نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"

Iranian Journal of Mining Engineering
(IRJME)

دوره سوم، شماره ششم، سال ۱۳۸۷، صفحه ۱ تا ۷

Vol. 3, No. 6, 2008, pp. 1-7

اصلاح دستگاه برش مستقیم آزمایشگاهی و مقایسه نتایج حاصل از انجام آزمایش با دستگاه‌های معمولی و اصلاح شده

مرتضی قارونی‌نیک *

استادیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت‌ایران، E-mail: gharouni@doctor.com

(دریافت ۱۵ مرداد ۱۳۸۷ ، پذیرش ۲۹ فروردین ۱۳۸۸)

چکیده

یکی از روش‌های بررسی خواص مکانیکی سنگ‌ها آزمایش برش مستقیم است .این آزمایش بعنوان ساده‌ترین و عمومی‌ترین روش مورد استفاده برای تعیین مقاومت برشی سنگ‌های حاوی صفحات ضعیف یا ناپیوستگی شناخته می‌شود. این نوع آزمایش معمولا در آزمایشگاه انجام می‌شود. لیکن ممکن است در محل پروژه و با استفاده از دستگاه برش مستقیم قابل حمل نیز اجرا گردد. از آنجا که در انجام این آزمایش فشارهای برشی و قائم هر دو با پمپ‌های دستی اعمال می‌شوند، ابهاماتی در دقت نتایج وجود دارد.این ابهامات را می‌توان با اعمال تنش برشی با استفاده از پمپ‌های هیدرولیکی برقی بجای پمپ های مکانیکی موجود تاحد زیادی حذف کرد. با استفاده از این نوع پمپ‌ها افزایش تنش برشی در حین اجرای آزمایش منظم بوده و نرخ تغییرات آن قابل کنترل می‌باشد. یک باطری ۱۲ ولتی پمپ‌های الکتریکی را تغذیه می‌کند. لذا مزیت قابل حمل بودن این دستگاه نیز حفظ خواهد شد.

تعدادی آزمایش برش مستقیم با استفاده از هر دو دستگاه (دستگاه برش مستقیم موجود و دستگاه برش مستقیم اصلاح شده) انجام گردید. جهت مقایسه دقیق و نزدیک نتایج این آزمایش با دو دستگاه مذکور، تعدادی نمونه مصنوعی حاوی یک ناپیوستگی تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از اینکار نشان می‌دهد که اختلافاتی بین نتایج بدست آمده از دو دستگاه مذکور وجود دارد و این مطلب نشان دهنده اینست که با توجه به دقیق‌تر بودن دستگاه اصلاح شده، باید روی نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم با دستگاه قابل حمل موجود در آزمایشگاه درنگ و تامل بیشتری بعمل آورد.

کلمات کلیدی

آزمایش برش مستقیم، دستگاه آزمایش معمولی و اصلاح شده، نمونه‌های مصنوعی.

* عهده‌دار مکاتبات

۱- مقدمه

رفتار توده سنگ‌ها اغلب با حضور ناپیوستگی‌ها یا صفحات ضعف که بلوک‌های سنگی در توده سنگ را از هم جدا می‌سازند، تحت تاثیر قرار می‌گیرد. برخی از محققین ناپیوستگی را بعنوان یک صفحه ضعف ساختاری در توده سنگ تعریف کردند که حرکت در روی آن صورت می‌گیرد[۱].

یکی از مهم‌ترین خصوصیات یک درزه واحد، مقاومت برشی سطح آن است. تعیین مقدار قابل اعتماد و صحیح مقاومت برشی از مسائل بسیار مهم مهندسی سنگ است. در طراحی شیروانی‌های سنگی، مقاومت برشی یکی از قسمت‌های بحرانی و مهم فرایند طراحی است زیرا تغییرات بسیار کوچک در مقاومت برشی ممکن است به تغییرات عمده‌ای در ارتفاع ایمن یک شیروانی منجر شود که لطمات اقتصادی زیادی ممکن است به همراه داشته باشد.

