مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
پاییز ۱۳۹۹، جلد سیزدهم، شماره ۳، صفحه ۱ تا ۱۱

بررسی مقدار ضریب اصطکاک پسماند سطوح سنگی تحت تماس‌های کوچک و استاندارد و پیشنهاد کاربرد تریبومتر در اندازه‌گیری آن

سیداحمد مهری شال* [۱]، محمد وجدی [۲]، حمید بهادر [۳]

دریافت مقاله: ۹۸/۰۸/۰۲ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۳/۰۷

چکیده

بررسی و تعیین خصوصیات اصطکاکی پسماند سطوح سنگی در طراحی و احداث سازه‌های سنگی، درون یا بر روی توده‌سنگ اهمیت فراوانی دارد. تریبومترها ابزارهایی هستند که برای اندازه‌گیری ویژگی‌های اصطکاکی انواع سطوح در حال تماس به کار می‌روند. در این تحقیق نتایج تعدادی آزمایش برش مستقیم که بر روی درزه‌های آهکی از جنس مرمریت و تراورتن اجرا شدند مورد تجزیه تحلیل قرار گرفته است. در هریک از این نمونه‌های سنگی، دو سری درزه، یکی درزه‌های کششی با زبری طبیعی در ابعاد استاندارد (بر اساس ISRM) و دیگری درزه‌های صاف و تخت با اندازه‌های کوچک در دامنهٔ ابعاد ۱ سانتی‌متر مربع تا ۲۵ سانتی‌متر مربع ایجاد شدند. درزه‌ها به کمک یک دستگاه برش مستقیم خود کنترل تحت شرایط CNL با نرخ برش ثابت و تنش‌های عمودی مختلف مورد آزمایش برش مستقیم قرار گرفتند. نتایج به دست آمده از مقاومت برشی مرحلهٔ پسماند درزه‌ها ثبت شده و مورد بررسی قرار گرفتند. یافته‌ها بیانگر آن است که مقاومت برشی پسماند سطوح سنگ‌های آهکی تحت شرایط تنش و نرخ برش ثابت، تقریباً مستقل از اندازهٔ تماس هستند. بعلاوه تحت شرایط تنش و نرخ برش یکسان در محل‌های تماس بین سطوح سنگی، مقاومت برشی پسماند درزه‌های آهکی زبر با ابعاد استاندار تقریباً با ضریب اصطکاک پسماند بدست آمده از سطوح صاف ارّه بر شده از همان سنگ با ابعاد کوچکتر برابر است. در نهایت با تکیه بر یافته‌های تحقیق و نتایج به دست آمده از مطالعات پیشین، پیشنهاد شد تا از تریبومترها در اندازه‌گیری مقاومت برشی پسماند سطوح سنگی تحت تماس‌های نقطه‌ای و جابجایی برشی ۵ الی ۲۰ میلیمتر بهره گرفته شود. در نهایت نیز الزامات ساخت نوعی تریبومتر مخصوص اندازه‌گیری اصطکاک سطوح سنگی پیشنهاد شده است.

کلید واژه‌ها: *مقاومت برشی درزه، تمرکز تنش در زبری‌ها، اثر مقیاس بر ضریب اصطکاک پسماند، برش تحت نرخ و بار ثابت.*

۱. عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل ahmad.mehri@uma.ac.ir
۲. عضو هیات علمی گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
۳. عضو هیات علمی گروه مهندسی برق، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

درک رفتار برشی پیک و پسماند ناپیوستگی‌ها در طراحی‌های مهندسی سنگ اهمیت زیادی دارد؛ زیرا وقوع ریزش در توده سنگ‌ها (مخصوصاً در اعماق کم) اغلب تحت تاثیر رفتار برشی ناپیوستگی‌ها است (Hoek, 2007). مقاومت برشی پسماند ناپیوستگی‌ها در واقع ظرفیت تحمل نیروی برشی سطوح ناپیوستگی پس از وقوع مقدار زیادی جابجایی برشی (بیش از ۵ الی ۱۰ میلیمتر) بعد از جابجایی برشی حداکثر (یا پیک) است و اغلب به مراتب کمتر از مقامت برشی حداکثر آنها است. تحقیقات پیشین نشان داده است که می‌توان مقاومت برشی پسماند ناپیوستگی‌ها را با تقریب قابل قبولی منطبق بر مقاومت پسماند ماده سنگ فرض کرد (Cai et al., 2007). در واقع مقاومت برشی پسماند سطوح سنگی خصوصیتی است که به جنس مواد سازندهٔ ماده سنگ (یا کانی‌های تشکیل دهندهٔ آن) بستگی دارد (Walton et al., 2019). مقاومت برشی پسماند ناپیوستگی‌های سنگی اهمیت بسزایی در مدل‌سازی شرایط شکست یا ریزش در فضاهای زیرزمینی عمرانی و معدنی داشته و اغلب در طراحی‌های محتاطانه با ضریب ایمنی زیاد از این مقاومت پسماند استفاده می‌شود (Crowder and Bawden, 2004; Gao and Kang, 2016; Labrie, 2017; Singh and Basu, 2018).

اصطکاک یا مقاومت برشی بین دو سطح یک ناپیوستگی سنگی را اغلب با ضریب اصطکاک (μ) بیان می‌کنند. ضریب اصطکاک در واقع به نسبت بین مقاومت برشی بر تنش عمودی وارده بر سطوح اطلاق می‌شود. طبق قانون آمونتونز، ضریب اصطکاک قویاً تحت تاثیر تنش‌عمودی وارده بر سطوح بوده و مستقل از اندازه یا مساحت سطوح در حال تماس است. طبق مطالعاتی که اخیراً اجرا شده است، یافته‌ها حاکی از آن است که تحت یک تنش عمودی ثابت و نرخ برش یکنواخت، ضریب اصطکاک سطوح صاف و تخت سنگی مستقل از اندازهٔ مساحت سطح در حال تماس است (Mehrishal et al., 2016 & 2017). این بدان معنی است که با افزایش یا کاهش مساحت سطوح درحال تماس، مقدار نیروی عمودی وارده برسطوح نیز باید افزایش یا کاهش یافته تا تنش عمودی وارده ثابت بماند. در نتیجه، مقدار ضریب اصطکاک پسماند این سطوح که برابر با نسبت بین تنش برشی بر تنش عمودی وارده بر سطوح است مقدار ثابتی به دست خواهد آمد.

مدل سازی رفتار توأمان لغزش-چسبش-سایش در برش درزه‌های سنگی به صورت تئوری بسیار پیچیده، پرهزینه و غیر واقعی است. از طرفی اجرای آزمایش‌های برش مستقیم، خواه برجا و خواه آزمایشگاهی، نیز دشوار و پرهزینه و اغلب فاقد توجیه اقتصادی است. بنابراین در این زمینه نیاز به ابداع ابزار و روش‌هایی وجود دارد که بتوان به کمک آنها به مطلوب‌ترین حالت ممکن، بهترین برآورد از مقدار مقاومت برشی سطوح سنگی را به دست آورد. اینکه بتوان روش‌ها و ابزارهایی برای اندازه‌گیری اصطکاک و سایش ارائه داد به طوری که دشواری‌ها و معایب روش‌های پیشین را نداشته باشد، از جنبهٔ کاربردی بسیار ارزشمند است. زیرا همواره برآورد دقیق پارامترهای ورودی در محاسبات و تحلیل‌های ژئوتکنیکی منجر به ارائهٔ روش‌ها و راه‌حل‌های مناسب‌تری در طراحی‌ها خواهد شد.

۲. تئوری اصطکاک سطوح سنگی

اگر دو جسم با سطوح تقریباً صفحه‌ای با یکدیگر در تماس باشند و قطعهٔ بالایی نیروی عمودی N را به سطح تماس وارد کند و نیروی F نیز به موازات سطح تماس در جهت لغزش بر قطعهٔ بالایی وارد شود، قانون آمونتُنز بیان می‌کند که رابطهٔ F و N می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$F=\mu N \qquad (1)$$

در این رابطه μ ضریب اصطکاک نامیده می‌شود. ضریب μ به خواص ذاتی مصالح و وضعیت سطوح تماس و همچنین به A و N بستگی دارد که A مساحت سطح تماس بر حسب مربع واحد طول و N نیز نیروی عمودی وارد بر سطح است. تجربه نشان می‌دهد که به صورت تقریبی، مقدار ضریب اصطکاک مستقل از دو مقدار A و N است. این تقریب به

