشی درزه‌های سنگی تأثیر می‌گذارد. در این مقاله به بررسی اثر سرعت برش، سطح تنش عمودی و جنس بلوک‌های درگیر بر سختی برشی درزه‌های سنگی پرداخته شده است. آزمایش‌های برش مستقیم بر روی درزه‌های مصنوعی ساخته شده از مواد گچ، بتن و حالت ترکیبی گچ - بتن در سطوح تنش عمودی مختلف و سرعت‌های برش در محدوده‌ی ۰/۳-۳۰ mm/min انجام گرفته است. نتایج آزمایش‌های انجام گرفته نشان داد که با افزایش سرعت برش، سختی برشی کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش سطح تنش عمودی - بر خلاف افزایش سرعت برش - سختی برشی به شکل خطی افزایش می‌یابد. این رابطه با عنوان «پوش خطی سختی برشی» تعریف شد. قابل ذکر می‌باشد که نتایج فوق برای هر سه نوع درزه‌ی نرم، سخت و حالت ترکیبی گچ - بتن صادق است.

کلید واژه‌ها: درزه‌های سنگی، سختی برشی، پوش سختی، سرعت برش

۱. دانشیار دانشکده‌ی مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

۲. کارشناس ارشد مهندسی مکانیک سنگ از دانشگاه تهران؛ atapour@ut.ac.ir

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

نسبت عکس وجود دارد. باندیس (Bandis, 1980) نیز نشان داده است که این پارامتر، به اندازه‌ی نمونه‌های آزمایش شده بستگی دارد. جان (John, 1970) بیان کرده است که پارامتر سختی برشی (K_s) عمدتاً با افزایش تنش عمودی زیاد می‌شود. از طرفی روسو (Rosso, 1976) اشاره کرده است که مقادیر سختی برشی تحت تأثیر تکنیک آزمایشگاهی نیز قرار می‌گیرد. وابستگی سختی برشی به ضریب زبری درزه (JRC) و مقاومت فشاری دیواره‌ی درزه (JCS) نیز توسط باندیس و همکاران گزارش شده است (Bandis et al., 1983).

همان‌طور که در بالا اشاره شد، اثر پارامترهایی همچون سطح تنش عمودی، ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش بر سختی برشی تا حدودی توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته است. در این میان اثر سرعت برش بر سختی برشی چندان مشخص نیست. از آن‌جا که در موارد متعددی درزه‌ها تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی و نیز دینامیکی قرار می‌گیرند، بررسی اثر این پارامتر بر سختی برشی اهمیت می‌یابد. در این مقاله نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی سختی برشی درزه‌های سنگی ارائه شده است. به‌طوری که اثر پارامترهای سرعت برش، سطح تنش عمودی و همچنین جنس بلوک‌های درگیر بر روی سختی برشی بررسی شده است. آزمایش‌های برش با توجه به هموار بودن سطوح درزه، تحت شرایط مرزی بار عمودی ثابت^۴ انجام گرفته است. قابل ذکر است که درزه‌ها تحت شرایط مرزی سختی عمودی ثابت^۵ رفتار برشی متفاوتی دارند (عطاپور و موسوی، ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰؛ Indraratna and Haque, 1997; Jiang et al., 2004).

۲. بررسی‌های آزمایشگاهی

۲-۱. آماده‌سازی نمونه‌ها

گچ به علت ارزان و در دسترس بودن، به طور گسترده در ساختن نمونه‌ی ناپیوستگی سنگ‌های نرم مورد استفاده قرار می‌گیرد. تهیه‌ی نمونه ناپیوستگی از این ماده راحت بوده و از طرفی مقاومت دراز مدت آن مستقل از زمان می‌باشد. گچ

تغییر شکل ناپیوستگی‌ها در حقیقت اصلی‌ترین جزء واکنش توده‌سنگ درزه‌دار به تغییر شرایط تنش می‌باشد (Bandis et al., 1983). تغییر شکل‌پذیری درزه‌ها را می‌توان با تعیین منحنی‌های تنش- تغییر شکل شرح داد. سختی درزه‌های سنگی اصطلاحی است که برای تشریح این منحنی‌ها در هر دو جهت عمودی و مماسی استفاده می‌شود. گودمن و همکاران (Goodman et al., 1968) عبارت‌های سختی عمودی^۳ (K_n) و سختی برشی (K_s) را به ترتیب برای بیان نرخ تغییرات تنش عمودی- جابه‌جایی عمودی و تنش برشی- جابه‌جایی برشی، معرفی کرده‌اند. ویژگی‌های سختی برشی و عمودی توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است (Kanji, Bandis et al., 1983; Kulhaway 1978; Infanti and John, 1970; Rosso, 1976). کمیت‌های بالا به همراه مقادیر جابه‌جایی برشی اوج، جابه‌جایی برشی باقیمانده و بیشینه‌ی بسته شدن ناپیوستگی امکان محاسبه‌ی سهم ناپیوستگی‌ها در جابه‌جایی کل توده‌سنگ را فراهم می‌کند (Bandis et al., 1983).

سختی برشی و سختی عمودی درزه‌ها از مهم‌ترین ورودی‌های مدل‌سازی عددی توده‌سنگ‌های درزه‌دار است. (Bandis et al., 1983; Goodman et al., 1968; Barton, 1972). همچنین سختی عمودی درزه به شکل بنیادینی در ارتباط با جریان سیال در سنگ درزه‌دار است (Bandis et al., 1983). بنابراین شناخت عوامل موثر بر سختی درزه‌های سنگی در اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مورد نیاز بوده تا تعیین مقدار آن به شکل مناسب و صحیح انجام گیرد.

مطالعات نشان داده است که سطح تنش عمودی و همچنین اندازه‌ی نمونه‌ها از جمله پارامترهای مؤثر بر سختی برشی می‌باشند. از نتایج آزمایش‌های برش انجام گرفته توسط بارتن (Barton, 1972) مشخص شده است که سختی برشی (تنش برشی پیک در واحد جابه‌جایی مماسی) وابسته به سطح تنش عمودی و همچنین ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش می‌باشد. به‌طوری که بین ابعاد نمونه‌های آزمایشی و سختی برشی

این دستگاه قادر به انجام آزمایش برش با سرعت‌های مختلف برشی و بر روی نمونه‌های با ابعاد متغیر است.

برای درزه‌های نمونه‌ی گچ از بلوک‌هایی به ابعاد $۱۱۵ \times ۱۰۵ \times ۶۵$ میلی‌متر استفاده شد (شکل ۱- الف). آزمایش‌های برش برای این نمونه‌ها در سه سطح تنش عمودی $۰/۶$ ، $۱/۲$ و $۱/۸$ مگاپاسکال طی سه مرحله انجام گرفت. به طوری که ابتدا در سطح تنش عمودی $۰/۶$ مگاپاسکال آزمایش شروع شد و بعد از رسیدن نمونه به مقاومت برشی اوج، تنش عمودی به مقدار $۱/۲$ مگاپاسکال افزایش یافت. پس از رسیدن نمونه به مقاومت برشی اوج خود، در این سطح تنش عمودی و ثابت ماندن مقاومت برشی طی جابه‌جایی برشی، مجدداً تنش عمودی به مقدار $۱/۸$ مگاپاسکال افزایش یافت و آزمایش در این سطح تنش عمودی ادامه پیدا کرد.