مقاومت برشی یک ناپیوستگی در گذشته بسیار مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است و در مطالعات سال‌های اخیر در رابطه با معادن روباز، سدها و سازه‌های زیرزمینی نیز جهت بررسی مفهوم شکست و ریزش در طول ناپیوستگی استفاده شده است. بطور مثال در بررسی پی سازه‌های مهندسی برروی سنگ، نشست حاصل ممکن است تا حد زیادی تحت تاثیر تغییر مکان در طول ناپیوستگی‌ها باشد. بعلاوه در یک معدن روباز و یا حفاری زیرزمینی، رفتار برشی توده سنگ تحت تاثیر شدید حضور ناپیوستگی‌ها قرار دارد.

بطور کلی روش بررسی و تحقیق خواص ناپیوستگی‌ها در سنگ را می‌توان به دو گروه اصلی تقسیم کرد که عبارتند از آزمایش‌های آزمایشگاهی و آزمون‌های صحرایی. با وجود اینکه نتایج آزمایش‌های صحرایی به واقعیت نزدیکترند ولی بخاطر مشکل بودن نحوه آزمایش و قیمت بسیار بالا، این نوع آزمایش‌ها فقط در پروژه‌های بسیار گران قیمت و حساس مورد استفاده قرار می‌گیرند. بعلاوه در طول انجام آزمون‌های صحرایی فقط نتایج تجمعی تمام پارامترهای موثر اندازه‌گیری می‌شوند در حالیکه تاثیر هر پارامتر بخصوص قابل ارزیابی نیست. در نتیجه در بسیاری موارد، آزمایش‌های آزمایشگاهی اولین انتخاب بررسی خواص برشی سنگ‌ها هستند و در مواقعی که آزمون‌های صحرایی به کار گرفته می‌شوند، تعداد آنها بسیار محدود خواهد بود.

جهت بررسی مقاومت برشی و تغییرشکل پذیری ناپیوستگی‌ها در بین آزمون‌های آزمایشگاهی، آزمایش‌های فشاری سه محوری و برش مستقیم بیشتر از هر روش دیگری مورد استفاده واقع می‌شوند. در حالیکه بعضی روش‌های دیگر بصورت بسیار محدودی توسط برخی محققین استفاده گردیده‌اند.

آزمایش برش مستقیم آزمایشگاهی معمولا توسط دستگاه برش مستقیم قابل حمل انجام می‌پذیرد. آزمایش‌های برش کوچک مقیاس صحرایی نیز با همین دستگاه انجام می‌شود. در حقیقت این دستگاه یکی از دستگاه‌های مورد استفاده در آزمایش‌های شاخص در مکانیک سنگ می‌باشد. در حالیکه این دستگاه بخاطر قابل حمل بودنش مزیت دارد لیکن دارای معایبی نیز می‌باشد که مربوط به روش بارگذاری برشی و نیز بار نرمال غیرثابت در حین تغییر مکان برشی می‌شود. برای رفع این عیوب از دستگاه آزمایش برش مستقیم قابل حمل موجود، بایستی دستگاه برش مستقیمی‌ساخته می‌شد بطوریکه تنش نرمال وارده را در حین برش بتوان ثابت نگه داشت و نرخ کرنش برشی آهسته و ثابتی اعمال نمود بطوریکه منحنی تنش برشی – کرنش برشی را بتوان ثبت کرد.

جهت مقایسه دو دستگاه موجود و اصلاح شده آزمایش برش مستقیم، لازم بود که تاثیر نمونه‌گیری بر نتایج آزمایش‌ها حذف شود. از آنجا که نمونه‌های بدست آمده از سنگ‌های طبیعی کاملا شبیه یکدیگر نیستند و نیز جهت اجتناب از مشکلات بوجود آمده، در هنگام تهیه سطوح ناپیوستگی مشابه در سنگ، از یک ماده بتنی مصنوعی شبیه سنگ برای تهیه نمونه‌های با سطوح ناپیوستگی اره بر کاملا مشابه استفاده گردید. مشخصات مکانیکی این نمونه‌ها در بخش‌های بعدی ذکر گردیده است.

