

(گزارش فنی)

توسعه یک دستگاه خودتنظیم برای انجام دقیق آزمایش برش مستقیم درزه‌های سنگی تحت شرایط مرزی مختلف

نیما بابانوری^{۱*}، سعید کریمی نسب^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان

۲- دانشیار، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(دریافت: اردیبهشت ۱۳۹۵، پذیرش: آذر ۱۳۹۵)

چکیده

اندازه‌گیری صحیح و دقیق مقاومت برشی درزه‌های سنگی در پروژه‌های مختلف مرتبط با مهندسی سنگ، نظیر سدها، انواع تونل‌ها، معادن روباز و زیرزمینی و چاه‌های نفت و گاز نقشی اساسی دارد. رفتار برشی درزه‌های سنگی در آزمایشگاه با استفاده از تجهیزات برش مستقیم بررسی می‌شود. دستگاه‌های برش مستقیم درزه‌های سنگی که به طور دستی کنترل می‌شوند، از دقت بالایی برخوردار نیستند. در این گزارش، یک دستگاه خودکار و خودتنظیم برش مستقیم برای درزه‌های سنگی معرفی شده است که امکان انجام آزمون برش درزه‌های سنگی تحت شرایط مرزی مختلف (اعم از شرایط بار عمودی ثابت و سختی عمودی ثابت) با دقت بالا را فراهم می‌سازد. دستگاه ساخته شده قادر است آزمون برش درزه‌های سنگی را هم به صورت یکنواخت و هم رفت‌وبرگشتی با سرعت‌های مختلف انجام دهد. دستگاه همچنین امکان اصلاح مساحت درگیر شکستگی ضمن برش و متعاقباً اصلاح بار عمودی را دارد. علاوه بر امکان خاتمه دستی آزمایش، می‌توان شرط‌هایی بر اساس زمان آزمایش، جابجایی برشی، افت مقاومت برشی، و یا ترکیب آنها برای خاتمه خودکار آزمایش در نظر گرفت. داده‌های برداشت شده توسط حسگرهای جابجایی و نیرو دائماً به یک کامپیوتر معمولی متصل به دستگاه ارسال و ثبت می‌شوند و می‌توان نمودارهای مختلف مربوط به آزمایش را به صورت لحظه‌ای پایش کرد. همچنین، برای حذف لقی نمونه‌ها در داخل جعبه برش، تمهیداتی در نظر گرفته شده است. در خاتمه، نتایج چندین آزمایش برش مستقیم انجام شده توسط دستگاه بر روی درزه‌هایی با خصوصیات مورفولوژی معلوم و در راستاهای مختلف ارائه شده است.

کلمات کلیدی

رفتار برشی درزه‌های سنگی، آزمون برش مستقیم، تجهیزات خودتنظیم، بار عمودی ثابت، سختی عمودی ثابت

*عهده دار مکاتبات: babanouri@hut.ac.ir

۱- مقدمه

اندازه‌گیری صحیح و دقیق مقاومت برشی درزه‌های سنگی در پروژه‌های مختلف مرتبط با مهندسی سنگ، نظیر سدها، انواع تونل‌ها، معادن روباز و زیرزمینی و چاه‌های نفت و گاز نقشی اساسی دارد. خطای کوچکی در اندازه‌گیری خصوصیات مقاومتی صفحات ناپیوستگی‌های سنگی می‌تواند منجر به خطای قابل ملاحظه‌ای در ضریب ایمنی سازه سنگی شود.