عنوان قانون آمونتُنز شناخته شده است. با تقسیم طرفین رابطهٔ (۱) به مساحت A داریم:

$$\tau=\mu\sigma_n \quad (۲)$$

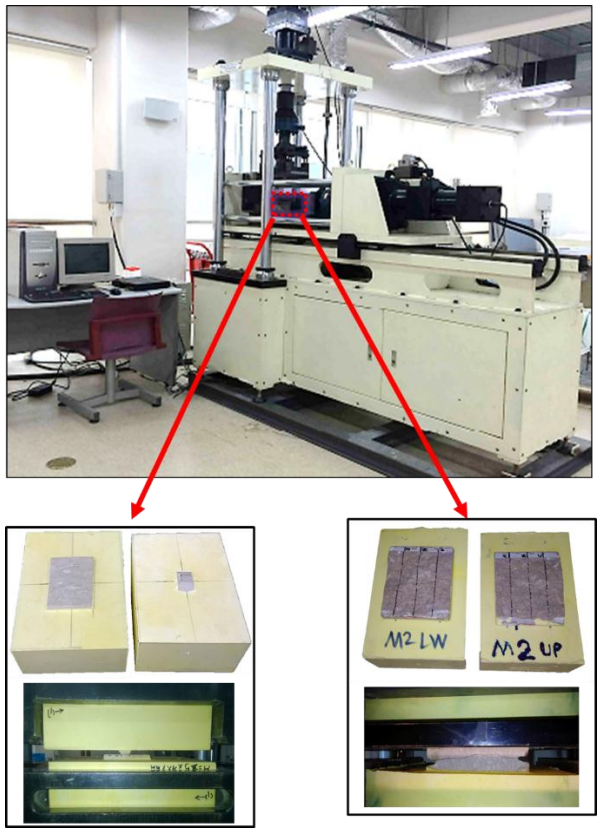
در اینجا σ_n تنش عمودی وارده بر سطح تماس و τ نیز تنش برشی است که بایستی برای شروع لغزش به سطح وارد شود. چنانچه دو جسم در حال تماس، سطوح یک درزهٔ سنگی باشند در فصل مشترک تماس درزه، با توجه به میزان زبری سطوح، در حقیقت تعداد زیادی تماس نقطه‌ای برقرار است که متناسب با مساحت این نقاط تماس، میزان تنش وارده به این نقاط تماس بسیار متفاوت از تنش عمودی وارده بر کل سطح درزه است. بنابراین ممکن است در بعضی از این نقاط تماس به دلیل بروز تمرکز تنش ناشی از سطح تماس کوچک، تغییر شکل‌ها پلاستیک باشد و در سایر نقاط ممکن است به دلیل وجود سطح تماس بزرگتر، مقدار تنش عمودی متمرکز نشده و تغییر شکل از نوع الاستیک باشد (مهری شال و همکارانش، ۱۳۹۵).

مقاومت لغزشی سطوح عموماً با عبارت ضریب اصطکاک μ بیان می‌شود که با نسبت تنش برشی τ مورد نیاز برای لغزش بر تنش عمودی σ_n وارده بر سطوح تعیین می‌شود. از دیدگاه کلاسیک، ضریب اصطکاک یک مقدار ثابت است که از قوانین آمونتونز پیروی می‌کند اما در خصوص سطوح سنگی، یافته‌ها نشان می‌دهد که تمامی خصویات اصطکاکی را نمی‌توان با کمک باورهای سنتی از قبیل قوانین داوینچی، آمونتونز و یا نظریه‌ی کولمب تشریح نمود. همچنین فرایندهای فیزیکی که موجب بروز اصطکاک در سطوح سنگی می‌شوند به اندازه‌ای پیچیده هستند که نتوان به سادگی با استفاده از نظریهٔ نسبتاً جدیدتر چسبندگی (Adhesion theory) (که توسط بوودن و تابور(Bowden and Tabor)، ۱۹٦٤، ارائه شده است) قابل تفسیر باشند. زیرا دیدگاه‌هایی از قبیل غلبه بر چسبندگی اتصالات (که توسط بودن و تابور مطرح شده است)، قفل شدگی ریز دندانه‌ها (که توسط کولمب پیشنهاد شده است) و یا رانش دندانه‌های صلب روی یکدیگر و تغییر شکل الاستیک دندانه‌ها (که توسط داوینچی و آمونتونز مطرح شده است) تنها فرآیندهایی نیستند که طی لغزش سطوح سنگی بروز پیدا می‌کنند، بلکه علاوه بر این‌ها، به دلیل تغییرات تنش در نقاط تماس و همچنین با توجه به خواص مقاومتی مواد تشکیل دهنده‌ی سطوح تماس، سطوح معمولاً در نقاط تماس متراکم شده و ممکن است خواص اصطکاکی آنها تغییر کند. بعلاوه سطوح حین لغزش بر روی همدیگر خراش و سایش ایجاد می‌کنند و یا ممکن است طوری در هم قفل شوند که نیاز شود تا در ادامه‌ی لغزش تغییر شکل‌های بیشتری همانند گسیختگی‌های موضعی یا شکست دندانه‌ها از خود نشان دهند. بنابراین زمانی که پدیده‌هایی از قبیل اتساع، قفل شدگی، شکست دندانه‌ها و خصوصیات اصطکاکی پایه (یعنی اصطکاک سطوح سنگی صاف) به طور همزمان مورد توجه باشند، پارامترهای بیشتری برای بیان این رفتارها مورد نیاز است (مهری‌شال و همکارانش، ۱۳۹۵).

محققین علم تریبولوژی بر این باورند که در تقریب مرتبه‌ی اول، درنظر گرفتن ضریب اصطکاک (μ) به عنوان یک خصوصیت ثابت مواد برای بسیاری از کاربردهای مهندسی کفایت می‌کند (Popov, 2010). اما مطالعات دقیق‌تر در خصوص اصطکاک سنگ‌ها بیانگر آن است که ویژگی‌های اصطکاکی سنگ‌ها ثابت نبوده و در تقریب مرتبه‌ی دوم تابع عوامل بسیاری از قبیل تنش عمودی، نرخ برش، مدت زمان برقراری تماس، رطوبت، درجه حرارت و غیره هستند (Scholz and Engelder , 1976; Paterson and Wong, 2005; Scholz, 2019). مطالعات دقیق‌تر بر روی سازوکار پدیدهٔ اصطکاک سطوح سنگی تحت تاثیر تغییرات تنش عمودی و نرخ برش نشان داد که ضریب اصطکاک این قبیل سطوح با افزایش تنش عمودی به صورت لگاریتمی کاهش یافته و با افزایش نرخ برش نیز به صورت لگاریتمی افزایش می‌یابد (Mehrishal et al. 2016 and 2017). بنابراین با دانستن ضریب اصطکاک سطوح سنگی تحت یک تنش عمودی ثابت و مشخص و نرخ برش ثابت می‌توان در خصوص دامنهٔ تغییرات این مقدار اظهار نظر کرد.

۳. اجرای آزمایش‌های برش مستقیم

در این تحقیق، آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه درزه-های سنگی آهکی به دو صورت اجرا شدند. در روش اول آزمایش‌های برش مستقیم بر روی درزه‌های صاف ارّه بر شده و صفحه‌ای اجرا شده و در روش دوم نیز آزمایش‌ها بر روی درزه‌های کششی دارای زبری طبیعی اجرا شدند. جنس نمونه-ها شامل تراورتن تکاب با مقاومت فشاری تک محورهٔ ۷۷ مگاپاسکال و مرمریت خوی با مقاومت فشاری تک محورهٔ ۱۵۰ مگاپاسکال می‌باشند. آزمایش‌ها به کمک یک دستگاه برش مستقیم خود کنترل اجرا شدند که پیکربندی دستگاه و چگونگی قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. دستگاه آزمایش برش مستقیم خودکنترل و انواع نمونه‌های مورد آزمایش (آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه ملی سئول).

مقاومت برشی پسماند سطوح سنگی در طراحی‌های ژئوتکنیکی بسیار با اهمیت است. تحقیقات پیشین نشان داده است که مقاومت برشی سطوح زبر سنگی که طی مرحله‌ی برش پسماند بدست می‌آید تقریباً با مقاومت برشی پسماند بدست آمده از سطوح صاف ارّه بر شده از همان سنگ و تحت تنش عمودی یکسان، برابر است و تنها در برخی موارد به علت وقوع اتساع، اصطکاک سطوح زبر مقداری بزرگتر از اصطکاک سطوح صاف به دست می‌آید (Jaeger, 1971; Maurer, 1966; Byerlee, 1968; Engelder, 1974; Paterson, 1978; Mehrishal et al., 2016). از اینرو در این تحقیق تمرکز بررسی‌ها به رفتار برشی پسماند درزه‌های زبر و صاف معطوف شده است. توجه شود که در اینجا مقاومت برشی پسماند ناپیوستگی‌ها بیانگر ظرفیت تحمل نیروی برشی سطوح ناپیوستگی پس از وقوع مقدار ۲ میلیمتر جابجایی برشی در درزه‌های صاف و ۵ میلیمتر جابجایی برشی بعد از پیک در درزه‌های زبر است.