۲- هدف پروژه

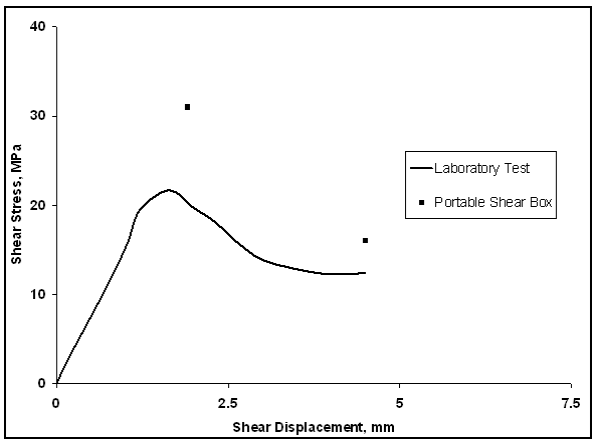
تعدادی پارامتر وجود دارد که مستقیما بر مقاومت برشی سطوح درزه تاثیر می‌گذارند. مهم‌ترین آنها، نرخ کرنش برشی، ناهمواری سطوح و مقاومت آنها، مقیاس، رطوبت و مواد پرکننده می‌باشند. از بین این پارامترها نقش تاثیر تغییر مکان منظم بجای حرکات دفعی نامنظم بر روی سطوح درزه که معمولا در دستگاه برش مستقیم قابل حمل موجود اتفاق می‌افتد، دراین پروژه مورد نظر قرار گرفته است. دراین مقایسه سعی شده نقش بقیه پارامترهای ذکر شده در فوق حذف گردند.

نظرات متناقض در خصوص تاثیر نرخ کرنش بر رفتار برشی سطوح سنگ، برخی دانشمندان را بر اجرای یک سری آزمایش‌های برش مستقیم با نرخ کرنش‌های متفاوت بر روی

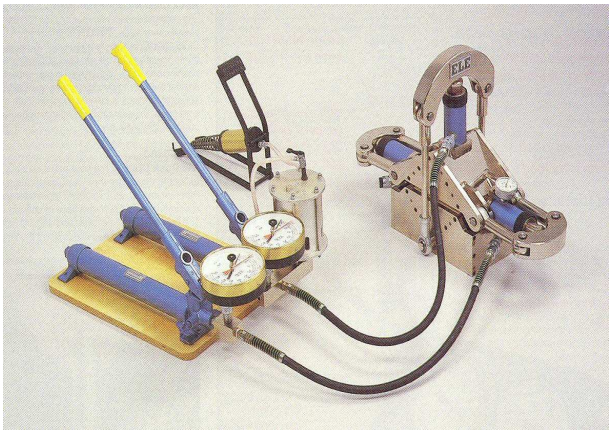
ماسه سنگ درشت دانه با سطوح اره بر رهنمون ساخت[۲]. آنها بیان داشتند که "منحنی حداکثر مقاومت برشی بدست آمده از آزمایش‌های با نرخ کرنش‌های متفاوت، یک منحنی خطی می‌باشد ($\tau = C + \sigma_n \tan\phi$). مقایسه نتایج آزمایش‌های انجام شده مشخص می‌کند که با اعمال کرنش‌های با نرخ‌های متفاوت، منحنی‌های مشابهی به دست می‌آید که تغییرات مختصر و غیرسیستماتیکی در آنها مشاهده می‌شود. با وجودیکه این آزمایش‌ها دلالت بر این دارد که نرخ کرنش تاثیر محسوسی بر خواص برشی ندارد لیکن ثابت نگه داشتن نرخ کرنش از اهمیت خاصی برخوردار است". این دانشمندان تصریح نکردند که اگر نرخ کرنش تاثیری بر مقاومت برشی ندارد پس مزیت ثابت نگهداشتن نرخ کرنش چه می‌تواند باشد. نگارنده نتایج مقاومت‌های برشی حداکثر و باقیمانده حاصل از آزمایش‌های برشی مستقیم با استفاده از دستگاه غیرقابل حمل آزمایشگاهی و دستگاه قابل حمل موجود برروی نمونه‌های کاملا مشابه با سطوح ناهموار درزه را با هم مقایسه کرد و نتیجه گرفت که برای اینکه منحنی تنش برشی – کرنش برشی بطور کامل بدست آید [۳]، نرخ بارگذاری برشی منظمی بایستی انتخاب شود (شکل ۱). پیشنهاد اصلاح و بهبود دستگاه برش مستقیم موجود دقیقا بر اساس این حقیقت داده شد که نرخ برشی منظم، تاثیراتی بر مقاومت برشی درزه‌ها دارد. این تاثیرات با افزایش ناهمواری سطوح درزه‌ها افزایش می‌یابد. این پروژه بر این حقیقت که روش اعمال تنش برشی تاثیراتی بر مقاومت برشی نهایی سطوح درزه دارد تاکید می‌کند و سعی می‌نماید که نرخ برش توسط اصلاح دستگاه برش مستقیم قابل حمل موجود کنترل شود در حالیکه قابل حمل بودن دستگاه موجود که از مزیت‌های آنست نیز حفظ گردد.