رفتار برشی درزه‌های سنگی در آزمایشگاه با استفاده از آزمایش برش مستقیم بررسی می‌شود. مشابه آنچه در مکانیک خاک وجود دارد، اصول اولیه انجام آزمایش متداول برش مستقیم درزه‌های سنگی شامل اعمال تنش عمودی به نمونه و پایش تنش برشی در جابجایی‌های مختلف است [۱، ۲]. اولین نمونه دستگاه برش مستقیم مختص درزه‌های سنگی در کالج سلطنتی لندن ساخته شد [۳، ۴]. این دستگاه برش مستقیم، که ساده و قابل حمل با کنترل دستی بود امکان انجام آزمایش در آزمایشگاه و در صحرا را فراهم می‌کرد. مقدار نیرو در این دستگاه با استفاده از سنجه‌هایی عقربه‌ای قرائت می‌شد. این دستگاه مبنایی برای توسعه مدل‌های مختلفی از دستگاه برش مستقیم درزه‌های سنگی شد که به نوعی آن را تکمیل یا به حسگرهایی الکترونیکی تجهیز می‌کردند [۵]. همه این دستگاه‌ها برای انجام آزمایش برش مستقیم تحت شرایط بار عمودی ثابت^۲ (CNL) طراحی شده بودند که در حین آزمایش بار برشی افزایش می‌یابد در حالی که بار عمودی ثابت نگه داشته می‌شود. برای ناپیوستگی‌های سنگی که سطح ناهموار یا زبر دارند، هم‌زمان با برش، دندانه‌ها روی یکدیگر حرکت می‌کنند و این امر موجب اتساع درزه سنگی می‌شود [۶-۸]. اگر توده‌سنگ در برگیرنده به اندازه کافی در برابر اتساع آزادانه تغییرشکل نشان ندهد، آنگاه به ناچار مقدار تنش نرمال در حین برش افزایش خواهد یافت. این شرایط مرزی را که در آن مقدار تنش عمودی با افزایش اتساع به طور خطی افزایش می‌یابد، سختی عمودی ثابت^۳ (CNS) می‌گویند. این شرایط در پی‌های سنگی، در مجاورت فضا‌های زیرزمینی و توده‌سنگ تقویت شده با پیچ‌سنگ اتفاق می‌افتد و شرایط CNL عمدتاً برای حفاری‌های سطحی و شیب‌های سنگی حکم فرما است.

هم‌زمان با مطرح شدن شرایط مرزی CNS برای برش درزه‌های سنگی، نمونه‌هایی از دستگاه‌های برش مستقیم ساخته شدند که امکان انجام آزمایش تحت این شرایط را به طور مکانیکی و با قرار دادن فنرهایی در راستای اتساع نمونه برای مدل کردن سختی خارجی فراهم می‌کردند [۹، ۱۰]. به علت زبری سطح شکستگی‌های سنگی و در نتیجه تمایل آنها به اتساع در حین برش، کنترل بار عمودی و حرکت برشی نمونه چه پیش از رسیدن به نقطه اوج و چه پس از آن به صورت دستی بسیار دشوار و همراه با خطا است. این چالش هم در پیاده‌سازی شرایط CNL و هم در شرایط CNS وجود دارد. از این رو، تلاش‌هایی صورت گرفته است تا کنترل بازوهای عمودی و برشی دستگاه برش مستقیم درزه‌های سنگی به طور خودتنظیم^۴ انجام شود [۱۱].

دستگاه‌های برش مستقیم درزه‌های سنگی که به طور دستی کنترل می‌شوند از دقت کافی برخوردار نیستند و با محدودیت‌های بسیاری در انجام آزمایش همراه هستند. در ایران، نمونه دستگاه‌های با قابلیت خودتنظیمی و خودکار بودن تا به حال ساخته نشده بود. معدود نمونه‌های خودتنظیم موجود در مراکز دانشگاهی و صنعتی، یا وارداتی هستند و یا با اعمال تغییراتی روی نمونه‌های خارجی دستگاه‌های خودتنظیم دیگر نظیر دستگاه آزمایش تک‌محوره ساخته شده‌اند. هدف اصلی از توسعه این دستگاه، بومی‌سازی دستگاه برش مستقیم خودتنظیم و خودکار با استفاده از ظرفیت‌های موجود در داخل کشور است. همچنین، دستگاه ساخته شده در مقایسه با نمونه‌های خارجی گامی در جهت ارتقا آنها نیز به شمار می‌رود. در خاتمه، نتایج چندین آزمایش برش مستقیم انجام شده توسط این دستگاه بر روی درزه‌هایی با ویژگی‌های مورفولوژی معلوم و در راستاهای مختلف ارائه شده است.

۲- طراحی و ساخت دستگاه برش مستقیم خودتنظیم

دستگاه برش مستقیم خودتنظیم برای درزه‌های سنگی با استفاده از ظرفیت‌های موجود در داخل کشور بومی‌سازی شد. شکل ۱ تصویری از دستگاه ساخته شده همراه با معرفی قسمت‌های مختلف آن را نشان می‌دهد. برای

دروه‌های طبیعی و مدل‌های پلاستری بررسی شد.