۳ -۱. *رفتار برشی پسماند درزه‌های صاف با اندازه‌های مختلف*

مفهوم استقلال ضریب اصطکاک از مساحت سطح تماس تحت تنش عمودی ثابت در علم تریبولوژی به عنوان یک اصل اساسی پذیرفته شده است. اما این سوال که "آیا اصطکاک در سنگ‌ها نیز از این قانون تبعیت می‌کند؟" موضوعی است که در این بخش با کمک اجرای آزمایش‌های خاصی بر روی درزه‌های ایجاد شده در دو نوع سنگ آهکی (تراورتن و مرمریت) مورد بررسی قرار گرفته است. توجه شود، این قاعده که ضریب اصطکاک سطوح درحال تماس مستقل از اندازهٔ مساحت سطح تماس است، تنها زمانی صادق است که تنش عمودی اعمال شده بر سطوح با اندازه‌های مختلف ثابت بماند. بنابراین آزمایش بایستی طوری طراحی شود که ابتدا قابلیت اعمال تنش‌عمودی یکسان بر روی سطوح با مساحت مختلف را داشته باشد، دوم اینکه توزیع تنش در سطوح تماس در حین برش یکسان بوده و تمرکز تنش ایجاد نشود. بدین ترتیب زبری‌ها که عامل اصلی بروز تمرکز تنش و ناهمسانی توزیع تنش هستند بایستی حذف شوند. از این رو آزمایش‌هایی بر روی درزه‌های صفحه‌ای

کاملاً صاف (Smooth planar joint surfaces) با مساحت‌های ۱، ٤، ۹، ١٦ و ۲۵ سانتی‌متر مربع و تحت دو مقدار تنش عمودی ثابت ۱ و ۲ مگاپاسکال در تراورتن و ۲ و ۵ مگاپاسکال در مرمریت و آهنگ برش ثابت ۰/۱ میلیمتر بر دقیقه اجرا شدند. بدین ترتیب که در سطوح با هر اندازه‌ای، نیروی عمودی طوری انتخاب شد تا تنش عمودی وارده به سطح تماس برای همهٔ آزمایش‌ها یکسان باشد. نتایج به دست آمده از این آزمایش‌ها تحت تنش عمودی ۲ مگاپاسکال در شکل ۲ نشان داده شده است. در اینجا از آوردن نتایج سایر آزمون‌ها خودداری می‌شود زیرا همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، ضریب اصطکاک پسماند سطوح سنگی کاملاً مستقل از مساحت سطح تماس است.

۳ -۲. نسبت تماس سطوح درزه‌های زبر طی برش

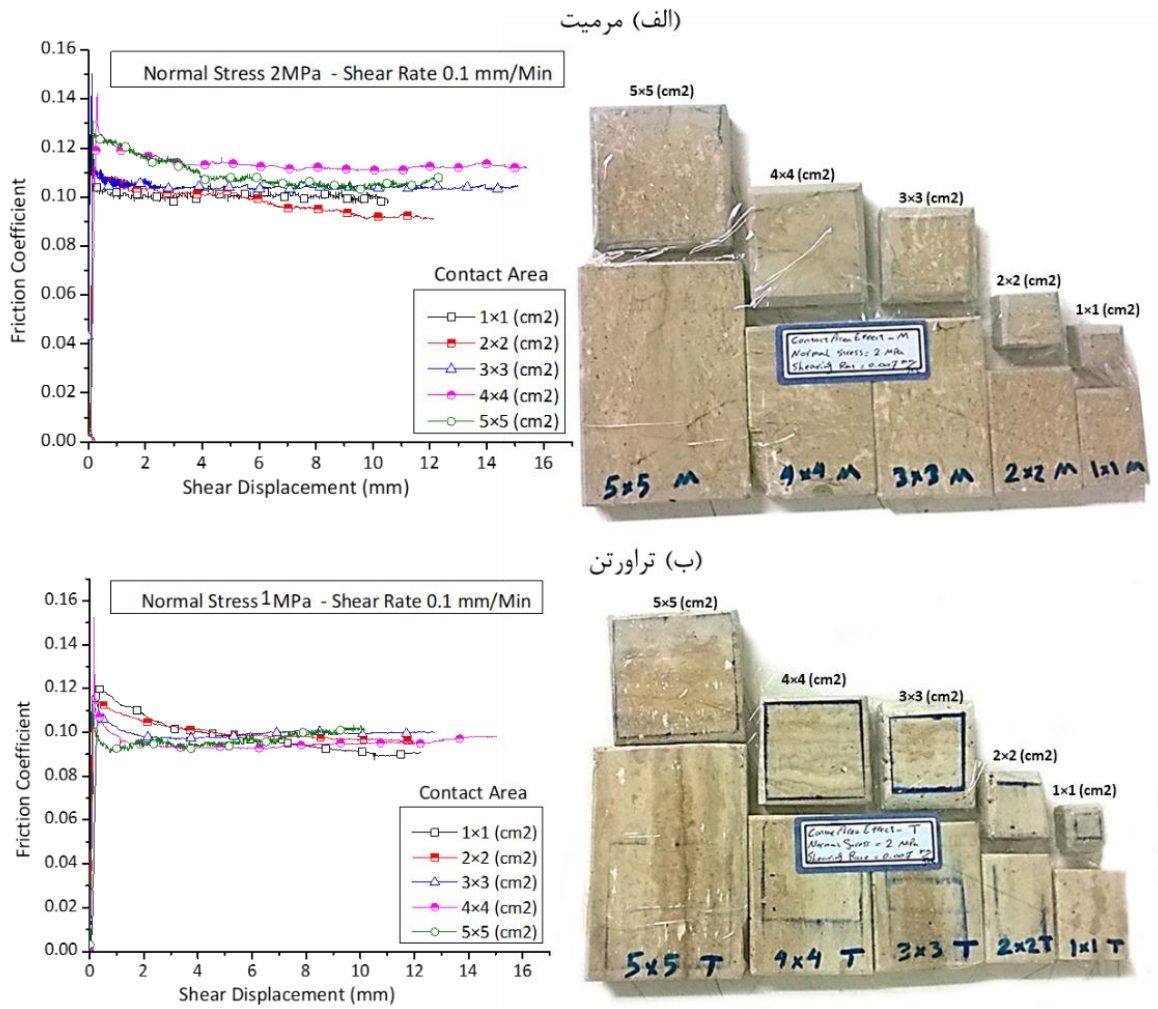
سری دوم آزمایش‌های برش مستقیم اجرا شده در این تحقیق مربوط به درزه‌های کششی مصنوعی زبر با زبری طبیعی و با ابعاد ۷۰×۸۰ میلیمتر هستند. آزمایش‌ها تحت تنش‌های عمودی ۰/۵، ۲ و ٤ مگاپاسکال برای درزه‌های مرمریتی و ۰/۵، ۱ و ۳/۵ مگاپاسکال برای درزه‌های تراوتن تحت نرخ برش ثابت ۰/۱ میلیمتر بر دقیقه اجرا شدند. نتایج آزمایش‌ها در ادامه در شکل ۳ آورده شده است. اما آنچه که در اینجا اهمیت دارد مقاومت برشی پسماند درزه‌ها است و این مسلّم است که تنش عمودی اولیهٔ وارده بر سطح درزه به دلیل وجود زبری‌ها در تمام طول آزمایش ثابت نمی‌ماند. دستگاه خود کنترل اعمال بار عمودی، تحت شرایط مرزی بار عمودی ثابت (CNL)، تنها با توجه به مساحت کلی سطح درزه، مقدار جابجایی برشی و مقدار اتساع درزه طی برش، اقدام به تغییر نیروی عمودی و ثابت نگه داشتن تنش عمودی می‌کند. بنابراین میزان واقعی تمرکز تنش عمودی بر روی سطوح تماس (یا نوک زبری‌ها) را بایستی به روش دیگری اندازه-گیری یا برآورد کرد.

اندازه یا مساحت سطوح در حال تماس یا اصطلاحاً نقاط تماس در درزه‌های زبر به نوعی بیانگر میزان تمرکز تنش‌های وارده بر صفحهٔ درزه است. در این تحقیق به منظور اندازه-گیری مساحت واقعی سطح تماس طی برش در درزه‌های زبر، ابتدا زبری‌ها و هندسهٔ سطوح درزه توسط دستگاه اسکنر لیزری سه بعدی برداشت شده و سپس با تجزیه تحلیل زبری-ها و با استفاده از شبیه‌سازی‌های کامپیوتری اندازهٔ مساحت سطح تماس درزه در مراحل مختلف برش محاسبه شدند. از آنجایی که هدف این تحقیق بررسی مقاومت برشی پسماند درزه‌ها است، مقدار متوسط نسبت تماس (Contact Ratio) سطوح درزه‌های زبر و همچنین میزان تنش عمودی تمرکز یافته بر روی نقاط تماس درزه‌های مورد آزمایش در مرحلهٔ پسماند در جدول ۱ آورده شده است.

۳ -۳. مقایسه مقاومت برشی پسماند درزه‌های زبر و درزه-های صاف

در اینجا به منظور مقایسهٔ نتایج آزمایش‌های اجرا شده بر روی درزه‌های زبر و صاف در مرحلهٔ پسماند، از میان تمامی آزمایش‌های اجرا شده، تعدادی از آنها که تحت تنش عمودی و نرخ برش نسبتاً مشابهی در مرحلهٔ پسماند مورد آزمایش قرار گرفته بودند انتخاب شدند و در کنار همدیگر مورد بررسی قرار گرفتند. برای این منظور درزه‌های با سطوح کاملاً صاف با ابعاد سطح تماس ۱۰×۱۰ میلیمتر تحت تنش‌های عمودی ۲ الی ۳۰ مگاپاسکال بر مرمریت و ۱/۵ الی ١٥/٤ مگاپاسکال بر روی تراورتن انتخاب شدند. نرخ برش در تمامی این آزمایش‌ها مقدار ثابت ۰/۱ میلیمتر بر دقیقه است.