۳- دستگاه‌های آزمایش برش مستقیم موجود و اصلاح شده

عمومی‌ترین دستگاه مورد استفاده جهت انجام آزمایش برشی سنگ‌ها، دستگاه برش مستقیم قابل حمل آزمایشگاهی می‌باشد که در امپریال کالج لندن ساخته و توصیف شده است [۱] و [۴] بعلاوه این دستگاه وسیله‌ای است که در بسیاری از کشورها به سهولت قابل دسترسی است (شکل ۲).



شکل ۱: مقایسه مقاومت‌های برشی حداکثر و باقیمانده نمونه‌های با سطوح ناهموار با استفاده از دستگاه‌های برش مستقیم آزمایشگاهی و قابل حمل موجود



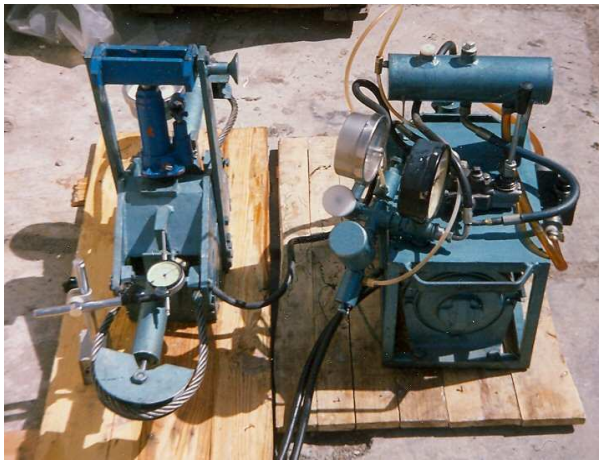
شکل ۲: دستگاه آزمایش برش مستقیم قابل حمل موجود

این دستگاه چنانچه توسط اپراتوری بسیار مجرب مورد استفاده قرار گیرد، نتایج قابل قبولی بدست می‌دهد لیکن دارای معایبی است. مشکل عمده مربوط به روش اعمال بار نرمال می‌باشد که توسط یک جک هیدرولیک بر روی نیمه بالایی جعبه برش اعمال می‌شود که این عمل توسط یک سیم بکسل یا بازوی فلزی که به نیمه پایین جعبه برش متصل گردیده است، انجام می‌گیرد. بخاطر این نوع اعمال بار، هرگونه تمایل به اتساع بر روی سطوح ناهموار، منجر به یک افزایش بار نرمال می‌شود و لازم است در طول آزمایش این افزایش بار توسط جک مربوطه تعدیل گردد. با افزایش تغییر مکان برشی، بار نرمال اعمال شده از حالت عمودی خارج شده و تصحیحاتی برای این منظور باید اعمال گردد.

در مواردی که آزمایش بسیار حساس بوده (مانند آزمایش‌هایی که دراین پروژه انجام گردید) و منحنی کامل تنش برشی – تغییر مکان برشی مورد نیاز است، یکی دیگر از معایب دستگاه قابل حمل موجود آشکار می‌گردد: از آنجا که بار برشی توسط یک پمپ دستی اعمال می‌شود، نرخ بارگذاری قابل کنترل نبوده و یا کنترل آن بسیار دشوار و بعضا نشدنی می‌باشد و لذا فقط مقادیر مقاومت برشی حداکثر و باقیمانده و یا یکی دو نقطه بین آنها قابل تعیین می‌باشند. شکل ۱ مقایسه‌ای از نتایج بدست آمده از آزمایش برشی مستقیم بر روی دو نمونه با سطوح درزه ناهموار کاملا مشابه را نشان می‌دهد که با دو دستگاه برش مستقیم اصلاح شده غیر قابل حمل و دستگاه قابل حمل موجود انجام گردیده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود در نتایج حاصل از آزمایش با دستگاه برش مستقیم قابل حمل فقط نقاط مقاومت برشی حداکثر و باقیمانده قابل تشخیص هستند و با دقت‌های زیاد نیز امکان تعیین نقطه دیگری بین آنها میسر نگردید. بعلاوه مقادیر مقاومت‌های حداکثر و باقیمانده ظاهرا بیشتر از مقادیر مشابه حاصل از آزمایش برش مستقیم با دستگاه ثابت آزمایشگاهی می‌باشند.

۳-۱- طراحی دستگاه آزمایش برش مستقیم جدید

دستگاه جدید و یا اصلاح شده آزمایش برش مستقیم در شکل ۳ نمایش داده شده است. جعبه دستگاه دارای ابعاد و شکل مشابه با دستگاه برش مستقیم موجود می‌باشد و قادر است نمونه‌های استوانه‌ای سنگ با قطر حداکثر ۷۵ میلی‌متر حاوی یک صفحه ضعف با هر زاویه‌ای که در مغزه‌های طبیعی بدست آمده از حفاری‌های ژئوتکنیکی وجود دارد را در خود جای دهد.



شکل ۳: دستگاه آزمایش برش مستقیم قابل حمل اصلاح شده

این دستگاه با توجه وجود ضعف‌هایی که در دستگاه برش مستقیم موجود دیده شده است، طراحی و ساخته شد. اولا چون تنش برشی با پمپ‌های دستی اعمال می‌شود، ثابت و یا حداقل منظم نگهداشتن تغییر مکان برشی کاری بسیار دشوار می‌باشد. لذا سیستمی‌طراحی و ساخته شد که قادر است نرخ کرنش برشی را ثابت و بسیار کند نگه دارد. برای اعمال فشار از روغن هیدرولیکی استفاده گردید. این روغن از طریق یکسری لوله و فیلتر روغن به جک‌های افقی دستگاه که تنش برشی را در هر دو جهت اعمال می‌نمایند، وارد می‌شود. پمپ که با یک اهرم کنترل می‌شود توسط یک موتور الکتریکی که با یک باتری ۱۲ ولت تغذیه می‌شود، فعال می‌گردد. بنابراین ضمن اینکه بارگذاری برشی بطور منظم انجام می‌شود، خاصیت قابل حمل بودن دستگاه نیز حفظ می‌گردد. تعدادی گیج‌های عقربه‌ای فشار روغن را در قسمت‌های مختلف دستگاه نشان می‌دهند.

ثانیا همانطور که قبلا توضیح داده شد و در شکل ۲ نیز مشاهده می‌شود، درحین فرایند برش، جک اعمال کننده تنش نرمال از وضعیت عمودی منحرف شده و بار نرمال با یک زاویه به سطح برش منتقل می‌شود که با ادامه آزمایش این وضعیت وخیم‌تر می‌گردد. برای حذف این عیب، غلتکی استوانه‌ای در زیر جک نرمال قرار داده شد (شکل ۳) تا این جک را در تمام مدت آزمایش در وضعیت عمودی نگهدارد.

۴- انجام آزمایش

قبل از پرداختن به روش انجام آزمایش باید متذکر شد که برای مقایسه نتایج آزمایش‌های انجام شده با دو دستگاه موجود و اصلاح شده باید تمام پارامترهایی که این مقایسه را دچار خدشه می‌نمایند، حذف گردند. این پارامترها می‌توانند مقاومت سنگ و نیز مشخصات سطح درزه باشند که این مهم توسط ساخت نمونه‌های مصنوعی با مشخصات و سطح درزه کاملا مشابه عملی گردید. نمونه‌های سیمانی با مشخصاتی شبیه سنگ برای این منظور تهیه شد. تعداد نمونه سیمانی استوانه‌ای تحت آزمایش مقاومت فشاری تک محوری قرار گرفت. این نمونه‌ها که همگی به مدت ۷ روز جهت عمل آوری در آب قرار گرفته و طبق روش پیشنهادی ISRM آماده شده بودند، دارای مقاومت فشاری تک محوری ۲۱/۵۲ تا ۲۱/۴۸ و میانگین ۲۱/۵ مگاپاسگال می‌باشند. پارامتر دوم که مشخصات سطح درزه

می‌باشد نیز با برش اره بسیار تیز از قسمت میانه همه نمونه‌ها تامین گردید.

این نمونه‌های برش خورده با وضعیتی کاملا مشابه قالب‌گیری و در دو دستگاه قرار داده شدند. یکسان بودن تمام مراحل قالب‌گیری اعم از جنس مواد قالب‌گیری و زمان عمل‌آوری بتن در هر دو آزمایش رعایت شدند. همچنین ملزومات عمومی انجام آزمایش برش مستقیم که توسط روش‌های پیشنهادی ISRM ارائه گردیده‌اند[۵]، دراین آزمایش دقیقا رعایت گردید. نمونه‌ها با بتن قالب‌گیری شدند تا اطمینان حاصل شود که تمام تغییر مکان برشی ثبت شده مربوط به حرکت بر روی سطح درزه است و هیچگونه تغییر شکلی مربوط به مواد قالب‌گیری نمی‌باشد. پس از قرار گرفتن نمونه‌های قالب‌گیری شده در دستگاه‌ها، بار نرمال مورد نظر بوسیله پمپ دستی اعمال گردید و ثابت نگه داشته شد. سپس تنش برشی توسط پمپ دستی و پمپ هیدولیکی الکتریکی در دستگاه‌های موجود و اصلاح شده اعمال شد. در طول آزمایش تغییر مکانهای برشی نیز توسط گیج‌های عقربه‌ای قرائت و ثبت گردید.

بدیهی است قرائت این تغییر مکان‌ها در دستگاه اصلاح شده به سهولت امکان‌پذیر بود در حالیکه در دستگاه موجود پرش‌هایی در عقربه گیج مشاهده می‌شد که قرائت را دشوارتر می‌ساخت.

۵- ارائه نتایج

از آنجا که تنش برشی در دستگاه موجود توسط پمپ دستی اعمال می‌شد، رسم منحنی تنش برشی – تغییر مکان برشی بسیار مشکل و محدود به چند نقطه می‌گردید که نقطه حداکثر و باقیمانده از جمله آنهاست. هر چند به دلیل پرش در قرائت گیج‌های عقربه‌ای تشخیص نقطه دقیق تغییر مکان متناظر نقطه تنش برشی حداکثر مشکل می‌باشد. مقایسه این منحنی مربوط به دو دستگاه مورد نظر را می‌توان در شکل ۱ ملاحظه نمود. از آنجا که نوع سطح درزه‌ها اره بر می‌باشند، فاصله بین دو نقطه حداکثر و دو نقطه باقیمانده مربوط به نتایج بدست آمده از دو دستگاه در این شکل فاصله زیادی ندارند. پیش‌بینی می‌شود چنانچه سطح ناهموار مورد آزمایش قرار گیرد این فاصله بیشتر باشد.

نتایج بدست آمده از آزمایش با دو دستگاه به همراه تنش‌های نرمال اعمال شده در جدول ۱ آورده شده اند. شکل ۱ نیز منحنی‌های مربوط به این نتایج را جهت مقایسه در یک دیاگرام نشان می‌دهد. همانطورکه ملاحظه می‌شود، منحنی مربوط به نتایج دستگاه اصلاح شده در زیر منحنی مربوط به دستگاه موجود قرار می‌گیرد و بیان کننده این نکته است که نتایج دستگاه موجود دارای بیش تخمین می‌باشد. همانطور که ذکر شد هرچند این تفاوت نتایج شاید با توجه به نوع سطح که اره بر است زیاد نباشد، ولی نشان دهنده یک تفاوت آشکار در نتایج بدست آمده است که احتمال بیشتر شدن در سطوح ناهموار را دارد. زاویه اصطکاک ϕ برای دستگاه‌های موجود و اصلاح شده به ترتیب ۴۳ و ۳۸/۴ درجه می‌باشد در حالیکه چسبندگی C همانطور که پیش‌بینی می‌شد برای هر دو دستگاه معادل صفر است. لذا دستگاه مذکور برای سطوح صاف و هموار در این سری آزمایش‌ها، باعث کاهش ۱۰/۷ درصدی زاویه اصطکاک شده است که پیش‌بینی می‌شود در سطوح ناهموار این تفاوت افزایش بیشتری داشته باشد.

۶- نتیجه گیری

بعنوان نتیجه گیری، نتایج زیر را می‌توان از پروژه انجام شده ارائه نمود:

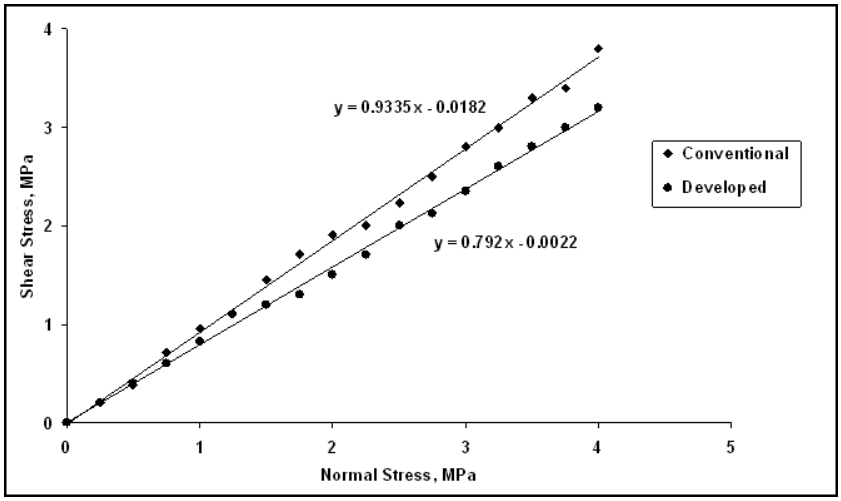
- یک دستگاه برش مستقیم جدید طراحی و ساخته شد تا عیوب دستگاه قابل حمل موجود را رفع نماید. این دستگاه سیستمی است که قادر است بار برشی را بطور منظم بر نمونه‌های بدست آمده از حفاری‌های ژئوتکنیکی تا قطر ۷۵ میلی‌متر اعمال نماید و مقاومت برشی را در آزمایشگاه و محل پروژه بدست آورد.
- یک بتن تندگیر با مشخصات شبیه سنگ که با آن نمونه‌های مورد نظر برای انجام آزمایش آماده گردید، استفاده شد. نمونه‌های مصنوعی قالب‌گیری شد بطوریکه تمام مشخصات نمونه‌های آماده شده برای انجام آزمایش در دو دستگاه موجود و اصلاح شده کاملا شبیه یکدیگر باشند و محدودیتی نیز در تعداد نمونه‌های مورد نیاز نباشد.
- مقایسه بین نتایج بدست آمده از این دو دستگاه جهت تعیین مقاومت برشی، با موفقیت انجام شد. همانطور که قبلا نشان داده شد، مقاومت‌های برشی بدست آمده از دستگاه برش مستقیم اصلاح شده دارای مقادیر کمتری در مقایسه با نتایج بدست آمده از دستگاه موجود می‌باشد. همانطور که قبلا ذکر شد در سطوح صاف کاهشی در حدود ۱۰/۷٪ برای زاویه اصطکاک به دست آمد که احتمالا برای سطوح ناهموار این مقدار بیشتر خواهد بود. این مطلب می‌تواند مربوط به روش اعمال بار برشی بر روی نمونه و

نیز انحراف بار نرمال از وضعیت عمودی در حین برش باشد.

- سطوح اره بر برای مراحل اولیه این مقایسه انتخاب گردید. این مقایسه را می‌توان برای سطوح ناهموار و نیز سطوحی که دارای مواد پرکننده و رطوبت هستند انجام داد که در آینده نتایج انجام این نوع آزمایش نیز گزارش خواهد گردید.

جدول ۱ نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم با دو دستگاه موجود و اصلاح شده

تنش نرمال، مگاپاسگال	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۱	۱/۲۵	۱/۵	۱/۷۵	۲
تنش برشی، مگا پاسگال (دستگاه موجود)	۰/۲	۰/۳۸	۰/۷۱	۰/۹۵	۱/۱	۱/۴۵	۱/۷۱	۱/۹
تنش برشی، مگا پاسگال (دستگاه اصلاح شده)	۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۸۲	۱/۱	۱/۲	۱/۳	۱/۵
تنش نرمال مگاپاسگال	۲/۲۵	۲/۵	۲/۷۵	۳	۳/۲۵	۳/۵	۳/۷۵	۴
تنش برشی، مگا پاسگال (دستگاه موجود)	۲	۲/۲۳	۲/۵	۲/۸	۳/۳	۳/۳	۳/۴	۳/۸
تنش برشی، مگا پاسگال (دستگاه اصلاح شده)	۱/۷	۲	۲/۱۲	۲/۳۵	۲/۶	۲/۸	۳	۳/۲



شکل ۴: مقایسه پارامترهای مقاومت برشی در آزمایش با دستگاه‌های موجود و اصلاح شده

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از زحمات پرسنل آزمایشگاه مکانیک سنگ شرکت خاک و سنگ که در تمام مراحل انجام آزمایش‌ها همکاری بیدریغی داشتند تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

[1] Hoek, E. and Bray, J.W. (1981). "*Rock Slope Engineering*", Revised 3rd. Edition, Inst. Min. Metallurgy, London.

[2] Hassani, F.P. and Scoble, M.J. (1985). "*Frictional Mechanism and Properties of Rock Discontinuities*", *Proc. Int. Symp. Fund. Rock Joints*, pp:185-196.

[3] Gharouni-Nik, M. (1993). "*Laboratory Investigations on the Engineering Behaviour of Rock Joints Using Triaxial and Direct Shear Techniques*" *PhD Thesis, Newcastle University, England.*

[4] Ross-Brown, D.M. and Walton, G. (1975). "A Portable Shear Box for Testing Rock Joints", *Rock Mechanics*, **7**: 129–153.

[5] ISRM , (1981) Rock Characterization Testing and Monitoring, ed. : Brown, E. T.