برای سطوح تماسی بتن- بتن از بلوک‌هایی با ابعاد $۱۱۷ \times ۹۶ \times ۶۵$ میلی‌متر استفاده شد (شکل ۱- ب). آزمایش‌های برش در سه سطح تنش عمودی $۰/۲۸$ ، $۱/۰$ و $۱/۹۲$ مگاپاسکال انجام گرفت. برای این درزه‌های مصنوعی نیز آزمایش‌ها در سه مرحله انجام گرفت.

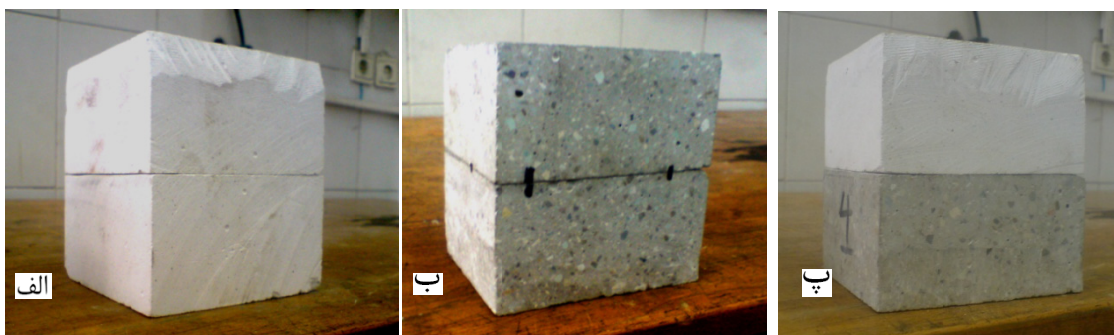
به منظور بررسی رفتار درزه‌های متشکل از بلوک‌هایی با جنس‌های مختلف، آزمایش‌هایی با سطوح تماسی گچ - بتن نیز انجام گرفت. بدین منظور نمونه‌هایی با ابعاد $۱۱۴ \times ۱۰۳ \times ۶۵$ میلی‌متر تهیه شد (شکل ۱- پ). برای این نمونه‌ها آزمایش‌های برش در سه سطح تنش عمودی $۰/۶۱$ ، $۱/۲۳$ و $۱/۸۴$ مگاپاسکال انجام گرفت.

ماده‌ی مناسبی برای شبیه‌سازی رفتار ناپیوستگی‌های بعضی از سنگ‌های نرم مانند گل‌سنگ، زغال‌سنگ، سنگ آهک ترد و شیل رس‌دار است (Indraratna, 1990). در تحقیق حاضر برای تهیه‌ی تعدادی از نمونه‌ها، از مخلوط گچ و آب با نسبت وزنی ۵ به ۳ استفاده شد (نمونه‌نرم). همچنین از مخلوط سیمان، ماسه و آب با نسبت وزنی $۰.۴۳:۱:۱$ به منظور شبیه‌سازی ناپیوستگی در سنگ‌های متوسط- سخت استفاده شد.

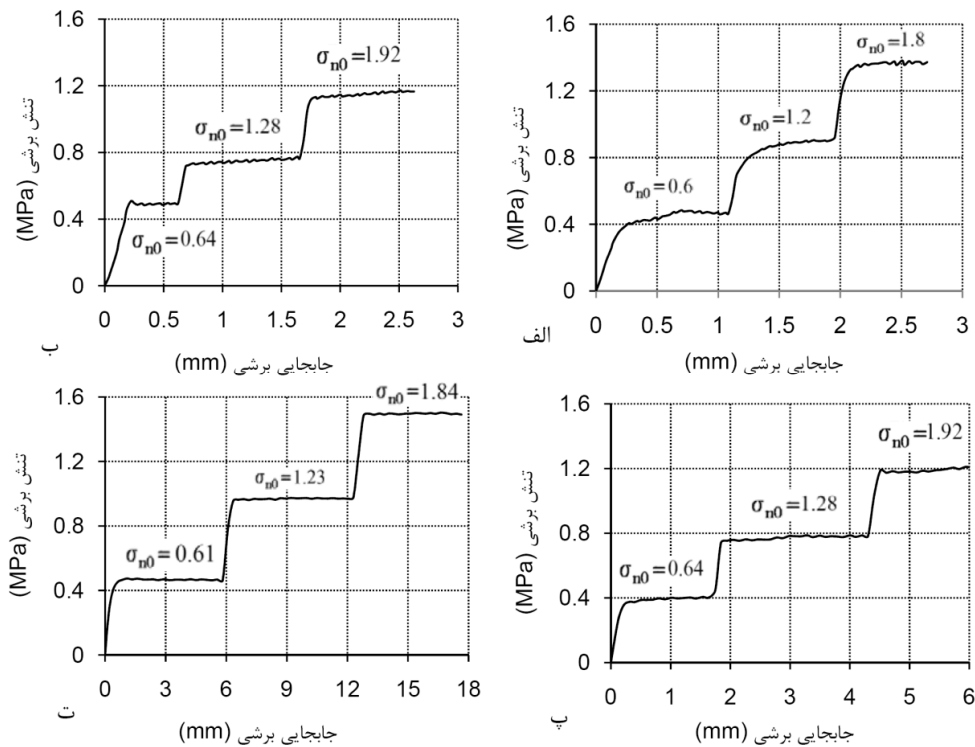
به منظور تهیه‌ی درزه‌های مصنوعی، ابتدا مخلوطی از مواد اولیه با درصدهای ذکر شده در بالا، تهیه و در داخل یک قالب ۵۰×۵۰ سانتی‌متری ریخته شدند. نمونه‌های گچی به مدت یک ساعت در قالب باقی مانده و سپس از آن خارج و به مدت شش روز در دمای آزمایشگاه قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها به کمک وسایل برش در ابعاد مورد نیاز بریده و آماده‌ی آزمایش شدند. نمونه‌های بتنی نیز بعد از ۲۴ ساعت از داخل قالب خارج و به مدت چهار روز در آب ۴۰ درجه قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها از آب خارج و در ابعاد مورد نظر بریده شدند. نمونه‌های آماده شده بعد از خشک شدن کامل در دمای آزمایشگاه، مورد آزمایش قرار گرفتند.

۲-۲. جزئیات آزمایش‌ها

آزمایش‌های برش مستقیم انجام گرفته شامل سطوح تماسی گچ-گچ (نمونه‌ی درزه‌ی نرم)، بتن- بتن (نمونه‌ی درزه‌ی سخت) و گچ- بتن (نمونه‌ی ترکیبی) می‌باشند. برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه برش مستقیم طراحی شده در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه تهران استفاده شد (عطاپور، ۱۳۸۹).