نتایج آزمایش‌های برش مستقیم برای موارد مذکور به منظور مقایسه در کنار یکدیگر در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، انطباق مقاومت برشی پسماند درزه‌های صاف و زبر با همدیگر کاملاً مشهود است. بنابراین اینطور می‌توان تفسیر نمود که چنانچه مقادیر تنش عمودی واقعی وارد شده بر نقاط تماس سطوح درزه‌ها یکسان باشد، مقاومت برشی پسماند به دست آمده از درزه‌های صاف و کوچک از یک نوع سنگ با مقاومت برشی پسماند به دست آمده از درزه‌های استاندارد زبر از همان نوع سنگ انطباق



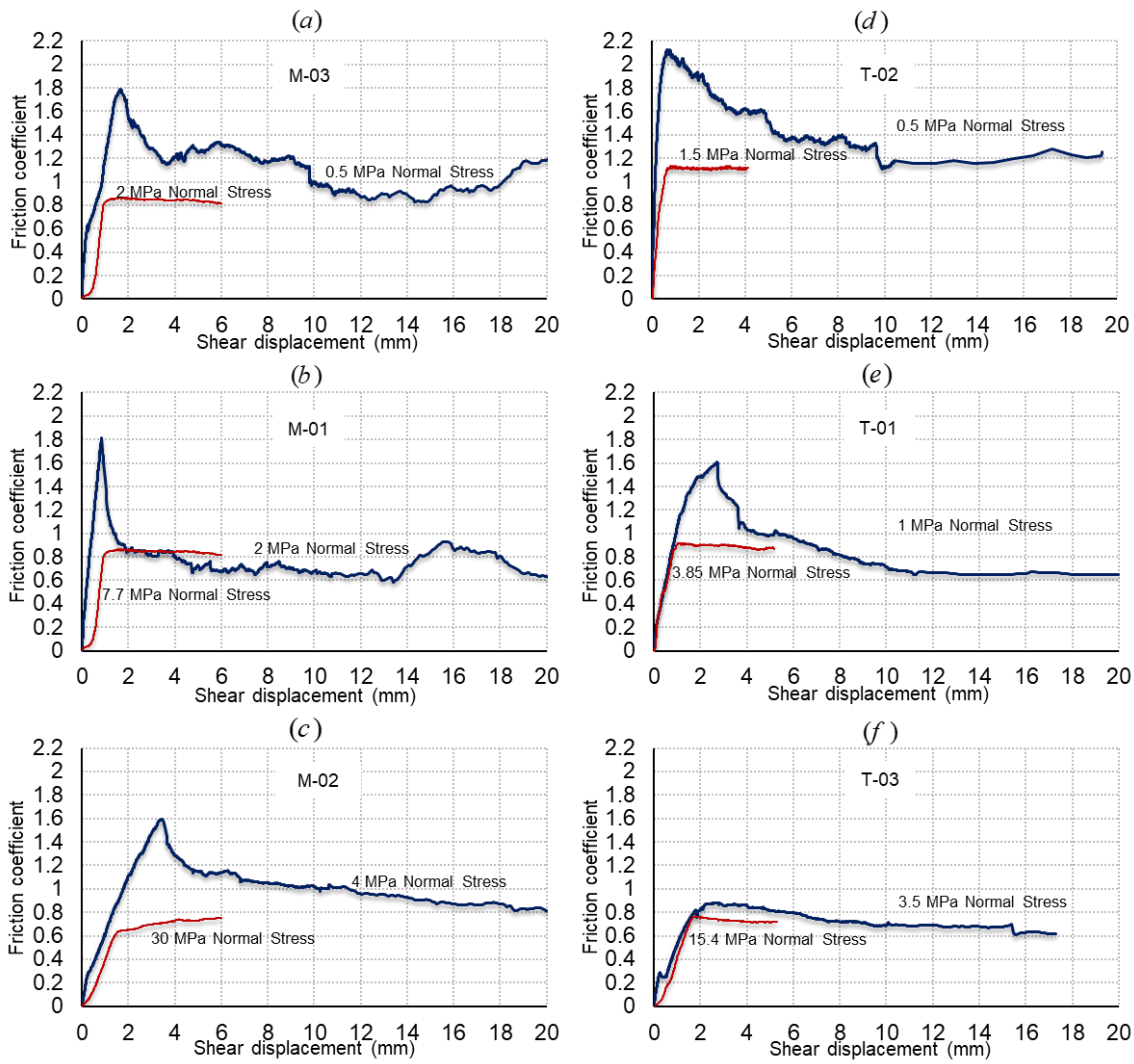
شکل ۲. رفتار اصطکاکی سطوح صاف سنگی با مساحت‌های تماس ۱، ٤، ۹، ١٦و ۲۵ سانتی‌متر مربع، تحت آهنگ جابجایی برشی ۰/۱ میلیمتر بر دقیقه. (الف) درزه‌های صاف مرمریت تحت تنش عمودی ۲ مگاپاسکال. (ب) درزه‌های صاف تراورتن تحت تنش عمودی ۱ مگاپاسکال.

جدول ۱. مقدار متوسط نسبت تماس سطوح درزه در مرحلهٔ برش پسماند و میزان تخمینی تنش عمودی تمرکز یافته بر روی نقاط تماس.

Focused mean vertical stress (MPa)	Contact Ratio in residual shear (%)	Initial vertical stress (MPa)	Joint Type
6	8	0.5	Marble
14	14	2	
24	17	4	
4	13	0.5	Travertine
5	20	1	
12	30	3.5	

خوبی دارد. توجه شود، برای آنکه بتوان بین نتایج آزمایش-های اجرا شده بر درزه‌های زبر و درزه‌های صاف مقایسه‌ای انجام شود، درزه‌های صاف بایستی تحت تنش‌های عمودی بیشتری آزمایش شوند زیرا در درزه‌های زبر، وجود زبری‌ها موجب کاهش سطح تماس در مرحلهٔ پسماند شده و بروز تمرکز تنش موجب افزایش مقدار تنش عمودی وارده بر نقاط تماس می‌شوند.

امروزه زبری‌های سطوح درزه با استفاده از تجهیزات پیشرفتهٔ اسکنر لیزری سه‌بعدی و یا با تکنیک‌های فتوگرامتری با دقت بسیار زیاد، چه به صورت برجا و چه به صورت آزمایشگاهی، قابل اندازه‌گیری هستند. بعلاوه مطالعات بسیار گسترده‌ای نیز در زمینهٔ تاثیر زبری‌ها بر رفتار برشی درزه‌ها اجرا شده است. بنابراین چنانچه از خصوصیات اصطکاکی پایهٔ سطوح سنگی (که به نوعی همان اصطکاک در مرحلهٔ پسماند است) اطلاع دقیقی وجود داشته باشد، می‌توان با توجه به زبری‌ها، مقدار ضریب اصطکاک به دست آمده را طوری اصلاح نمود تا بیانگر مقاومت برشی سطوح سنگی زبر باشد. بنابراین اندازه-گیری برجای مقاومت برشی پسماند یا همان ضریب اصطکاک پسماند سطوح سنگی به صورت برجا می‌تواند حائز اهمیت فراوانی باشد.



شکل ۳. مقایسهٔ رفتار برشی درزه‌های زبر استاندارد ۷۰×۸۰ میلیمتر با درزه‌های صاف کوچک ۱۰×۱۰ میلیمتر که طی مرحلهٔ برش پسماند تحت تنش‌های عمودی تقریباً یکسانی قرار گرفته‌اند. منحنی‌های a، b و c مربوط به نمونه‌های مرمریتی بوده و منحنی‌های d، e و f نیز مربوط به تراورتن هستند.

٤. پیشنهاد طراحی تریبومتر مخصوص سطوح سنگی

تحقیقات گستردهٔ اجرا شده در خصوص چگونگی تاثیر عوامل تنش عمودی، نرخ برش و زبری‌ها در رفتار برشی درزه‌های سنگی موجب شده است تا درک مناسبی از سازوکارهای تاثیر این عوامل بر اصطکاک سطوح سنگی ایجاد شود. بنابراین امروزه با دانستن ضریب اصطکاک پسماند سطوح سنگی تحت یک تنش عمودی ثابت و مشخص و نرخ برش ثابت می‌توان در خصوص دامنهٔ تغییرات این ضریب، تحت سایر حالات ممکن اظهار نظر کرد که البته این نیازمند داشتن یک بانک اطلاعاتی جامع از رفتار اصطکاکی دامنهٔ وسیعی از انواع سنگ‌ها است. بنابراین یا باید اقدام به جمع آوری و تجزیه تحلیل داده‌های آزمایشگاهی برش مستقیم اجرا شده بر روی انواع سنگ‌ها کرد و یا ابزاری ابداع نمود تا قابلیت اندازه‌گیری ضریب اصطکاک سطوح سنگی تحت شرایط مطلوب را دارا بوده و محدودیت‌های روش‌های اندازه‌گیری موجود را نیز نداشته باشد.