ارزیابی عملکرد دستگاه در هر مرحله از ساخت، امکانات و جنبه‌های مختلف آن با آزمایش‌های متعدد بر روی



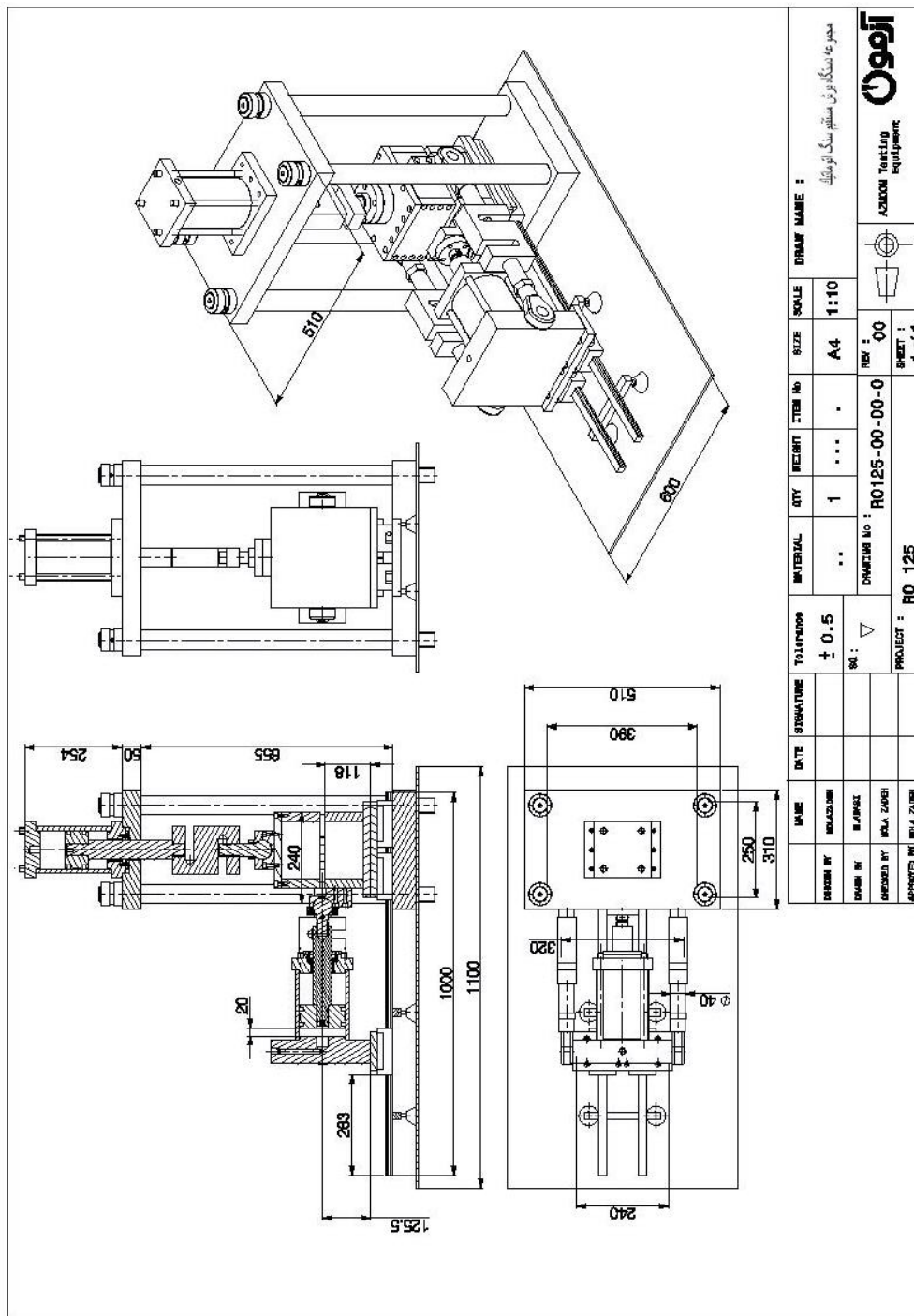
شکل ۱: تصویر دستگاه برش مستقیم خودتنظیم ساخته شده به همراه معرفی قسمت‌های مختلف آن

می‌شوند. برای حفظ سلامت سیستم بارگذاری هیدرولیک، تمهیداتی صورت گرفته است که در طول آزمایش چنانچه بار اعمالی به هر یک از بازوها از ۹۰ درصد ظرفیت بارگذاری مربوطه تجاوز کند، آزمایش متوقف شده و خطای اضافه‌بار^۷ نمایش داده می‌شود. این درصد در قسمت تنظیمات داخلی دستگاه قابل تغییر است. جابجایی‌های عمودی و برشی به ترتیب با دو و یک LVDT^۸ با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری می‌شوند.

برای کنترل دستگاه از شیرهای خودتنظیم^۹ به همراه PLC^{۱۰} در یک سیستم حلقه‌بسته^{۱۱} استفاده می‌شود. شیرها در هر ۵۰۰ میلی‌ثانیه از PLCها فرمان می‌گیرند و با توجه به بازخورد^{۱۲}ی که پردازنده دستگاه از حسگرهای جابجایی‌ها و نیروها می‌گیرد و با توجه به شرایط مرزی و تنظیمات آزمایش، خود را اصلاح می‌کند.