شکل ۱. الف) سطح تماسی گچ - گچ؛ ب) سطح تماسی بتن- بتن و پ) سطح تماسی گچ - بتن



شکل ۲. نمودار تنش برشی - جابجایی برشی سطوح اندرکنش:

الف) گچ - گچ با تنش عمودی اولیه ۰/۰۶، ۱/۲ و ۱/۸ مگاپاسکال و سرعت برش ۱/۸ mm/min؛ ب) بتن-بتن با تنش عمودی اولیه ۰/۶۴، ۱/۲۸ و ۱/۹۲ مگاپاسکال و سرعت برش ۱/۸ mm/min؛ پ) بتن-بتن با تنش عمودی اولیه ۰/۶۴، ۱/۲۸ و ۱/۹۲ مگاپاسکال و سرعت برش ۱۵ mm/min؛ ت) گچ - بتن با تنش عمودی اولیه ۰/۶۱، ۱/۲۳ و ۱/۸۴ مگاپاسکال و سرعت برش ۱۵ mm/min

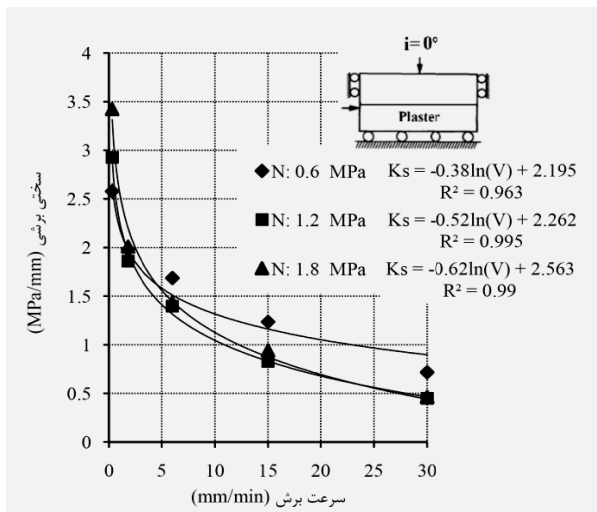
بارهای حرارتی در مواردی همچون مخازن ذخیره‌ی زباله‌های هسته‌ای و یا در نتیجه‌ی بارگذاری دینامیکی ناشی از حرکات لرزه‌ای باشد. فضاهای زیرزمینی که به دلایلی دارای اهمیت فراوانی هستند، باید نسبت به فضاهای زیرزمینی معمولی پایدارتر بوده و کارایی بلندمدت‌تری داشته باشند. بنابراین طراحی در چنین مواردی نیازمند مطالعات دقیق‌تر و گسترده‌تر است. به عبارتی در این موارد نیاز به بررسی اثرات بارگذاری شبه‌استاتیکی و دینامیکی بر روی ناپیوستگی‌های سنگی وجود دارد (Ahola et al., 1996). با این وجود اثر سرعت برش بر سختی برشی به عنوان یکی از پارامترهای مهم درزه‌های سنگی چندان مشخص نیست. در ادامه اثر سرعت برش بر سختی برشی درزه‌های نمونه‌ی گچ و نمونه‌ی بتن و نیز درزه‌ی حاصل از تماس گچ- بتن مورد بررسی قرار گرفته است.

قابل ذکر است که آزمایش‌ها برای تمامی درزه‌های مصنوعی با سرعت‌های مختلف برش ۰/۳، ۱/۸، ۶، ۱۵ و ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفته است. به عنوان نمونه نتایج آزمایش‌های برش برای سطوح تماسی گچ-گچ با سرعت برش ۱/۸ میلی‌متر بر دقیقه، سطوح تماسی بتن- بتن با سرعت برش ۱/۸ و ۶ میلی‌متر بر دقیقه و سطوح تماسی گچ - بتن با سرعت برش ۱۵ میلی‌متر بر دقیقه بترتیب در بخش‌های الف، ب، پ و ت شکل (۲) نشان داده شده‌اند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها بعد از انجام تصحیحات مورد نیاز به علت بالا بودن سرعت آزمایش‌ها و همچنین سه مرحله‌ای بودن آنها در ادامه شرح داده شده است.

۳. اثر سرعت برش بر سختی برشی

تغییر شکل در امتداد درزه‌های سنگی ممکن است در نتیجه‌ی بارگذاری شبه‌استاتیکی ناشی از حفاری تونل و همچنین

۳-۱. سطح تماسی گچ - گچ
مقادیر سختی برشی و تری (تنش برشی پیک در واحد جابجایی مماسی) از روی نمودارهای تنش برشی-جابجایی برشی برای تمامی آزمایش‌های صورت گرفته در سرعت‌ها و تنش‌های عمودی مختلف محاسبه گردید (جدول ۱). در شکل ۳ مقادیر سختی برشی به دست آمده برای درزه‌ی گچ در سه سطح تنش عمودی در مقابل افزایش سرعت برش ترسیم شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، در هر سه سطح تنش عمودی، سختی برشی با افزایش سرعت برش، کاهش یافته است. قابل توجه است که میزان افت سختی برشی و نرخ افت آن بسیار بالا است. نکته‌ی مهم این می‌باشد که نرخ افت سختی در محدوده‌ی سرعت ۰/۳ تا ۵ میلی‌متر بر دقیقه بیشتر از سرعت‌های بالاتر است. به‌طوری‌که عمده‌ی افت سختی در این محدوده‌ی سرعتی رخ داده است. همچنین قابل ذکر است که افت سختی برای سطح تنش عمودی ۱/۸ مگاپاسکال بیشترین مقدار و برای سطح تنش عمودی ۰/۶ مگاپاسکال کمترین مقدار بوده است.



شکل ۳. نمودار اثر سرعت برش بر سختی برشی (K_s) برای سطوح اندرکنش گچ-گچ در سه سطح تنش عمودی اولیه‌ی ۰/۶، ۱/۲ و ۱/۸ مگاپاسکال

۳-۲. سطوح تماسی بتن-بتن

مقادیر سختی برشی از روی نمودارهای تنش برشی-جابجایی برشی برای تمامی آزمایش‌های صورت گرفته در سرعت‌ها و تنش‌های عمودی مختلف محاسبه شد (جدول ۲). مقادیر به‌دست آمده برای هر سه سطح تنش عمودی در مقابل افزایش سرعت برش ترسیم شد (شکل ۴). همان‌طور که از این شکل مشخص است، در هر سه سطح تنش عمودی سختی برشی با افزایش سرعت برش، کاهش یافته است. قابل توجه می‌باشد که نرخ افت سختی در محدوده‌ی سرعت ۰/۳ تا ۵ میلی‌متر بر دقیقه بیشتر از سرعت‌های بالاتر است. به طوری‌که عمده‌ی افت سختی همچون نمونه‌های گچ در این محدوده‌ی سرعتی رخ داده است. نکته‌ی مهم دیگر این می‌باشد که افت سختی برای سطح تنش عمودی ۱/۹۲ مگاپاسکال بیشترین مقدار و برای سطح تنش عمودی ۰/۶۴ مگاپاسکال کمترین مقدار بوده است. به‌عبارتی میزان افت سختی برشی با افزایش سرعت، در سطوح تنش عمودی بالاتر

جدول ۱. مقادیر سختی برشی (MPa/mm) در سرعت و سطوح تنش‌های عمودی مختلف

سرعت برش (mm/min)	سختی برشی (MPa/mm)		
	تنش عمودی 0.6 MPa	تنش عمودی 1.2 MPa	تنش عمودی 1.8 MPa
0.3	2.58	2.93	3.42
1.8	1.98	1.86	2.01
6	1.69	1.40	1.43
15	1.24	0.83	0.94
30	0.72	0.45	0.46

بررسی توابع مختلف (هیپربولیک، توانی، لگاریتمی) نشان داد که برازش لگاریتمی بهترین تقریب را برای نتایج آزمایشگاهی مربوط به درزه‌های گچ نمایش می‌دهد. به طوری‌که می‌توان رابطه‌ی ۱ را برای تغییرات سختی برشی با افزایش سرعت برش ارائه نمود (برای درزه‌های گچ در محدوده‌ی سرعت برشی آزمایش شده):

$$K_s = a \ln\left(\frac{1}{V}\right) + b \quad (1)$$

و بتن است که در مباحثی همچون میل مهارهای تزریقی، فونداسیون سدها، فونداسیون سازه‌های نظیر پل‌ها بر روی شیب‌های سنگی، شمع‌های اجرایی در داخل توده‌سنگ‌ها، عملیات تزریق، بتن‌ریزی به‌منظور تامین نگهداری در انواع فضاهای زیرزمینی و نیز بحث شاکریت مطرح است. بنابراین درک صحیح از میزان اثر جنس هر کدام از بلوک‌های تشکیل‌دهنده در این نوع سطوح تماسی اهمیت می‌یابد. در ادامه به کمک آزمایش‌های برش درزه‌های گچ-بتن به بررسی اثر سرعت برش بر این نوع درزه‌ها پرداخته شده است.

مقادیر سختی برشی برای سطوح تماسی گچ-بتن نیز از روی نمودارهای تنش برشی-جابه‌جایی برشی برای همه‌ی آزمایش‌های برش صورت گرفته در سرعت‌ها و تنش‌های عمودی مختلف به‌دست آمد (جدول ۳). مقادیر به‌دست آمده برای هر سه سطح تنش عمودی در مقابل افزایش سرعت برش ترسیم شد (شکل ۵). همان‌طور که از این شکل مشخص است، در هر سه سطح تنش عمودی، سختی برشی با افزایش سرعت برش کاهش یافته است. همچون سطوح تماسی گچ-بتن و بتن-بتن میزان افت سختی با افزایش سرعت، در تنش‌های عمودی بالاتر بیشتر است. همچنین نرخ کاهش در ابتدای نمودارها بیشتر است.

همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است، رابطه‌ی لگاریتمی ارائه شده در معادله‌ی ۱، برای سطوح تماسی گچ-بتن نیز مانند دو سطح تماسی گچ-بتن و بتن-بتن برقرار است.

جدول ۳. مقادیر سختی برشی (MPa/mm) در سرعت‌ها و

سطوح تنش‌های عمودی مختلف

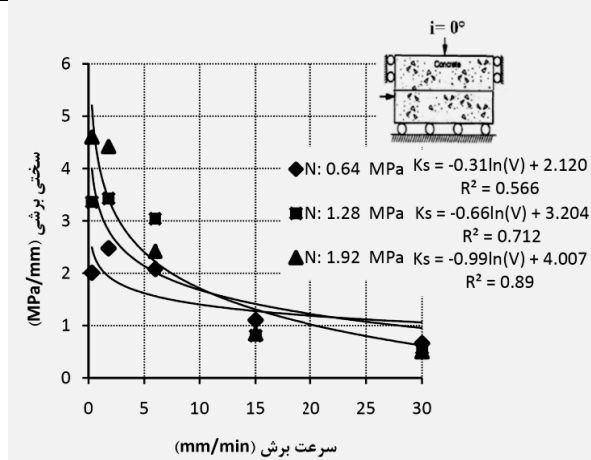
سرعت برش (mm/min)	سختی برشی (MPa/mm)		
	تنش عمودی 0.61 Mpa	تنش عمودی 1.23 MPa	تنش عمودی 1.84 MPa
0.3	2.13	2.61	2.96
1.8	2.28	2.27	2.28
6	1.80	1.43	2.02
15	0.98	0.94	1.00
30	0.81	0.97	0.53

بیشتر است. این رفتار در سطوح اندرکنش گچ-گچ نیز مشاهده شد. نکته‌ی قابل ذکر این است که رابطه‌ی ارائه شده در معادله‌ی ۱، برای سطوح تماسی بتن-بتن نیز برقرار است.

جدول ۲. مقادیر سختی برشی (MPa/mm) در سرعت و

سطوح تنش‌های عمودی مختلف

سرعت برش (mm/min)	سختی برشی (MPa/mm)		
	تنش عمودی 0.64 MPa	تنش عمودی 1.28 MPa	تنش عمودی 1.92 MPa
0.3	2.01	3.36	4.60
1.8	2.48	3.43	4.42
6	2.08	3.04	2.42
15	1.11	0.81	0.84
30	0.66	0.56	0.50

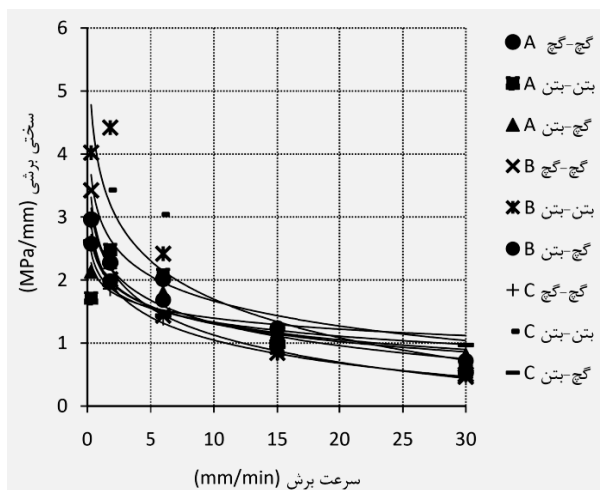


شکل ۴. نمودار اثر سرعت برش بر سختی برشی (K_s) برای سطوح اندرکنش بتن-بتن در سه سطح تنش عمودی اولیه‌ی ۰/۶۴، ۱/۲۸ و ۱/۹۲ مگاپاسکال

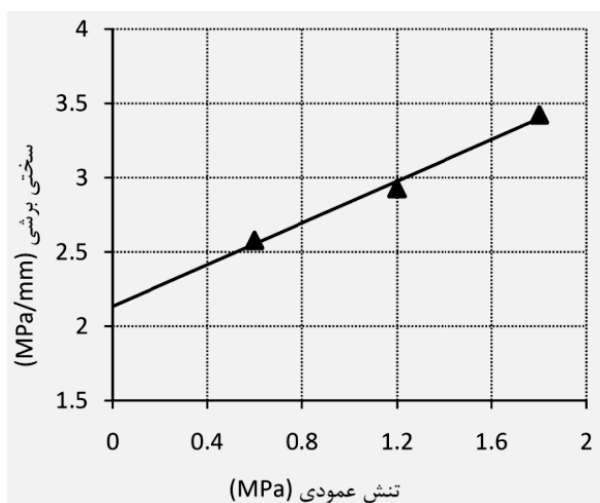
۳-۳. سطوح تماسی گچ - بتن

مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی ناپیوستگی‌های سنگی عمدتاً شامل ناپیوستگی‌هایی است که بلوک‌های دو طرف آن دارای جنس یکسانی هستند. موارد متعددی وجود دارد که در آنها ناپیوستگی‌های متشکل از بلوک‌هایی با جنس‌های مختلف مطرح است. از جمله می‌توان ناپیوستگی از نوع لایه‌بندی، قرارگیری لایه‌های مختلف سنگی روبروی هم در اثر فعالیت گسل‌ها، سطوح تماسی بین توده‌های نفوذی مختلف با سنگ‌های میزبان و غیره را نام برد. همچنین حالت خاص اندرکنش سطوح تماسی با جنس‌های مختلف، اندرکنش سنگ

که در این شکل مشخص است، برای سطوح تماسی گچ-گچ رابطه‌ی خطی بین سختی برشی و تنش عمودی برقرار است.

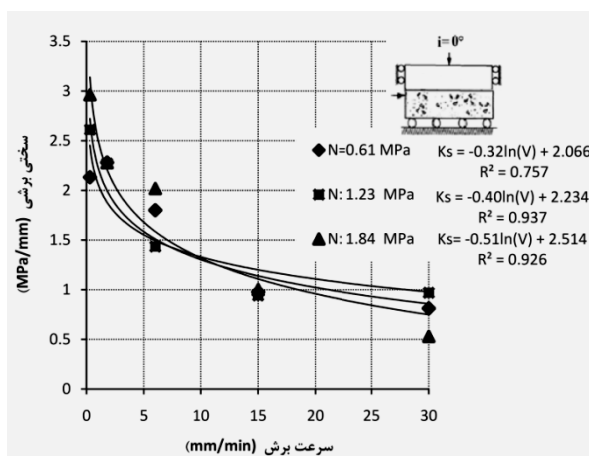


شکل ۶. نمودارهای سختی برشی همه‌ی سطوح تماسی در همه‌ی سطوح تنش عمودی آزمایش شده



شکل ۷. تغییرات سختی برشی سطح تماسی گچ - گچ با افزایش تنش عمودی در سرعت برش ۰/۳ mm/min

باندیس و همکاران (Bandis et al., 1983) با توجه به آزمایش‌های انجام داده بر روی درزه‌های زبر بیان کرده‌اند که پوش سختی برشی مشابه پوش مقاومت برشی دارای شکل منحنی است. تغییرات غیرخطی سختی برشی با افزایش تنش عمودی نشان دهنده‌ی تغییرات غیرخطی مقاومت برشی اوج با تنش عمودی و افزایش اندک در جابه‌جایی برشی نقطه‌ی اوج با افزایش میزان تنش عمودی است. آنها همچنین اشاره



شکل ۵. نمودار اثر سرعت برش بر سختی برشی (Ks) برای سطوح اندرکنش بتن - گچ اربهر در سه سطح تنش عمودی اولیه‌ی ۰/۶۱، ۱/۲۳، و ۱/۸۴ مگاپاسکال

نکته‌ای دیگر در مورد سختی برشی، مقادیر آن در سرعت‌های بالای برش است. در شکل ۶ نمودارهای سختی برشی همه‌ی سطوح تماسی در همه‌ی سطوح تنش عمودی ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد سختی برشی در نمونه‌های آزمایش شده در سرعت‌های برشی بالای ۱۵ میلی‌متر بر دقیقه، به مقادیر ۰/۵ تا ۱ مگاپاسکال بر میلی‌متر همگرا شده‌اند. بعبارتی سختی برشی در سرعت‌های برشی بالا، وابستگی اندکی به سطح تنش عمودی، تغییرات سرعت برش و همچنین جنس بلوک‌های درگیر نشان داده است.

۴. اثر سطح تنش عمودی بر سختی برشی (پوش سختی)

با توجه به نتایج آزمایش‌های برش مستقیم انجام گرفته بر روی درزه‌های هموار گچ و بتن و مشاهده‌ی رفتار سختی برشی با افزایش تنش عمودی، به نظر می‌آید در آزمایش‌های صورت گرفته می‌توان برای سختی برشی مفهوم جدید «پوش خطی سختی» تعریف نمود (عطاپور، ۱۳۸۹). به طوری که برای سرعت پایین آزمایش (۰/۳ mm/min) که در محدوده‌ی سرعت معمول آزمایش برش (۰/۵-۰/۱ mm/min) است، با افزایش تنش عمودی میزان سختی برشی به شکل خطی زیاد می‌شود. در شکل ۷ نمودار تغییرات سختی برشی سطح تماسی گچ-گچ با افزایش تنش عمودی ترسیم شده است. همان‌طور

با سرعت ۰/۳ میلی‌متر بر دقیقه است. این نمودارها نیز رابطه‌ی خطی بین تغییرات سختی برشی و افزایش تنش عمودی را نشان می‌دهند.

با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان برای نمونه‌های درزه‌ی هموار آزمایش شده در سرعت برش ۰/۳ میلی‌متر بر دقیقه رابطه‌ی ۴ را به عنوان پوش خطی سختی ارائه نمود:

$$K_S = K_0 + \sigma_n \tan(\omega) \quad (۴)$$

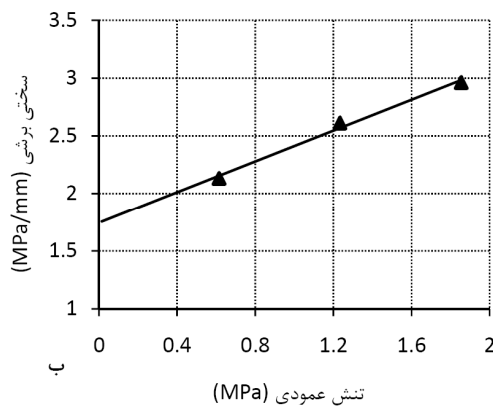
که ω با عنوان ضریب زاویه‌ی سختی و ثابت K_0 که از امتداد دادن پوش سختی با محور سختی به دست می‌آید، با عنوان ثابت سختی تعریف شد (عطاپور، ۱۳۸۹). مقدار ثابت سختی در رابطه‌ی فوق احتمالاً به جنس بلوک‌های درگیر و نیز سرعت برش وابسته است. این پارامتر برای سطوح تماسی گچ-گچ؛ بتن-بتن و گچ-بتن به ترتیب برابر با ۲/۱؛ ۰/۵۸ و ۱/۷۴ است. همچنین ضریب زاویه‌ی سختی برای این سطوح به ترتیب برابر با ۳۵/۸، ۶۰/۱ و ۳۳/۸ درجه است.