در حال حاضر چهار روش برای اندازه‌گیری مقاومت بررشی درزه‌ها وجود دارد که به طور خلاصه در شکل ٤ نشان داده شده و عبارتند از: (الف) آزمون سطح شیبدار بر روی نمونه-هایی با ابعاد چندین سانتی‌متر تا قطعات سنگ متراکم در ابعاد چند متر، (ب) جعبهٔ پرتابل برش مستقیم هوک برای نمونه-های مغزه‌ای کوچک، (ج) آزمایش برش مستقیم برجا برای درزه‌های بزرگ برجا، (د) آزمایش برش مستقیم آزمایشگاهی برای مطالعهٔ دقیق سازوکار برش. هرکدام از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را داشته و البته هر یک برای اهداف خاص و با دقت مشخص مورد استفاده قرار می‌گیرند. این روش‌ها دارای برخی محدودیت‌های عمده هستند که عبارتند از:

(۱) نیاز به نمونه‌گیری‌های خاص و به کارگیری روش‌های آماده سازی نمونه جهت جانمایی در جعبهٔ برش دارند.

(۲) عموماً نیازمند به کارگیری تجهیزات سنگین و دست و پا گیر هستند.

(۳) آزمون سطح شیبدار و سلول برش هوک تنها مقاومت پیک را ارائه می‌دهند و سایر روش‌ها نیز بسیار وقت‌گیر و پرهزینه هستند.

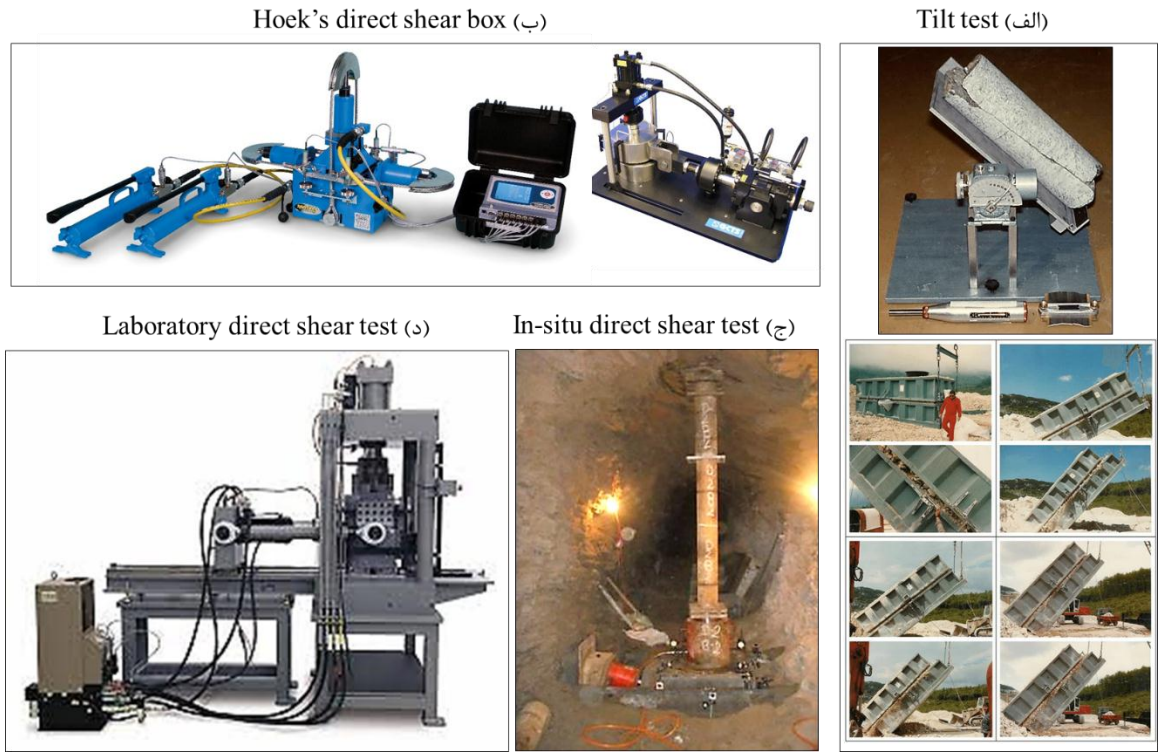
(٤) بجز در آزمایش برش مستقیم آزمایشگاهی، سایر روش‌ها در اعمال تنش‌های عمودی زیاد شدیداً محدودیت دارند.

(۵) بجز در آزمایش برش مستقیم برجا، در سایر روش‌ها نمونه‌ها به شدت دستکاری می‌شوند.

(٦) اعمال جابجایی برشی زیاد و حصول مقاومت برشی پسماند فقط در روش آزمایش برش مستقیم آزمایشگاهی امکاناپذیر است.

(۷) مهارت مهندس یا تکنسین مجری آزمایش در کنترل تجهیزات و مدت زمان اجرای آزمون بر روی مطلوبیت نتایج تاثیر زیادی دارد.

بنابر آنچه ذکر شد، به نظر می‌رسد ارائهٔ یک روش آسان برای ارزیابی مقاومت برشی درزه‌ها می‌تواند در پیش‌برد اهداف مهندسی مکانیک سنگ اهمیت زیادی داشته باشد. چنانچه در بخش‌های قبلی ذکر شد، مقدار مقاومت برشی پسماند به دست آمده از درزه‌های با ابعاد کوچک با مساحت یک سانتی متر مربع که اصطلاحاً در اینجا به آن تماس نقطه‌ای گفته می-شود، همخوانی بسیار خوبی با مقاومت برشی پسماند به دست آمده از آزمایش‌های استاندارد برش مستقیم آزمایشگاهی که بر روی درزه‌های زبر اجرا شده‌اند دارد. بنابراین با در نظر گرفتن این موضوع می‌توان ابزاری را ابداع نمود تا به دور از مشکلات اجرایی یاد شده، به آسانی بتواند ضریب اصطکاک پسماند سطوح سنگی تحت تماس نقطه‌ای را اندازه‌گیری نماید. از آنجایی که مساحت تماس کوچک است، تحت بارهای عمودی کم نیز همواره لغزش با سایش همراه بوده و ضریب اصطکاک پسماند به دست آمده در واقع همان مقاومت برشی پسماند درزه خواهد بود. بعلاوه شرایط مذکور در حیطهٔ عمل تریبولوژی بوده و در ساخت چنین ابزاری می‌توان از تکنولوژی تریبومترها بهره برد.

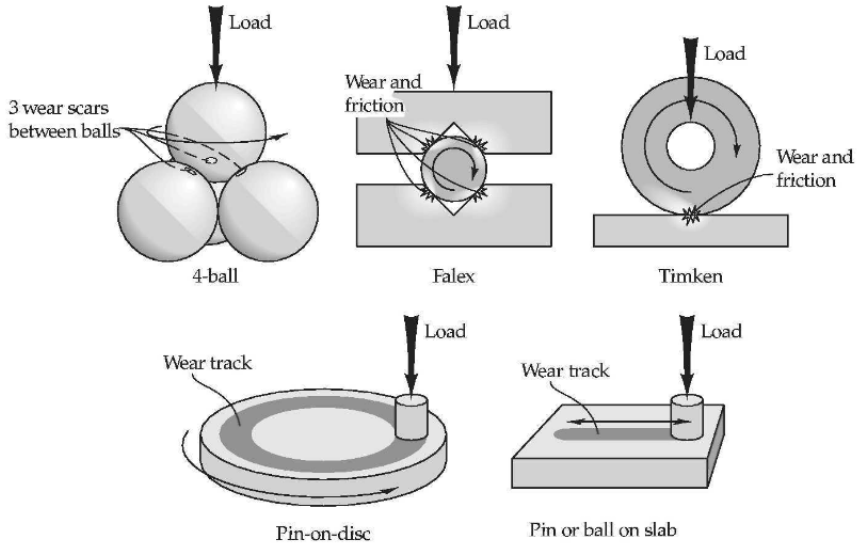


شکل ٤. انواع روش‌های اندازه‌گیری مقاومت برشی سطوح سنگی.

٤ -١. تریبومترها

تریبومترها ابزارهایی هستند که برای اندازه‌گیری اصطکاک و سایش بین انواع سطوح در حال تماس در مکانیک تماس به کار می‌روند. تریبومتر(Tribometer) یا اصطکاک سنج یک تکنولوژی پایه‌ای است که در بسیاری از بررسی‌های اصطکاک شناسی (یا اصطلاحاً تریبولوژیکی) مورد استفاده قرار می‌گیرند. دستگاه تریبومتری که با دقت و توجه درست به مقصود مورد نظر، طراحی شده باشد می‌تواند تمامی خصوصیات بحرانی سایش یا مسائل اصطکاک را به آسانی و بدون مشکلاتی که در اجرای آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس واقعی و آزمایشگاهی وجود دارد، شبیه سازی نماید. از طرف دیگر، برعکس اگر تریبومتر به خوبی طراحی نشده باشد یا به دقت انتخاب نشود، می‌تواند نتایج کاملاً اشتباهی را از خواص اصطکاکی سطوح ارائه نماید. نکتهٔ قابل توجه در اینجا آن است که تمامی مطالعات تریبولوژیکی نیازمند به‌کارگیری یا توسعهٔ تریبومترهای مخصوص تحت تماس دینامیکی مطلوب هستند (Stachowiak, and Batchelor, 2004).