جعبه دستگاه، مکعب شکل و ابعاد داخلی هر کدام از جعبه‌های بالایی و پایینی ۱۵۰×۱۵۰×۱۰۰ میلی‌متر (طول×عرض×ارتفاع) است. جعبه پایین فقط در راستای برش حرکت می‌کند و جعبه بالایی به طور قائم حرکت می‌کند و جابجایی آن در راستای افقی محدود شده است. قاب عکس‌العمل^۵ دستگاه از فولاد سخت ساخته شده است. بیش‌ترین جابجایی برشی مجاز ۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. شکل ۲ نقشه قسمت‌های مکانیکی دستگاه را نشان می‌دهد.

سیستم بارگذاری دستگاه از نوع هیدرولیکی است. ظرفیت بارگذاری بازوی عمودی ۱۰۰ کیلو نیوتن، و ظرفیت بارگذاری بازوی برشی ۱۵۰ کیلو نیوتن است. بارهای نرمال و برشی توسط سلول‌های بار^۶ با دقت ۵۰ نیوتن اندازه‌گیری می‌شوند. بنابراین، برای نمونه مربعی با طول ۱۰۰ میلی‌متر، مقادیر بیشینه تنش عمودی و برشی که دستگاه می‌تواند اعمال کند به ترتیب ۱۰ و ۱۵ مگاپاسکال محاسبه

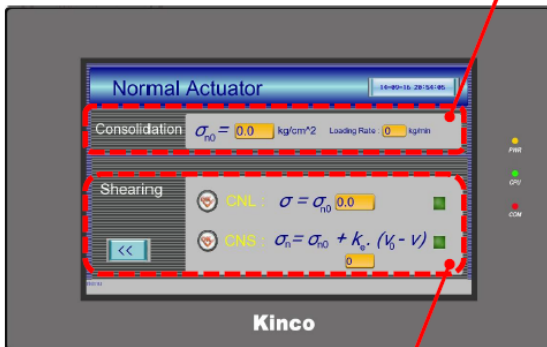


شکل ۲: نقشه قسمت های مکانیکی دستگاه خودتنظیم آزمایش برش مستقیم درزه های سنگی

اساس زمان آزمایش، جابجایی برشی، افت مقاومت برشی، و یا ترکیب آنها برای خاتمه آزمایش در نظر گرفت. داده های برداشت شده توسط حسگرهای جابجایی و نیرو و همچنین زمان، دائماً به یک کامپیوتر معمولی متصل به دستگاه، ارسال و ثبت می شوند و می توان نمودارهای

این دستگاه امکان انجام آزمون برش درزه های سنگی تحت شرایط مرزی CNL و CNS، به صورت یکنواخت^{۱۳} و رفت و برگشتی^{۱۴} با سرعت های مختلف را فراهم می سازد. دستگاه همچنین امکان اصلاح مساحت درگیر سطح شکستگی ضمن برش و متعاقباً اصلاح بار عمودی را دارد. علاوه بر امکان خاتمه دستی آزمایش، می توان شرطهایی بر

عملکرد بارزوی عمودی در فاز تحکیم در این قسمت تنظیم می‌شود. پارامترها، تنش نرمال تحکیم و نرخ بارگذاری تحکیمی هستند.



عملکرد بارزوی عمودی در فاز برش در این قسمت تنظیم می‌شود. اگر شرایط مرزی CNS انتخاب شود، می‌بایست مقدار پارامتر سختی خارجی مشخص شود.

شکل ۴: صفحه مربوط به تنظیمات بارزوی عمودی

اگر حرکت برشی به صورت یکنواخت مد نظر باشد، این گزینه می‌بایست فعال شود و مقدار سرعت برشی در کادر روبرو مشخص شود.



دامنه حرکت رفت و برگشتی در این قسمت وارد می‌شود. اگر حرکت برشی به صورت رفت و برگشتی مد نظر باشد، این گزینه می‌بایست فعال شود و پارامترهای مربوطه وارد شوند.

در این قسمت، سرعت حرکت رفت و برگشتی در سه سطح قابل تنظیم است.