روابط پوش سختی برشی با تنش عمودی در سرعت برش ۰/۳ mm/min، به ترتیب برای سطوح برشی گچ-گچ؛ بتن-بتن و گچ-بتن به شکل معادلات ۵، ۶ و ۷ می‌باشد:

$$K_S = 0.72\sigma_n + 2.1 \quad (۵)$$

$$K_S = 1.79\sigma_n + 0.58 \quad (۶)$$

$$K_S = 0.67\sigma_n + 1.74 \quad (۷)$$



شکل ۸. تغییرات سختی برشی با افزایش تنش عمودی با سرعت برش ۰/۳ mm/min؛

الف) سطح تماسی بتن-بتن ب) سطح تماسی گچ - بتن

کرده‌اند که سختی برشی وتری به JRC و JCS وابسته است. بارتن و کوبی (Barton & Choubey, 1977) رابطه‌ی تجربی غیرخطی ۲ را برای سختی برشی درزه‌های زبر ارائه کرده‌اند:

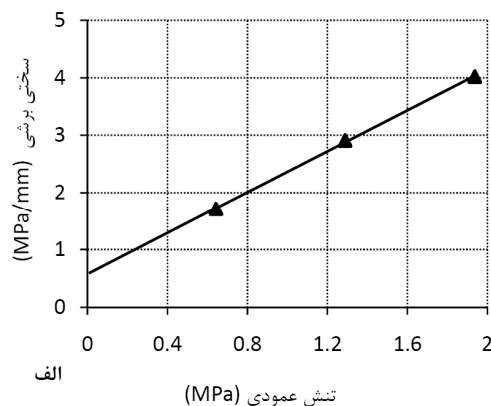
$$K_S = \frac{100}{L} \sigma_n \tan \left[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_r \right] \quad (۱)$$

در رابطه‌ی فوق L طول درزه بوده و نشان دهنده‌ی اثر مقیاس بر سختی برشی است. رابطه‌ی فوق بر این فرض استوار است که مقاومت برشی وتری بعد از جابه‌جایی برشی حدود ۱٪ طول درزه اتفاق می‌افتد. بارتن و باندیس (Barton & Bandis, 1980) اشاره می‌کنند که باید مقدار L در رابطه‌ی فوق باید تعدیل شود.

اگر در رابطه‌ی تجربی غیرخطی که توسط بارتن و کوبی (Barton & Choubey, 1977) برای درزه‌های ناهموار ارائه شده است، مقدار زبری برابر با صفر (برای درزه‌های هموار) قرار داده شود، رابطه‌ی خطی ۳ حاصل می‌شود:

$$K_S = \frac{100}{L} \sigma_n \tan[\varphi_r] \quad (۳)$$

هر چند حالت ساده شده‌ی رابطه‌ی تجربی بارتن و کوبی (Barton & Choubey, 1977) برای درزه‌های هموار دارای شکل خطی است، اما انطباق مناسبی با نتایج حاصل از تحقیق حاضر ندارد. تغییرات سختی برشی سطوح تماسی بتن-بتن و گچ-بتن با افزایش تنش عمودی، به ترتیب در شکل ۸-الف و ۸-ب ترسیم شده‌اند. این نتایج مربوط به آزمایش‌های برش

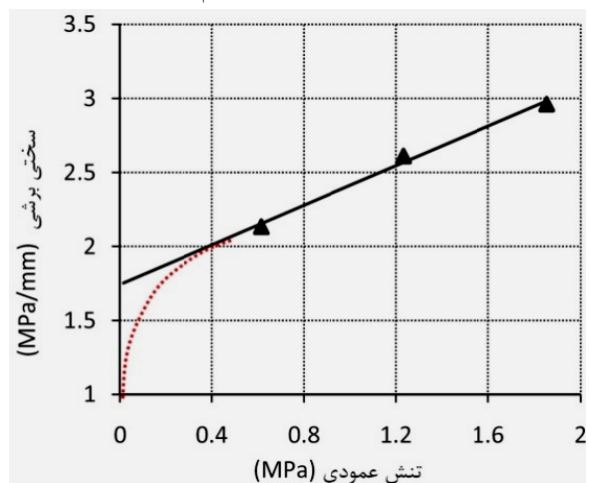


جهت بررسی صحت مفهوم پوش سختی ارائه شده در این تحقیق برای سطوح درزه‌ی زیر طبیعی، از داده‌های آزمایش‌های باندیس و همکاران (Bandis et al., 1983) که بر روی درزه‌های زیر طبیعی سنگ آهک و دولریت با سطوح هوازده و هوازده انجام داده‌اند، استفاده شد. بعد از ترسیم نمودارهای پوش سختی، مشاهده شد که برای این درزه‌های زیر طبیعی نیز رابطه‌ی خطی بین سختی برشی و تنش عمودی برقرار است. البته این رابطه‌ی خطی زمانی برقرار می‌باشد که با توجه به مطالب ذکر شده در بالا، نمودار به نقطه‌ی (۰،۰) متصل نگردد. به عبارتی مفهوم پوش سختی برای درزه‌های زیر سنگ آهک و دولریت در سطح تنش عمودی بالای ۰/۲ MPa برقرار می‌باشد. به نظر می‌آید علت در نظر گرفتن رفتار غیرخطی توسط باندیس و همکاران برای درزه‌های زیر، همین امر بوده است. داده‌هایی که از نمودارهای ارائه شده توسط باندیس و همکاران (Bandis et al., 1983) اخذ شد، در جدول ۴ خلاصه شده است. این نتایج حاصل از آزمایش درزه‌ها با سرعت استاندارد آزمایش برش مستقیم هستند.

جدول ۴. مقادیر سختی برای درزه‌های سالم و هوازده‌ی سنگ آهک و دولریت در سطوح مختلف تنش عمودی (Bandis et al., 1983)

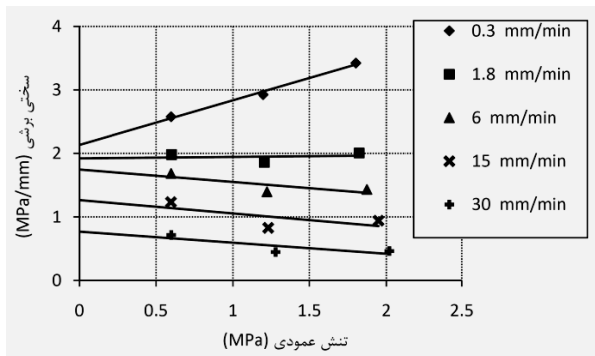
درزه	تنش عمودی (MPa)	سختی برشی (MPa/mm)
درزه‌ی تازه‌ی سنگ آهک JRC= 11.8 JCS= 154 (MPa)	۱/۸۴	۶/۸۷
	۰/۹۲	۴/۰۲
	۰/۴۶	۲/۳۱
	۰/۲۳	۱/۶۵
درزه‌ی هوازده‌ی سنگ آهک JRC= 6.2 JCS= 53 (MPa)	۱/۵۳	۱/۸۹
	۱/۰۲	۱/۰۵
	۰/۵۱	۰/۶۶
	۰/۲۵	۰/۴
درزه‌ی تازه‌ی دولریت JRC= 7.1 JCS= 167 (MPa)	۲/۱	۴/۹۸
	۱/۰۵	۳/۳۹
	۰/۵۲	۲/۲۴
	۰/۲۶	۱/۷۵
درزه‌ی هوازده‌ی دولریت JRC= 7.1 JCS= 76 (MPa)	۱/۱	۲/۱۹
	۰/۵۵	۱/۳۴
	۰/۲۷	۰/۸۶

همان‌طور که در روابط فوق مشخص است، مقدار ثابت سختی برای درزه‌ی نرم (گچ) بزرگتر از درزه‌ی سخت (بتن) است. مقدار این پارامتر نشان دهنده‌ی سختی درزه در تنش عمودی صفر است. به عبارتی اگر دو بلوک بدون اعمال تنش عمودی، تحت تنش برشی قرار بگیرند، طبق این رابطه باید سختی معادل K_0 داشته باشند. اما در عمل چنین نخواهد بود. زیرا به کمینه‌ی مقداری از تنش عمودی جهت ایجاد درگیری دو بلوک تشکیل دهنده‌ی درزه نیاز است. بنابراین به نظر می‌آید ابتدای نمودار رفتار غیرخطی داشته باشد. به عبارتی رابطه‌ی خطی پوش سختی برشی برای مقادیر پایین تنش عمودی (کمتر از ۰/۲ مگاپاسکال) در عمل برقرار نخواهد بود. در شکل ۹ رفتار احتمالی پوش سختی در تنش‌های عمودی پایین به صورت نقطه‌چین ترسیم شده است.



شکل ۹. نمودار شماتیک پوش سختی در تنش‌های عمودی پایین علت این رفتار را چنین می‌توان شرح داد که سختی برشی تا حدود زیادی وابسته به میزان درگیری ناهمواری‌های میکروسکوپی موجود در سطح تماسی است. این ناهمواری‌های ریز مقیاس، برای درگیر شدن نیازمند حداقلی برای تنش عمودی هستند. بنابراین افزایش تنش عمودی از مقدار صفر تا مقادیر خاصی سبب افزایش میزان درگیری ناهمواری‌های میکروسکوپی و در نتیجه افزایش میزان تماس دو بلوک می‌شود. این امر می‌تواند دلیل رفتار غیرخطی در سطح تنش‌های عمودی پایین باشد.

افزایش سرعت در محدوده‌ی ۰/۳ تا ۱/۸ تغییرات زیادی داشته است. به طوری که ضریب زاویه‌ی سختی از حدود ۳۵ درجه به نزدیک صفر رسیده است. در سرعت‌های بالاتر نیز شیب آن در حدود عدد ۱۰- درجه ثابت باقی مانده است. به عبارتی در برش با سرعت‌های بالا، پوش سختی کمتر تحت تأثیر سرعت قرار می‌گیرد. قابل ذکر است که عرض از مبدا خطوط پوش سختی با افزایش سرعت به تدریج کاهش یافته است. این رفتار را می‌توان به درگیری کمتر ناهمواری‌ها در سرعت‌های برشی بالاتر نسبت داد. در مورد سطوح تماسی بتن- بتن و نیز گچ- بتن رفتار مشابهی برقرار است. البته در این سطوح تماسی، پوش سختی در سرعت شش میلی‌متر بر دقیقه حالت خطی ندارد.

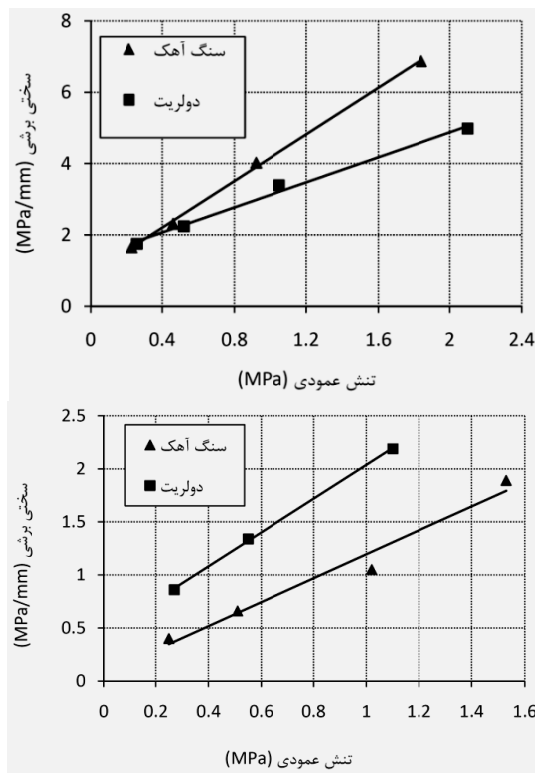


شکل ۱۱. پوش‌های سختی سطح تماسی گچ - گچ در سرعت‌های مختلف

۶. تأثیر جنس بلوک بر پوش سختی برشی

به منظور بررسی اثر تغییر جنس یکی از بلوک‌های تشکیل دهنده‌ی ناپیوستگی بر رفتار برشی آن، پوش سختی سطوح تماسی گچ-گچ، بتن- بتن و گچ- بتن در سرعت‌های مختلف در کنار هم ترسیم شدند. به عنوان نمونه نمودارهای مربوط به سرعت‌های برش ۰/۳ و ۱/۸ میلی‌متر بر دقیقه به ترتیب در شکل ۱۲-الف و ۱۲-ب نشان داده شده‌اند. این شکل‌ها نشان می‌دهند که رفتار پوش سختی درزه‌ی مصنوعی گچ- بتن به رفتار پوش سختی درزه‌ی مصنوعی گچ-گچ نزدیک‌تر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در آزمایش‌های صورت گرفته، پوش سختی برشی سطح اندرکنش گچ- بتن، بیشتر تحت کنترل بلوک گچی (بلوک نرم‌تر) بوده است.

به کمک مقادیر موجود در جدول ۴، نمودار سختی برشی با افزایش تنش عمودی برای درزه‌های سالم سنگ آهک و دلریت و درزه‌های هوازده‌ی سنگ آهک و دلریت (شکل ۱۰) ترسیم شد. همان‌طور که در این نمودارها دیده می‌شود، با افزایش تنش عمودی، مقدار سختی برشی درزه‌های زبر نیز به شکل خطی افزایش یافته است. البته همان‌طور که اشاره شد، برای مقادیر پایین تنش عمودی، احتمالاً مقادیر سختی از معادله‌ی این خطوط تبعیت نخواهد نمود.



شکل ۱۰. پوش سختی برای درزه‌های زبر و هوازده‌ی سنگ آهک و دلریت (بالا)؛ پوش سختی برای درزه‌های زبر و هوازده‌ی سنگ آهک و دلریت (پایین).

۵. تأثیر سرعت برش بر پوش سختی برشی

جهت بررسی اثر افزایش سرعت برش بر رفتار پوش سختی در آزمایش‌های صورت گرفته، نمودارهای مربوط به پوش سختی برشی در سرعت‌های مختلف در کنار هم ترسیم شد. به عنوان نمونه پوش‌های سختی مربوط به سطح تماسی گچ-گچ در سرعت‌های مختلف در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، پوش سختی با

سختی برشی درزه‌های آزمایش شده با سطح صاف با افزایش سرعت برش در محدوده‌ی $0.3-30 \text{ mm/min}$ ، ابتدا به سرعت کاهش یافته و سپس در سرعت‌های بالاتر کمتر تحت تأثیر افزایش سرعت برش قرار گرفته است. این نتیجه برای هر دو نوع درزه‌ی نرم (گچ) و سخت (بتن) و همچنین حالت ترکیبی (بتن-گچ) صادق است.

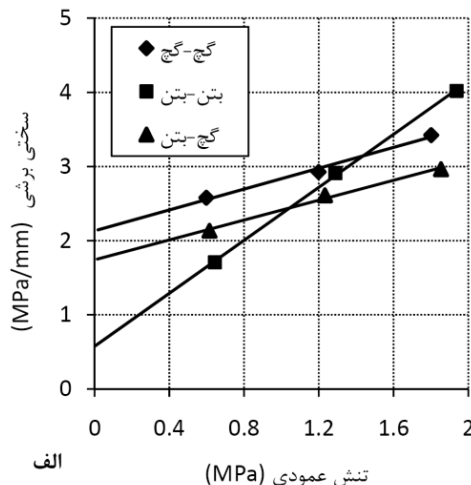
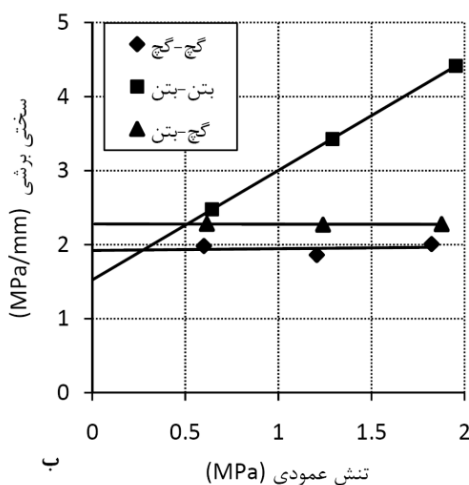
با افزایش سطح تنش عمودی در محدوده‌ی $0.6-1.92 \text{ MPa}$ ، مقدار سختی برشی بر خلاف افزایش سرعت برش زیاد می‌شود. این افزایش به شکل خطی است. به طوری که برای سختی برشی مفهومی با عنوان پوش خطی سختی برشی تعریف شد. این نتیجه برای هر سه نوع درزه‌ی هموار و نیز درزه‌های ناهموار طبیعی سنگ آهک و دولریت برقرار بوده است.

در نهایت باید اشاره نمود که سختی برشی درزه‌ی متشکل از بلوک‌هایی با دو جنس مختلف (درزه‌ی گچ-بتن)، و تأثیرپذیری آن از سرعت برش و نیز تغییرات سطح تنش عمودی، عمدتاً با خصوصیات بلوک نرم‌تر (گچ) کنترل می‌شود.

همان‌طور که در این شکل مشخص است، پوش سختی برشی درزه‌ی بتن-بتن دارای شیب بیشتری نسبت به درزه‌های گچ-بتن و گچ-گچ است. علت این امر می‌تواند در ارتباط با میزان تماس واقعی سطوح دو بلوک درگیر باشد. زیرا با وجود سطوح صاف درزه‌های آزمایش شده، میزان تماس واقعی دو بلوک درگیر، همواره کمتر از مقدار اسمی (سطح مقطع بلوک) آنها است. به طوری که با افزایش سطح تنش عمودی، سطح تماس واقعی افزایش یافته و به مقدار اسمی نزدیکتر است. افزایش تنش عمودی در درزه‌ی بتن-بتن نسبت به درزه‌های گچ-گچ و گچ-بتن مؤثرتر بوده است. زیرا تماس واقعی سطوح در درزه‌هایی که گچ حضور دارد، به علت نرم و تغییر شکل پذیر بودن آن، در مقادیر پایین تنش عمودی نیز به مقدار اسمی نزدیک است و افزایش تنش عمودی نسبت به درزه‌ی بتن-بتن اثر کمتری دارد.

۷. نتیجه گیری

نتایج آزمایش‌های برش مستقیم انجام گرفته بر روی درزه‌های مصنوعی با جنس‌های متفاوت در سرعت‌ها و نیز سطوح تنش عمودی مختلف را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:



شکل ۱۲. پوش سختی درزه‌های گچ-گچ؛ بتن-بتن و گچ-بتن در سرعت برش الف) 0.3 mm/min و ب) $1/8 \text{ mm/min}$

منابع

- عطاپور، ه.، ۱۳۸۹. بررسی رفتار مکانیکی ناپیوستگی های توده سنگ به کمک مطالعات آزمایشگاهی. پایان نامه ی کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
- عطاپور، ه.، موسوی، م.، ۱۳۸۹. تعیین پارامترهای برشی سطوح تماس سنگ-بتن و سنگ-سنگ. پنجمین کنگره ی ملی عمران.
- عطاپور، ه.، موسوی، م.، ۱۳۹۰. مطالعه ی آزمایشگاهی رفتار برشی درزه های سنگی مصنوعی تحت شرایط مرزی سختی عمودی ثابت؛ چهارمین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، ص. ۱۳۵-۱۴۰.
- Ahola, M.P., Hsiung, S., Kana, D., 1996. Experimental study on dynamic behavior of rock joints. *Developments in Geotechnical Engineering*, 79: 467-494.
- Bandis, S.C., Lumsden, A.C., Barton, N.R., 1983. Fundamentals of Rock Joint Deformation, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, Abstract*, 20(6): 249-268.
- Bandis, S.C., 1980. Experimental Studies of Scale Effects on Shear Strength and Deformation of Rock Joints, Ph.D. thesis, Univ. of Leeds, 385 pp.
- Barton, N.R., 1972. A model study of rock-joint deformation, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 9: 579-602.
- Barton, N.R., Bandis, S.C., 1980. Some effects of scale on the shear strength of joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics. Abstract*, 17: 69-73.
- Barton, N. R., Choubey, V., 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, 10: 1-54.
- Goodman, R.E., Taylor, R.L., Brekke, T.L., 1968. A model for the mechanics of jointed rock. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division: proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 94(SM3): 637-659.
- Indraratna, B., 1990. Development and applications of synthetic material to simulate soft sedimentary rocks. *Geotechnique*, 40(2): 189-200.
- Indraratna, B., Haque, A., 1997. Experimental study of shear behavior of rock joints under constant normal stiffness condition. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34: 3-4.
- Infanti, N., Kanji, M.A., 1978. In situ shear strength, normal and shear stiffness determinations at Agua Vermelha Project. *Proceeding of 3rd International congress of IAEG, Madrid, Vol. 2*, pp. 175-183.
- Jiang, Y., Xiao, J., Tanabashi, Y., Mizokami, T., 2004. Development of an automated servo-controlled direct shear apparatus applying a constant normal stiffness condition. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41: 275-286.
- John, K.W., 1970. Civil engineering approach to evaluate strength and deformability of regularly jointed rock. *Proceeding of 11th Symposium on Rock Mechanics*, pp. 68-82.
- Kulhaway, F.H., 1978. Geomechanical model for rock foundation settlement. *Journal of the Geotechnical Division: Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 106(GT2): 211-227.
- Rosso, R.S., 1976. A comparison of joint stiffness measurements in direct shear, triaxial compression and in situ. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, Abstracts*, 13: 167-172