تریبومترها تنوع بسیاری دارند و در این نوشتار فقط ویژگی‌های اصلی آنها بیان خواهد شد. هدف استفاده از تریبومتر در علم مکانیک تماس آن است که بتوان پدیده‌های لغزش و سایش را تحت شرایط کنترل شده‌ای شبیه‌سازی کرد. اصطکاک و سایش به عواملی از قبیل تغییرات دما، تغییرات نیرو یا بار و تغییرات رطوبت و نرخ یا سرعت جابجایی برشی بسیار حساس هستند. بنابراین مهم است که ابزار یا دستگاهی ساخته شود که تمامی پارامترهای ذکر شده در آن تحت کنترل و قابل مانیتورینگ یا پایش باشند. دلیل دیگر در توجیه توسعهٔ تریبومترها آن است که این گونه ابزارها امکان اندازه‌گیری‌های دقیق اصطکاک و سایش را فراهم می‌نمایند به طوری که امکان این‌گونه اندازه‌گیری‌ها توسط روش‌های موجود امکان‌پذیر نیست و یا بسیار پرهزینه و وقت‌گیر است. همهٔ تریبومترها یک بخش تماسی سایشی دارند که فرآیند اجرای آزمایش اصطکاک در آن بخش تمرکز دارد و در حقیقت قلب تریبومتر است. تریبومترهای پیشرفتهٔ امروزی به ابزارهایی مجهز هستند که می‌توانند ضریب اصطکاک، نرخ



شکل ۵. طرح شماتیک سازوکارهای اساسی تریبومترهای مرسوم در مطالعات تریبولوژیکی (Stachowiak, and Batchelor, 2004).

سایش و همچنین دما را در حین اجرای آزمون اندازه‌گیری کنند. یک عامل مهمی که باعث تنوع گستردهٔ تریبومترهای می‌شود آن است که در شرایط واقعیِ پدیدهٔ اصطکاک، فرآیندهای گوناگونی از قبیل سایش، لغزش، سایش-لغزش، خراش، فشردگی، فرسایش و غیره رخ می‌دهند که برای شبیه-سازی هرکدام از آنها نیاز به اِعمال طراحی‌های خاصی در تریبومترها است. طرح شماتیک برخی از تریبومترها که بیشتر از سایر انواع آنها مورد توجه و استفاده قرار گرفته‌اند در شکل ۵ آورده شده است.

اگرچه اکثریت تریبومترها دستگاه‌های رومیزی بوده که برای اجرای آزمون‌های آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده‌اند ولی تریبومترهای ویژه‌ای نیز وجود دارند که کاربردهای صنعتی و صحرایی دارند (Chen and Ursell, 1979). تریبومترها تنوع بسیاری دارند زیرا به دلایل علمی و همچنین به این دلیل که محققان اغلب علاقه دارند که دستگاه آزمایشگاهی پیشرفتهٔ خود را با توجه به اهداف تحقیق خاص خود طراحی کنند، تعداد متعددی از انواع گوناگون تریبومترها توسعه داده شده است. امروزه حدود ۲۴۳ نوع مختلف از این ابزار با طراحی-های گوناگون ساخته شده است که البته متاسفانه در بسیاری از آنها اغلب به جنبه‌های راحتی کار با آنها توجه شده و بعضاً اصول مطالعات تریبولوژیکی در آن رعایت نشده است (Stachowiak, and Batchelor, 2004). بنابراین علیرغم تنوع تریبومترها، آنهایی که توسط گروه‌های تحقیقاتی مورد استفاده قرار می‌گیرند تعداد کمی است. بعلاوه تریبومترهایی که تاکنون برای بررسی سطوح سنگی ابداع شده‌اند بسیار معدود بوده و اغلب برای اهداف مطالعهٔ قابلیت ساینده‌گی سنگها تحت تماس‌های سنگ-فلز به کار گرفته شده و دارای برخی محدودیت‌هایی در گسترهٔ عملیاتی هستند. بعلاوه تاکنون هیچ گزارشی از توسعهٔ تریبومترهای قابل حمل (پرتابل) که قابلیت اندازه‌گیری اصطکاک سطوح تماس سنگ-سنگ به صورت برجا را داشته باشند، ارائه نشده است. بنابراین به نظر می‌رسد معرفی و بررسی امکان کاربرد چنین ابزاری با قابلیت ارزیابی خواص اصطکاکی ناپیوستگی‌های سنگی در مطالعات مهندسی سنگ می‌تواند ارزشمند بوده و مفید واقع شود.

در مواردی که استفاده از تریبومترهای موجود برای اهداف مورد نظر مقدور نباشد، برای کاربردهای خاص نیاز است تا دستگاه جدید با ویژگی‌های مخصوص طراحی و ساخته شود. در چنین مواردی سوال اساسی آن است که نیاز اصلی چیست و چه تریبومتری برای رفع نیاز ما مناسب‌تر است؟ در طراحی هر تریبومتر اولین اصل اساسی که باید رعایت شود، تامین صلبیتِ مکانیکی کافی است. چنانچه دستگاه تریبومتر به اندازهٔ کافی صلب باشد از لرزش‌های ناگهانی جلوگیری شده،

تغییرشکل‌ها تماماً مربوط به سطوح تماس بوده و ناشی از خم شدن قطعات دستگاه نبوده و اندازه‌گیری‌های دقیق‌تری قابل حصول هستند. اصل اساسی دوم چگونگی وارد کردن بار یا نیروی عمودی بر سطوح تماس است. نیروی عمودی را می‌توان به کمک تجهیزات هیدرولیکی، پنیوماتیکی، فنر، ایجاد میدان مغناطیسی و یا آویزان کردن وزنه‌های ثقلی بر سطوح تماس وارد نمود. چنانچه سطوح تماس و لغزش زبری قابل توجهی داشته باشند استفاده از وزنه‌های آویزان بهترین گزینه است تا با بروز جابجایی‌های اتساعی (عمود بر سطح) در حین آزمایش، مقدار بار عمودی وارده ثابت باشد. اصل اساسی سوم هم آن است که برای اینکه دمای سطوح تماس و ارتعاشات دستگاه در حین آزمایش لغزش افزایش نیابد، باید سرعت لغزش بسیار کم باشد (Bowden and Tabor, 2001).

٤ -۲. الزامات طراحی تریبومتر مخصوص سطوح سنگی

تریبومتر پیشنهادی در این پژوهش مخصوص سنجش اصطکاک سطوح سنگ-سنگ است؛ به همین دلیل برخی الزامات در رعایت استانداردها (یا حداقل‌ها) در فرآیند اندازه‌گیری اصطکاک درزه‌ها وجود دارد که می‌بایست رعایت شوند. بعلاوه از آنجایی که دستگاه مزبور باید تا حد امکان سبک بوده و به آسانی قابل حمل و برپاسازی باشد، الزام به رعایت برخی نکات در طراحی آن وجود دارد که در ادامه به اختصار به آنها اشاره شده است:

- نرخ یا سرعت جابجایی برشی حداکثر ۱ میلیمتر بر دقیقه طراحی شود.
- با توجه به اندازهٔ تماس در این روش ابداعی، مقدار جابجایی برشی حداقل ۵ میلیمتر و حداکثر ۲۰ میلیمتر کافی است.
- ابعاد اجزاء دستگاه طوری طراحی شوند تا استفاده از آن بر روی کف یا دیوارهٔ تونل و سایر سطوح شیبدار ممکن باشد.
- جهت اعمال نیروی عمودی به سطوح تماس از سازوکار تعلیق وزنه، قرقره و اهرم استفاده شود تا حداکثر نیروی ۵۰ کیلوگرمی به سطوح تماس نقطه‌ای قابل اعمال باشد. مقدار تنش وارده با توجه به اندازهٔ سطح تماس و وزنه قابل تنظیم باشد.
- جنس وزنه‌های بارگذاری بهتر است از سرب باشد تا حجم کمتری را اشغال کند.
- ابعاد اجزاء و اتصالات طوری باشد که تغییرشکل‌ها و کمانش‌ها قابل چشم‌پوشی بوده و بتوان دستگاه را صلب فرض کرد.
- اجزایی که کمتر تحت نیرو و تغییر شکل قرار دارند بهتر است از صفحات فشرده چوبی یا پلاستیکی (تفلون) ساخته شوند تا در حد امکان، وزن دستگاه کاهش یابد.
- نمونهٔ سنگ مورد آزمایش به صورت کلوخه‌ای فرض شود تا نیاز به آماده سازی نداشته باشد و با استفاده از یکی از گوشه‌های آن تماس سنگ-سنگ بین نمونه و لایهٔ سنگی زیرین ایجاد شده و آزمایش اجرا شود.
- گیرهٔ یا جعبهٔ نمونه حداقل قابلیت جاگیری مغزه‌های NX (قطر ٥٤ میلیمتری) را داشته باشد.