شکل ۵: صفحه مربوط به تنظیمات بارزوی برشی

در این پژوهش برای رفع این مشکل، در طراحی جعبه برش دستگاه و همچنین در فرآیند قالب‌گیری نمونه‌ها جهت استقرار بدون دست‌خوردگی در جعبه برش تمهیداتی اتخاذ شد. ابعاد قالب در راستای برش کمی کوچک‌تر از ابعاد جعبه برش در نظر گرفته شد. از طرف دیگر در داخل هر یک از جعبه‌های برش بالایی و پایینی دستگاه، یک صفحه متحرک، عمود بر راستای برش تعبیه شد که با

مختلف مربوط به آزمایش را به صورت لحظه‌ای^{۱۵} در یک صفحه گسترده^{۱۶} Excel مشاهده و ذخیره نمود.

برای رابط کاربری دستگاه از یک صفحه HMI^{۱۷} لمسی ۷ اینچی استفاده شده است. از طریق رابط کاربری، تنظیمات داخلی دستگاه و صفحات مربوط به کالیبراسیون سلول‌های بار و LVDTها، و همچنین منوهای تنظیمات آزمایش برش به صورت دیجیتالی انجام می‌گیرد. صفحاتی از رابط کاربری دستگاه که مربوط به تنظیمات کلی آزمایش، تنظیمات بارزوی عمودی، و تنظیمات بارزوی برشی هستند به ترتیب در شکل‌های ۳ تا ۵ نشان داده شده‌اند.

معیارهای خاتمه آزمایش در این قسمت مشخص می‌شوند. امکان فعال کردن همزمان چند شرط وجود دارد.

مساحت مقطع نمونه در این قسمت نمایش داده می‌شود.



با فعال کردن این گزینه، اصلاح مساحت جین برش صورت می‌گیرد.

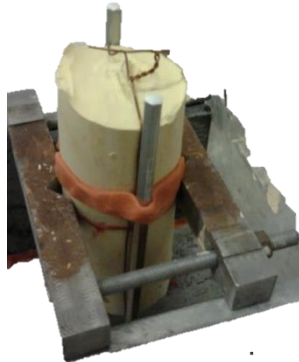
شکل و ابعاد سطح مقطع درگیر نمونه در این قسمت مشخص می‌شود.

شکل ۳: صفحه HMI مربوط به تنظیمات کلی آزمایش

۳- استقرار نمونه‌ها در جعبه برش

از مشکلاتی که در انجام آزمایش‌های برش مستقیم وجود دارد، امکان دست‌خوردگی نمونه‌های بالا و پایین نسبت به حالت کاملاً جفت شده و لقی نمونه‌ها در داخل جعبه برش است. این خطا که در نتیجه چندتکه‌ای بودن قالب دستگاه، خطای عملیات قالب‌گیری، تغییر شکل قالب به مرور زمان، انبساط یا انقباض ملات مورد استفاده و بسیاری عوامل دیگر غیر قابل اجتناب است می‌تواند تأثیر عمده‌ای در نتایج آزمایش برش مستقیم داشته باشد.

میلی‌متر قالب‌گیری و ساخته شدند. در ساخت درزه‌های مدل از نسبت پلاستر به آب ۳ به یک ($P/W=3$) استفاده شد. مقاومت فشاری تک‌محوره و مقاومت کششی برای درزه‌های پلاستری به ترتیب برابر $41/6 \pm 1/2$ MPa و $3/2 \pm 0/4$ MPa به دست آمد [۱۳]. مقاومت مواد مصنوعی که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است با مقاومت دیواره درزه‌ها در سنگ‌های با مقاومت متوسط قابل مقایسه اند.



الف



ب



ج

شکل ۷: قالب‌گیری یک تکه نمونه‌های بالایی و پایینی جهت قرار دادن در جعبه برش: الف) چسباندن دو میله چوبی به دو طرف نمونه‌ها در حالت جفت‌شده، ب) قالب‌گیری میله‌های چوبی همراه با نمونه‌ها، ج) نمونه‌های جفت‌شده یک تکه

پیچ‌هایی امکان تنظیم کردن موقعیت آنها وجود داشت (شکل ۶).



شکل ۶: طراحی جعبه برش همراه با یک صفحه متحرک عمود بر راستای برش و پیچ‌های ثابت‌کننده

در حین قالب‌گیری نمونه‌های بالا و پایین، دو میله چوبی در دو طرف نمونه‌ها همراه با آنها قالب‌گیری شد (شکل ۷، الف و ب). بدین ترتیب، قسمت‌های بالا و پایین نسبت به یکدیگر ثابت می‌شدند (شکل ۷، ج). دستگاه نیز به گونه‌ای طراحی شده است که بتوان نمونه‌های بالا و پایین را به صورت یک تکه در جعبه برش قرار داد (شکل ۸). پس از قرار گرفتن نمونه‌ها در حالت دست‌نخورده در داخل دستگاه، با محکم کردن پیچ‌های صفحات متحرک جانبی، لقی نمونه‌ها در داخل جعبه کاملاً گرفته می‌شود. می‌توان قبل از شروع آزمایش میله‌های چوبی را شکست و یا با توجه به مقاومت ناچیز آنها اجازه داد که در فرآیند برش خود به خود بشکنند.

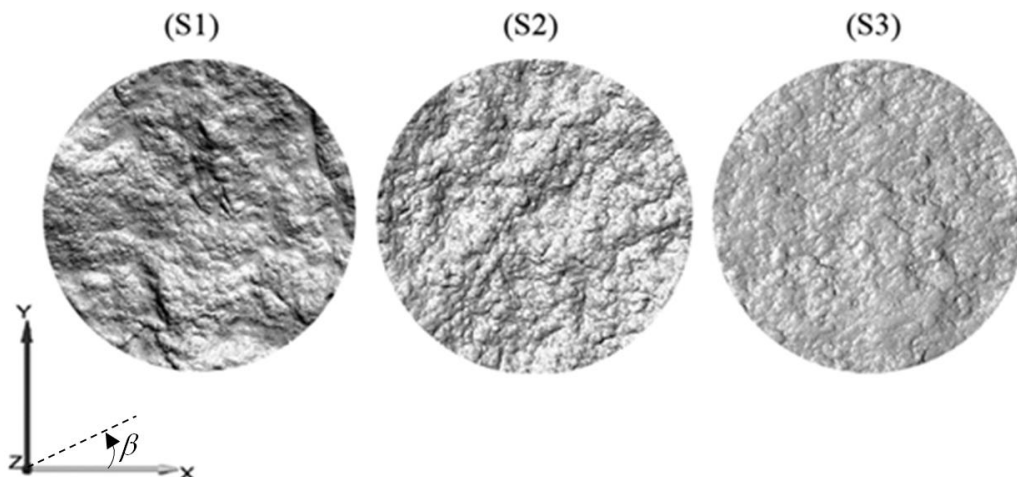
۴- آزمایش‌ها

به منظور بررسی رفتار برشی درزه‌های سنگی در راستاهای مختلف با استفاده از دستگاه توسعه‌داده‌شده، چندین آزمایش برش بر روی درزه‌هایی با مورفولوژی سطح مشخص انجام گرفت. ابتدا درزه‌های اصلی^{۱۸} با درجات زبری زیاد، متوسط، و کم و در سنگ‌هایی با جنس‌های به ترتیب، مگنتیت، گنایس، و کوارتزشیست از معدن گل‌گهر سیرجان انتخاب شده بودند. این نمونه‌ها در خلال پژوهش‌های دیگری در زمینه رفتار برشی شکستگی‌های سنگی [۱۲، ۱۳] به دست آمده بودند. این هندسه‌ها از این پس با نام‌های S1، S2 و S3 شناخته می‌شوند. شکل ۹ سطوح حاصل از برداشت سه‌بعدی را نشان می‌دهد.

سپس قالب‌های سیلیکونی از این سطوح تهیه شد و نمونه‌های پلاستری استوانه‌ای از درزه‌های مادر با قطر ۶۰



شکل ۸: موقعیت بازوهای دستگاه در هنگام قرار دادن نمونه‌های بالا و پایین به صورت یک تکه در جعبه برش



شکل ۹: سطوح حاصل از برداشت سه‌بعدی شکستگی‌ها پیش از برش

پایین‌تر، تأثیر زبری سطح بیشتر و نمایان‌تر است، سطح تنش عمودی در همه آزمایش‌ها ۱۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع انتخاب شد که سطح نسبتاً پایینی از تنش نرمال است. به منظور حفظ سازگاری میان نتایج آزمایش‌های برش در راستاهای مختلف و تفسیر بهتر آنها، در همه آزمایش‌ها کلیه شرایط کاملاً یکسان در نظر گرفته شدند. آزمایش‌ها در جابجایی برشی ۱۰ میلی‌متر خاتمه یافتند. شکل ۱۱ منحنی‌های برش برای سطح‌های S1، S2 و S3 در راستاهای مختلف را نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود راستای برش هم در مقاومت برشی و هم در رفتار تغییرشکل‌پذیری شکستگی‌ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای داشته است.

ابتدا یک سطح درزه پلاستری با استفاده از قالب سیلیکونی، قالب‌گیری و ساخته شد، سپس سطح دیگر درزه روی سطح اول، قالب‌گیری و ساخته می‌شد و بدین ترتیب درزه‌هایی جفت شده^{۱۹} تولید شدند. از هر یک از هندسه‌های S1، S2 و S3 چهار درزه پلاستری (در مجموع ۱۲ عدد) ساخته شد (شکل ۱۰). این نمونه‌ها در چهار راستای برش (β)، ۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه (که به صورت پادساعتگرد نسبت به جهت مثبت محور x مشخص می‌شود) برای قرار گرفتن در جعبه برش قالب‌گیری شدند و در شرایط یکسان رطوبت و دما به مدت یکسانی تا زمان آزمایش نگهداری شدند.

این درزه‌های پلاستری تحت آزمایش برش مستقیم در شرایط CNL قرار گرفتند. از آنجا که در تنش‌های عمودی



شکل ۱۰: نمونه‌های پلاستری ساخته شده

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به معرفی یک دستگاه خودکار و خودتنظیم برای آزمایش برش مستقیم درزه‌های سنگی پرداخته شد. اجزا و قابلیت‌های دستگاه توسعه داده شده به اختصار در زیر برشمرده شده‌اند.

دستگاه متشکل است از: جعبه‌های برشی بالا و پایین؛ بازوهای بارگذاری عمودی و افقی؛ سیستم بارگذاری هیدرولیک؛ دو LVDT در راستای عمودی؛ یک LVDT در راستای افقی؛ قاب عکس‌العمل از جنس فولاد سخت؛ سلول‌های بار؛ شیرهای خودتنظیم یک‌طرفه و دوطرفه؛ سیستم کنترل گر PLC؛ سامانه ثبت و انتقال دیجیتالی اطلاعات حسگرها؛ صفحه HMI لمسی ۷ اینچی؛ کامپیوتر معمولی؛ رابط کاربری تنظیمات و کنترل؛ صفحه متحرک همراه با پیچ‌هایی تنظیم کننده در هر یک از جعبه‌های بالا و پایین.

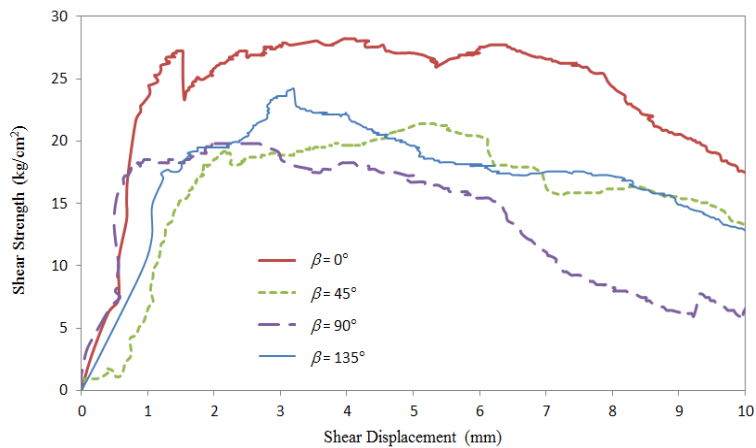
قابلیت‌های کلیدی دستگاه ساخته شده شامل این موارد است: خودتنظیم بودن، پیاده‌سازی شرایط بار عمودی ثابت و سختی عمودی ثابت؛ حرکت افقی یکنواخت و رفت و برگشتی؛ تعیین شرط برای خاتمه خودکار آزمایش؛ کالیبراسیون حسگرها؛ تصحیح مساحت درگیر حین آزمایش؛ پایش لحظه‌ای اطلاعات حسگرها؛ توقف خودکار آزمایش در صورت اضافه بار؛ حذف لقی نمونه در داخل جعبه برش؛ کنترل و تعیین تنظیمات به صورت دیجیتالی، استقرار یک تکه نمونه‌های بالا و پایین در جعبه برش.

۶- تشکر و قدردانی

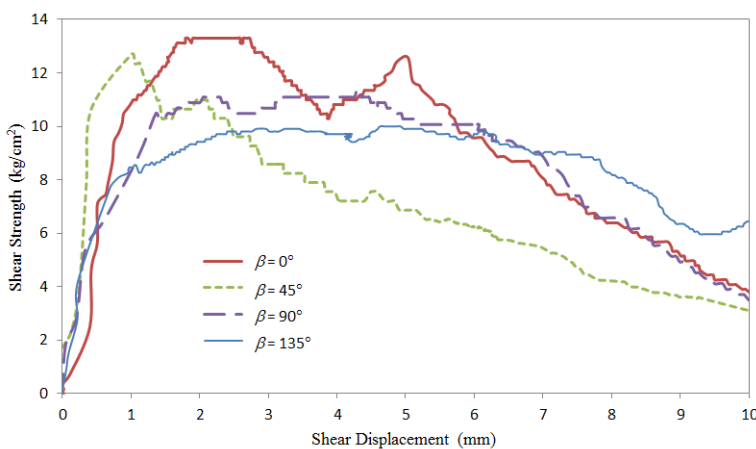
از آقای مهندس اصغر ملازاده، مدیر عامل شرکت آزمون ساز مبنا و آقای مهندس وحید نوعی، قائم مقام این شرکت، برای زحمات و هم‌فکری‌شان در زمینه طراحی و تولید دستگاه برش مستقیم خودتنظیم، تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

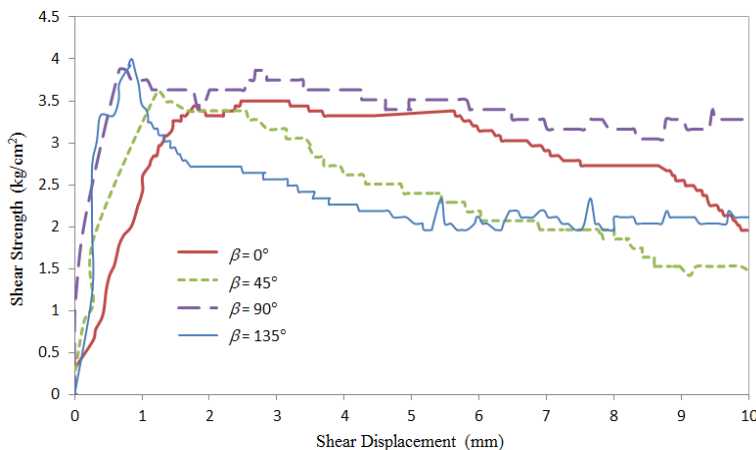
- [1] ASTM (2006) Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force. In: Annual book of ASTM standards. pp 384-392
- [2] ISRM (2007) The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. International Society for Rock Mechanics, Commission on Testing Methods
- [3] Hoek E (1970) Estimating the stability of excavated slopes in opencast mines. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy A109-A132.
- [4] Hoek E (1971) Influence of rock structure on the stability of rock slopes. In: Stability in Open Pit Mining, Proc. 1st International Conference on Stability in Open Pit Mining (Vancouver, November 23-25, 1970). pp 49-63
- [5] Ross-Brown DM, Walton G (1975) A portable shear box for testing rock joints. Rock mechanics 7:129-153.



الف



ب



ج

شکل ۱۱: منحنی‌های برش در راستاهای مختلف برای سطح‌های S1 (الف)، S2 (ب)، و S3 (ج)

[7] Haberfield CM, Seidel JP (1998) Some recent advances in the modelling of soft joints in direct shear. In: Proc. Int. Conf. Geomechanics/Ground Control in Mining & Underground Construction. pp 71–84

[8] Haque A, Indraratna B (2000) Shear behaviour of rock joints. CRC Press

[6] Bandis SC, Lumsden AC, Barton NR (1983) Fundamentals of rock joint deformation. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 20:249–268. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(83\)90595-8](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(83)90595-8)

- [9] Johnston IW, Lam TSK, Williams AF (1987) Constant normal stiffness direct shear testing for socketed pile design in weak rock. *Geotechnique* 37:83–89.
- [10] Indraratna B, Haque A, Aziz N (1998) Laboratory modelling of shear behaviour of soft joints under constant normal stiffness conditions. *Geotechnical & Geological Engineering* 16:17–44.
- [11] 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.
- [12] Babanouri N, Karimi Nasab S, Baghbanan A, Mohamadi HR (2011) Over-consolidation effect on shear behavior of rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 48:1283–1291. doi: 10.1016/j.ijrmms.2011.09.010
- [13] Amiri Hossaini K, Babanouri N, Karimi Nasab S (2014) The influence of asperity deformability on the mechanical behavior of rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 70:154–161. doi: 10.1016/j.ijrmms.2014.04.009

-
- ¹ Gauge
² Constant Normal Load
³ Constant Normal Stiffness
⁴ Servo-controlled
⁵ Reaction frame
⁶ Load cells
⁷ Overload
⁸ Linear variable differential transformer
⁹ Servo valves
¹⁰ Programmable Logic Controller
¹¹ Closed-loop
¹² Feedback
¹³ Monotonic
¹⁴ Cyclic
¹⁵ Real-time
¹⁶ Spreadsheet
¹⁷ Human–Machine Interface
¹⁸ Parent joints
¹⁹ Mated joints