٤ -۳. طرح مفهومی پیشنهادی اجزاء تریبومتر مخصوص سطوح سنگی

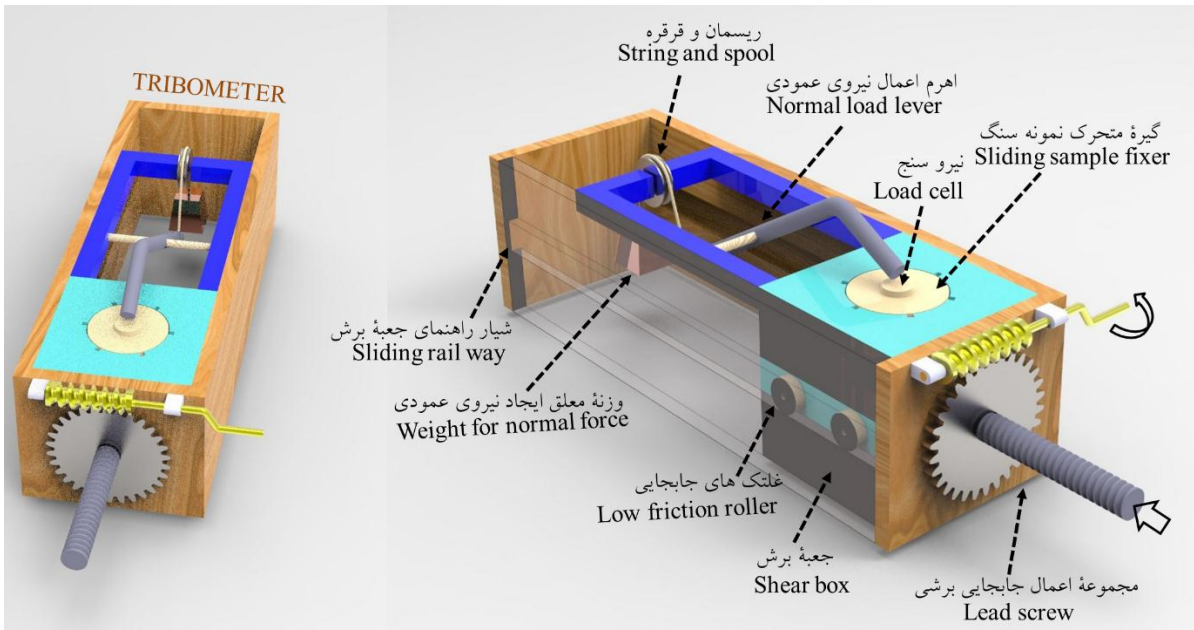
تریبومتری که در اینجا پیشنهاد شده است برای آنکه محدودیت‌های روش‌های پیشین را نداشته باشد و از طرفی دارای امتیازاتی خاص باشد، باید شامل اجزایی باشد که در شکل ٦ به صورت یک طرح مفهومی نمایش داده شده است. همچنین نحوهٔ اجرای آزمایش برش بین نمونهٔ سنگ و سطح لایهٔ سنگی برجا نیز به طور شماتیک در شکل ۷ بیان شده است. در ادامه وظایف هر کدام از بخش‌های این تریبومتر به اختصار شرح داده شده است:

جعبهٔ برش: بخشی از دستگاه که گیرهٔ نمونه را در بر گرفته و نیروهای عمودی و برشی را به نمونه اعمال می‌کند. همچنین جعبهٔ برش به کمک غلتک‌هایی در دو طرف شیار بدنهٔ دستگاه به صورت کاملاً افقی و با کمترین اصطکاک حرکت می‌کند. بعلاوه جعبهٔ برش دارای یک دستک جهت تعلیق وزنه است.

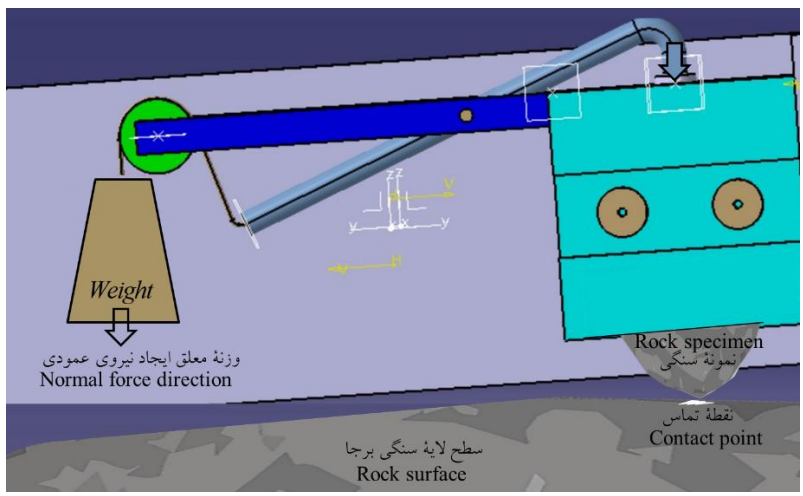
گیرهٔ نمونه: بخشی که نمونه در داخل آن قرار گرفته و داخل جعبهٔ برش تعبیه می‌شود و به کمک غلتک‌هایی در داخل شیارهای جعبهٔ برش در راستای عمودی آزادی حرکت دارد.

مجموعهٔ اعمال نیروی قائم: شامل وزنه، ریسمان، قرقره و اهرم است که نیروی وزن به وسیلهٔ ریسمان و قرقره به اهرم وارد شده، اهرم نیز حین تغییر جهت نیروی وارده، مقدار نیرو را به میزان لازم افزایش داده و مستقیماً به بالای گیرهٔ نمونه وارد می‌کند و گیرهٔ نمونه نیز نیرو را به نقطهٔ تماس منتقل می‌کند.

مجموعهٔ اعمال نیروی برشی: شامل هندل یا دستهٔ چرخش، استوانهٔ مارپیچ، چرخ دنده و محور (lead screw) با رزوهٔ گام ریز است که با چرخش چرخ‌دنده، جعبهٔ برش را با سرعت ثابت به جلو حرکت داده و نمونهٔ داخل گیرهٔ برش در سطح تماس خود با لایهٔ سنگی زیرین دچار برش می‌شود. در مواردی که ثابت نگه داشتن نرخ برش اهمیت داشته باشد می‌توان از موتور الکتریکی برای چرخاندن استوانهٔ مارپیچ استفاده کرد.



شکل ٦. طرح مفهومی اجزاء سازندهٔ تریبومتر سطوح سنگی



شکل ۷. طرح شماتیک نحوهٔ اجرای آزمایش برش بین نمونهٔ سنگ و سطح لایهٔ سنگی

مجموعهٔ اندازه‌گیری نیروها: نیروهای عمودی و برشی وارده بر نمونه توسط حسگرهای نیرو که داخل جعبهٔ برش در حدفاصل گیرهٔ نمونه تعبیه شده‌اند در بازه‌های زمانی خیلی کوتاه به صورت خودکار قرائت شده و توسط یک مدار الکترونیکی ثبت شود.

سیستم ثبت، محاسبه و نمایش داده‌ها: مقادیر اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای عمودی و برشی توسط ریزپردازنده‌هایی که برای این منظور برنامه ریزی شده‌اند تجزیه و تحلیل شده و مقدار ضریب اصطکاک بیشینه، متوسط و کمینه توسط یک نمایشگر کوچک و کم مصرف نشان داده شوند. مدار الکترونیکی ثبت داده‌ها قابلیت ذخیره سازی و انتقال داده‌ها به حافظهٔ USB یا کارت‌های SD را داشته و می‌تواند نتایج آزمایش‌ها را به ترتیب به صورت مجزا آدرس دهی، ثبت و ذخیره نماید. بدین ترتیب نتایج آزمایش‌ها قابلیت دسترسی‌های بعدی و بررسی‌های بیشتر را دارند.

۵. جمع بندی یافته‌های تحقیق

رفتار برشی بعد از پیک درزه‌های سنگی در طراحی‌های مهندسی سنگ بسیار با اهمیت است. مقاومت برشی بعد از پیک درزه‌های سنگی اغلب کمتر از مقاومت برشی حداکثر (پیک) است و در اینجا مقاومت برشی پسماند نامیده شده است. در این تحقیق روشی برای اندازه‌گیری مقاومت برشی پسماند که یکی از ویژگی‌های مهم ذاتی اصطکاک سطوح سنگی است، پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی در این تحقیق بر پایهٔ برخی یافته‌های حاصله از مطالعات آزمایشگاهی پایه‌ریزی شده است که عبارتند از:

- تحت شرایط تنش و نرخ برش یکسان در محل‌های تماس بین سطوح سنگی، ضریب اصطکاک سطوح زبر سنگی که طی مرحله‌ی پسماند برش بدست می‌آید تقریباً با ضریب اصطکاک پسماند بدست آمده از سطوح صاف ارّه بر شده از همان سنگ برابر است و تنها در برخی موارد به علت زبری‌ها و تموج سطوح، اصطکاک سطوح صاف مقداری کوچکتر از اصطکاک سطوح زبر است.
- مقاومت برشی پسماند سطوح سنگی تحت شرایط تنش و نرخ برش ثابت، تقریباً مستقل از اندازهٔ تماس هستند.
- در درزه‌های دارای زبری طبیعی، نسبت تماس در مرحلهٔ برش پسماند تا کمتر از ۱۵ درصد کاهش می‌یابد، بنابراین تنش عمودی وارده در نقاط تماس در اثر تمرکز تنش، بطور متوسط تا ۷ برابر افزایش می‌یابد.
- اگرچه مقاومت برشی پسماند سطوح سنگی یک خاصیت ذاتی بوده و شدیداً به جنس کانی‌های تشکیل دهندهٔ سنگ بستگی دارد ولی مقدار ضریب اصطکاک پسماند این سطوح مقدار ثابتی نبوده و به نرخ برش و مقدار تنش عمودی وارده بستگی دارد.
- مقاومت برشی پسماند سطوح سنگی، چه در سطوح زبر و چه در سطوح صاف، شدیداً تحت تاثیر فرآیند سایش و تغییر شکل میکروزبری‌ها در محل تماس است.

بدین ترتیب با جمع‌بندی یافته‌های فوق می‌توان روشی را طرح ریزی کرد که امکان ارزیابی آسان خصوصیات اصطکاکی سطوح سنگی را فراهم نماید. در واقع یک کاربرد عملی از این یافته‌ها آن است که می‌توان ابتدا مقاومت برشی پسماند سطوح سنگی با سطح تماس کوچک را تحت تنش‌های عمودی مختلف اندازه‌گیری کرد و سپس با توجه به اندازهٔ زبری‌های سطوح زبر سنگی و توجه به میزان بروز اتساع طی برش، ضرایب به دست آمده را طوری اصلاح کرد که معرف دامنهٔ تغییرات مقاومت برشی سطوح تحت تنش‌ها و جابجایی‌های برشی مختلف باشد. روشن است که اگر مساحت تماس کوچک باشد، تحت بارهای عمودی کم نیز همواره لغزش با سایش همراه بوده و ضریب اصطکاک پسماند به دست آمده در واقع همان مقاومت برشی پسماند درزه خواهد بود. بنابراین از آنجایی که شرایط مذکور در حیطهٔ عمل تریبولوژی است، برای رسیدن به این هدف استفاده از تکنولوژی تریبومترها مناسب به نظر می‌رسد.

در نهایت بر مبنای اصول تریبومترها و با در نظر گرفتن برخی الزامات در رعایت استانداردها در فرآیند اندازه‌گیری اصطکاک سطوح سنگی، در این تحقیق طرح مفهومی یک نوع

تریبومتر که مخصوص اندازه‌گیری اصطکاک سطوح سنگی طراحی شده است، پیشنهاد شد. ناگفته نماند، اگرچه طراحی دقیق و ساخت تریبومتر مخصوص اندازه‌گیری اصطکاک پسماند سطوح سنگی و همچنین اجرای آزمایش‌های اعتبار سنجی با آن و مقایسهٔ نتایج با سایر روش‌های موجود مستلزم صرف وقت و هزینه زیاد است، امّا همانطور که در این نوشتار به آن پرداخته شد، با توجه به یافته‌های آزمایشگاهی ارائه شده در این تحقیق و جمع‌بندی اظهارات محققین پیشین، این موضوع از لحاظ تئوری قابل اجرا بوده و چنانچه مورد پژوهش قرار گیرد، نتایج به دست آمده از آن بسیار ارزشمند خواهد بود.

منابع

مهری‌شال، س ا.، شریفزاده، م.، شهریار، ک.، ۱۳۹۵. سازوکار اصطکاکی و چسبندگی در مقاومت برشی درزه‌ها. رسالهٔ دکتری، گرایش مهندسی مکانیک سنگ، دانشکدهٔ معدن و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران).

Bowden, F. P., & Tabor, D. 2001. The friction and lubrication of solids (Vol. 1). Oxford university press.

Cai, M., Kaiser, P. K., Tasaka, Y., & Minami, M. (2007). Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 44(2), 247 265.

Chen, J. H., & Ursell, C. R. 1979. Comparison of Wire Rope Life Using Nylon and Steel Sheaves-Part 1: Test Methodology and Comparison of Wire Rope Endurance Life (No. 790904). SAE Technical Paper.

Crowder JJ, Bawden WF. 2004. Review of post-peak parameters and behaviour of rock masses: current trends and research. Rocnews.

Gao FQ, Kang HP. 2016. Effects of pre-existing discontinuities on the residual strength of rock mass—insight from a discrete element method simulation. J Struct Geol 85:40–50

Hoek, E. 2007. Practical rock engineering. e-book. Toronto: Rocscience (electronic resource).

Jaeger, J. C. 1971. Friction of rocks and stability of rock slopes. Geotechnique, 21(2), 97-134.

Labrie D. 2017. Frictional properties of rocks as a function of rock type, specimen size and confining pressure. In: The 51st US Rock Mechanics Symposium. American Rock Mechanics Associatio.

Mehrishal, S., Sharifzadeh, M., Shahriar, K., & Song, J. J. 2016. An experimental study on normal stress and shear rate dependency of basic friction coefficient in dry and wet limestone joints. Rock Mechanics and Rock Engineering, 49(12), 4607-4629.

Mehrishal, S., Sharifzadeh, M., Shahriar, K., & Song, J. J. 2017. Shear model development of limestone joints with incorporating variations of basic friction coefficient and roughness components during shearing. Rock Mechanics and Rock Engineering, 50(4), 825-855.

Paterson, M. S., & Wong, T. F. 2005. Friction and sliding phenomena. Experimental Rock Deformation—The Brittle Field, 165-209.

Popov, V. L. 2010. Contact mechanics and friction (pp. 231-253). Berlin: Springer Berlin Heidelberg.

Scholz C H, Engelder J T, 1976 The role of asperity indentation and ploughingin rock friction: Asperity creep and stick-slip. Int. J. Rock Mech. Men.and Geomech. Abstr. 13, 149-154.

Scholz, C. H. 2019. The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge university press.

Singh, H. K., & Basu, A. 2018. Evaluation of existing criteria in estimating shear strength of natural rock discontinuities. Engineering Geology, 232, 171-181.

Stachowiak, G., & Batchelor, A. W. 2004. Experimental methods in tribology (Vol. 44). Elsevier.

Walton, G., Labrie, D., & Alejano, L. R. 2019. On the Residual Strength of Rocks and Rockmasses. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1-13.

Maurer W C. 1966. Shear failure of rock under axial and hydrostatic pressure. In: Proc. 1st Congr. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon, Vol. I, pp. 337-34.

Engelder J T. 1974a. Cataclasis and the generation of fault gouge. Bull. Geol. Soc. Am. 85, 1515-1522.

Investigation on residual friction coefficient of rock surfaces under small and standard contact sizes and suggestion the application of tribometer to measuring it

S. Mehrishal *[1], M. Vajdi [2], H. Bahador [3]

Abstract

Investigation and determination of residual frictional properties of rock joints is important for designing structures on or within the rock masses. Tribometer is a device to measure frictional properties of various types of contacting surfaces. In this research, several direct shear experiments conducted on two types of artificial limestone joints named Onyx marble and Travertine. Two types of surfaces geometry such as rough tensile joint surfaces with standard dimensions (based on ISRM suggested methods) and grinded planar small surfaces with dimensions ranged from 1 cm^2 to 25 cm^2 were prepared. Direct shear experiments by constant shearing rate and under different normal stresses conducted in CNL boundary condition. Results obtained from the residual state of the shear were gathered and investigate and it found that the residual friction coefficient of limestone rock joints, under almost similar normal stress and shearing rate conditions, remains approximately constant with differing the contact size of the specimens. In addition, under approximately similar stress concentrations in contact regions, the residual shear behavior of rough surfaces with standard dimensions is very similar to that of small planar ground surfaces in limestone joints. Finally, based on findings in this research and some other past researches, it is proposed to apply tribometers for measuring the residual shear strength of rock joints. In this paper, a conceptual design of a tribometer is proposed to develop for measuring residual frictional properties of a point contacts of rock surfaces during 5 to 20 mm shear displacements.

***Key words**: rock joint shear strength, stress concentration on roughness, scale independency of residual shear, CNL shear*

1. PhD Student, Department of Engineering Gology, Tarbiat Modares University.
2. Professor, Department of Engineering Gology, Tarbiat Modares University, khamechm@modares.ac.ir
3. Associate Professor, Department of Engineering Geology, Tarbiat Modares University.
4. Associate Professor, Earth Sceince Research Institute, Geological Survey of Iran.

*** Corresponding Author**

چکیده مبسوط انگلیسی: