

## تأثیر زبری سطح ناپیوستگی‌های دارای شیب‌های مختلف بر مقاومت سنگ درزه‌دار

### تحت تنش‌های سه محوری

فاطمه امین‌پور<sup>۱</sup>، حسن مومیوند<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد مهندسی استخراج معدن، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه 90f.aminpour@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه h.moomivand@urmia.ac.ir

(دریافت ۱۵ آذر ۱۳۹۶، پذیرش ۲۶ اردیبهشت ۱۳۹۷)

#### چکیده

زبری یکی از ویژگی‌های سطح ناپیوستگی‌ها است که می‌تواند نقش مهمی در مقاومت توده‌سنگ داشته باشد. تأثیر زبری در مقاومت سنگ آن هم تحت تنش‌های سه محوری کمتر مورد پژوهش قرار گرفته است. در این تحقیق تأثیر سه حالت عمده زبری ناپیوستگی‌ها به صورت دنداندار، زبر موجدار و صفحه‌ای صاف با شیب مختلف نسبت به فشار جانبی بر مقاومت سنگ تحت تنش‌های سه محوری مورد بررسی قرار گرفته است. برای ایجاد هر یک از زبری‌های سطح ناپیوستگی‌ها در شیب‌های مختلف، تکنیک ویژه‌ای به کار گرفته شده است. ۱۵ گروه نمونه‌های دارای سه نوع زبری سطح ناپیوستگی و دارای پنج نوع شیب از صفر تا ۹۰ درجه با موفقیت آماده‌سازی شده و مقاومت هر گروه تحت تنش‌های سه محوری در فشارهای جانبی مختلف اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه شیب ناپیوستگی از ۳۰ تا ۴۵ و ۶۰ درجه تحت فشار جانبی ثابت مقاومت محوری نمونه‌های دارای ناپیوستگی صاف شدیداً کاهش می‌یابد، اما مقاومت محوری ناپیوستگی‌های زبر موجدار و دنداندار با افزایش زاویه شیب از ۳۰ تا ۴۵ درجه تحت فشار جانبی ثابت نسبت به ناپیوستگی دارای صفحه‌ای صاف به مقدار کمتری کاهش می‌یابد و در کل مقاومت ناپیوستگی صفحه‌ای صاف دارای شیب مختلف و تحت تغییرات فشار جانبی کمتر از ناپیوستگی‌های زبر موجدار و دنداندار است. برای کلیه نمونه‌ها در شیب‌های صفر و ۹۰ درجه شکست در سنگ سالم اتفاق افتاد، اما برای نمونه‌های دارای ناپیوستگی‌های زبر موجدار و دنداندار در زاویه شیب ۳۰ درجه نیز شکست در سنگ سالم اتفاق افتاد. در صورتی که برای نمونه‌های دارای ناپیوستگی‌های دنداندار در زاویه شیب ۴۵ درجه به ویژه تحت فشار جانبی بیشتر، نیز شکست در سنگ سالم اتفاق افتاد. همچنین در نمونه‌های دارای ناپیوستگی‌های دنداندار در شیب ۶۰ درجه تحت تنش یک محوری لغزش در یک طرف سطوح دنداندارها اتفاق افتاد و باعث جابه‌جایی دو صفحه کلی ناپیوستگی شد اما با افزایش فشار جانبی دنداندارها شکسته شدند. با افزایش فشار جانبی تأثیر زاویه شیب بر مقاومت محوری کاهش یافته و شدت کاهش با افزایش زبری بیشتر می‌شود به طوری که مقاومت سنگ درزه‌دار با زبری بالا تحت فشارهای جانبی زیاد به مقاومت سنگ سالم نزدیک می‌شود. برای نشان دادن کاهش نسبت مقاومت محوری حداکثر ( $\sigma_{1max}$ ) به مقاومت محوری حداقل ( $\sigma_{1min}$ ) در رابطه با شیب ناپیوستگی‌ها و تغییرات افزایش فشار جانبی ( $\sigma_p$ )، ضریب جدیدی با عنوان نسبت مقاومت محوری حداکثر به مقاومت محوری حداقل سنگ ( $R_{triax} = \sigma_{1max} / \sigma_{1min}$ ) تعریف شد. دارای حداکثر مقدار برای فشار جانبی صفر است و به صورت تابع توانی منفی ابتدا با افزایش فشار جانبی ( $\sigma_p$ ) به شدت کاهش یافته است و سپس به مقدار ثابتی نزدیک می‌شود.

#### کلمات کلیدی

ناپیوستگی، زبری، شیب، ماده شبیه سنگ

## ۱- مقدمه

نمونه‌های دارای زبری مختلف سطح ناپیوستگی در شیب‌های مختلف، تأثیر زبری در مقاومت سنگ به ویژه تحت تنش‌های سه محوری کمتر مورد تحقیق قرار گرفته است. به طوری که تأثیر زبری بر رفتار سنگ درزه‌دار تحت تنش‌های سه محوری به خوبی مشخص نیست. سینها و سینگ [۱۸] ناپیوستگی‌های دنداندار روی نمونه‌هایی استوانه‌ای شکل از پلاستیک شفاف دارای شیب از ۵ تا ۵۰ درجه ایجاد کردند و دهانه ناپیوستگی‌ها را با مواد خرد شده حاصل از حفاری (چالزنی) پرکردند. حداقل ضخامت مواد پرکننده به اندازه‌ای بود که دو صفحه در برگیرنده ناپیوستگی‌ها با هم تماس نداشتند. در چنین حالتی که ضخامت مواد پرکننده باعث می‌شود که دندان‌های سطوح مقابل ناپیوستگی با یکدیگر تماس نداشته باشند، مقاومت و رفتار مکانیکی نمونه‌های دارای ناپیوستگی، متأثر از زبری نیست بلکه متأثر از کمیت و ویژگی‌های ماده بین دهانه ناپیوستگی است.

در این تحقیق ایجاد نمونه‌های دارای ناپیوستگی دنداندار (T-M) با استفاده از سنگ امکان‌پذیر نبوده است و به این منظور مدل فیزیکی ماده شبیه سنگ مورد مطالعه قرار گرفته است. مدلسازی فیزیکی از گذشته تا به حال ابزار مفیدی برای تحقیق بوده است و مواد دارای ترکیبات مختلف برای انواع کارهای مدلسازی فیزیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. استیمسون [۱۹] ماده مدل دارای ترکیبات مختلف برای اهداف مختلف در مکانیک سنگ ارایه کرد. با استفاده از گچ یا مصالحی مانند سیمان بدون مواد پرکننده دانه‌ای، ماده مدل شبیه سنگ حاصل نمی‌شود. پژوهشگران متعددی دریافته‌اند که گچ و مواد پرکننده دانه‌ای همچون ماسه بهترین ماده مدل برای مدلسازی فیزیکی در مکانیک سنگ است و رفتار شکننده شبیه سنگ از خود نشان می‌دهد [۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵]. رفتار مکانیکی ماده مدل با تغییر در ترکیب آن تغییر می‌یابد. با استفاده از ترکیب گچ با ماده پرکننده ماسه و آب می‌توان ماده شبیه سنگ ایجاد کرد. نمونه‌های دارای ناپیوستگی دنداندار با استفاده از ماده مدل ساخته شده از گچ و مواد پرکننده ماسه آماده‌سازی شده‌اند.

ناپیوستگی‌ها شیب‌های مختلفی نسبت به فشار جانبی دارند، در نتیجه نیاز است در مطالعه تأثیر زبری بر مقاومت ناپیوستگی‌های تحت تنش‌های سه محوری، شیب ناپیوستگی‌ها نیز مورد ملاحظه قرار گیرد. هدف تحقیق حاضر نشان دادن چگونگی تأثیر تغییرات زبری در زوایای شیب مختلف ناپیوستگی‌ها بر مقاومت سنگ تحت تنش‌های سه محوری است. به این منظور تأثیر سه نوع زبری عمده سطح ناپیوستگی‌ها به صورت دنداندار (T-M)، زبر موجدار (R-L) و صفحه‌ای صاف

وجود ناپیوستگی‌ها به عنوان سطوح ضعیف باعث شده است که مقاومت توده‌سنگ تفاوت قابل توجهی با سنگ یک پارچه داشته باشد. ناپیوستگی‌ها ویژگی‌هایی مانند زاویه شیب، فاصله بندی، مواد پرکننده و زبری سطح دارند که بر مقاومت سنگ موثرند. پژوهش‌های انجام‌شده در مورد زبری بیشتر بر روی مقاومت برشی در آزمون‌های برش مستقیم متمرکز شده است [۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶]. نمونه‌ای از نتیجه پژوهش‌های کاربردی انجام شده در این خصوص، معیار مقاومت برشی ارایه شده توسط بارتن و باندیس [۷] است. با استفاده از مطالعه وسیع روی رفتار درزه‌ها در برش مستقیم، ضریب زبری درزه (JRC) برای نشان دادن تأثیر زبری در مقاومت برشی توسط بارتن و باندیس [۷] ارایه شد. اگرچه نیمرخ مقیاس‌دار برای تعیین مقدار JRC ارائه‌شده توسط بارتن و چوبی [۸] در حدود مقیاس آزمایشگاهی است اما بارتن و باندیس [۷، ۹] با استفاده از نتایج آزمون‌های برش مستقیم نشان دادند که با افزایش اندازه، مقدار JRC و در نتیجه مقاومت برشی کاهش می‌یابد.

در مورد تأثیر برخی ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها همچون زاویه شیب در مقاومت سنگ درزه‌دار تحت تنش‌های سه محوری تحقیقات متعددی به روش‌های تجربی و عددی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که زاویه شیب ناپیوستگی به ویژه برای شرایطی که زاویه شیب حدوداً بین زاویه اصطکاک سطح و ۹۰ درجه است، تأثیر قابل توجهی در مقاومت سنگ دارد [۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴]. برای نشان دادن کاهش میزان مقاومت فشاری یک محوری در رابطه ناهمسانگردی حاصل از شیب صفحه ضعیف، عاملی با عنوان ضریب ناهمسانگردی (R) به صورت نسبت مقاومت فشاری یک محوری حداکثر ( $\sigma_{max}$ ) به مقاومت فشاری یک محوری حداقل ( $\sigma_{min}$ ) تعریف شده است [۱۵، ۱۶، ۱۷]. مقاومت فشاری یک محوری حداکثر در جهت زاویه بارگذاری صفر یا ۹۰ درجه نسبت به امتداد صفحات ضعیف و مقاومت فشاری یک محوری حداقل در زاویه بارگذاری حدود ۳۰ درجه نسبت به امتداد صفحات ضعیف گزارش شده‌اند [۱۵، ۱۷]. در بیشتر حالات مقاومت فشاری یک محوری حداقل در زاویه بارگذاری  $(\phi - 45/2)$  درجه نسبت به امتداد صفحات ضعیف اتفاق می‌افتد که در آن  $\phi$  زاویه اصطکاک صفحه ضعیف است [۱۷].

پارامتر زبری سطح ناپیوستگی‌ها از جمله ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها است که بررسی تأثیر آن در شیب‌های مختلف سطح ناپیوستگی بر ویژگی‌های مهندسی سنگ تحت تنش‌های سه محوری دارای اهمیت است. به علت سختی آماده‌سازی

هفته خشک شده و مقاومت فشاری یک محوری و مقاومت کششی غیرمستقیم برزبلی آن‌ها بر اساس دستورالعمل پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ تعیین شد. مقاومت فشاری یک محوری متوسط ( $\sigma_{ciav}$ ) ماده مدل برابر ۱۹۰۷ مگاپاسکال و مقاومت کششی متوسط ( $\sigma_{tav}$ ) آن بر اساس آزمایش برابر ۱٫۶۴ مگاپاسکال حاصل شد.

برای ایجاد سطوح ناپیوستگی دنداندار از قالب‌های یونولیت توپر استفاده شد. نمونه‌های دارای ناپیوستگی دنداندار با استفاده از قالب‌های یونولیت استوانه‌های توپر دارای قطر ۵۴ میلی‌متر با شیب‌های مختلف آماده‌سازی شدند. نمونه‌ای از نحوه ایجاد یک طرف ناپیوستگی دنداندار دارای زاویه شیب ۳۰ درجه با استفاده از قالب استوانه یونولیت توپر در شکل ۱ نشان داده شده است. ابتدا قالب یونولیتی استوانه‌ای توپر دارای سطح ناپیوستگی دنداندار با شیب معین به صورت نصف بدنه نمونه و یک طرف ناپیوستگی در قسمت پایین داخل قالب استوانه‌ای توخالی PVC به قطر داخلی ۵۴ میلی‌متر قرار داده شد و در ادامه ملات ماده مدل به داخل قالب ریخته شد. پس از گیرش اولیه، قالب توپر یونولیت دنداندار از طرف دیگر قالب استوانه‌ای توخالی PVC خارج شد. در این مرحله یک طرف بدنه استوانه‌ای نمونه دارای یک سطح ناپیوستگی دنداندار ایجاد شد، سپس به جای قالب یونولیت دنداندار خارج شده، ملات ماده مدل ریخته شد. پس از گیرش طرف دوم بدنه ماده مدل، نمونه استوانه‌ای دارای ناپیوستگی دنداندار با شیب معین حاصل شد. این روش مدلسازی بسیار روش موفق بود چون دندان‌های دو طرف صفحه ناپیوستگی کاملاً به راحتی با یکدیگر جفت شدند. پنج گروه نمونه‌ای استوانه‌ای دارای ناپیوستگی‌های دنداندار با شیب‌های ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به حالت افقی، دارای نسبت ارتفاع به قطر ۲ و منطبق بر ابعاد داخلی سلول سه محوری هوک آماده‌سازی شدند. نمونه‌ای از هر یک از گروه‌های ناپیوستگی‌های دنداندار دارای شیب‌های ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه در شکل ۲ نشان داده شده است.

نمونه‌های دارای سطوح زبر موجدار و صفحه‌ای صاف در اندازه مشابه نمونه‌های دنداندار از سنگ آهک آماده‌سازی شدند. روش‌های متفاوتی برای آماده‌سازی نمونه‌های دارای ناپیوستگی زبر موجدار از سنگ آهک با شیب‌های ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه به کار گرفته شد که هر یک دارای مشکلات ویژه‌ای بودند [۲۹]. در نهایت با استفاده از شکستگی‌های موجود در سنگ گسترش آن‌ها به صورت شکست تازه حاصل از بلوک‌های سنگ آهکی استفاده شد. در این روش سطح شکست از هم جدا شده

صاف (S-L) هر یک با شیب‌های ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به فشار جانبی مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌های دارای ناپیوستگی زبر موجدار و صفحه‌ای صاف از سنگ آهک و نمونه‌های دارای ناپیوستگی دنداندار با استفاده از مدل فیزیکی ماده شبیه سنگ ساخته شده‌اند. با افزایش فشار جانبی نسبت مقاومت محوری حداکثر ( $\sigma_{1max}$ ) به مقاومت محوری حداقل ( $\sigma_{1min}$ ) می‌تواند تغییر کند. برای نشان دادن تأثیر شفاف شیب ناپیوستگی دارای زبری مختلف در مقاومت سنگ تحت تنش‌های سه محوری، رابطه بین نسبت  $\sigma_{1max}/\sigma_{1min}$  و تغییرات فشار جانبی ( $\sigma_3$ ) نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

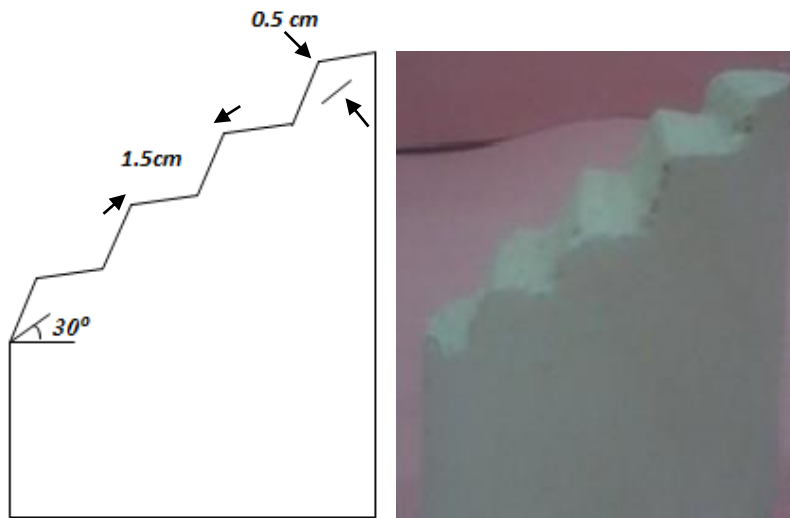
## ۲- روش کار

برای آماده‌سازی گروه‌های نمونه‌های دارای صفحات ناپیوستگی با زبری‌های متغیر به صورت دنداندار، زبر موجدار و صفحه‌ای صاف در شیب‌های ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به حالت افقی (فشار جانبی) روش‌های مختلفی به کار گرفته شد. یک روش ایجاد زبری دنداندار با استفاده از سوهان بر روی صفحات صاف ناپیوستگی‌های ایجاد شده با اره الماسه در شیب‌های مختلف در نمونه‌های استوانه‌ای سنگ آهک بود که سنگ به سختی خراشیده می‌شد و در عین حال سطوح زبر در مقابل هم جفت نمی‌شدند که برای ایجاد زبری دنداندار از مدل فیزیکی استفاده شد. پس از تحقیق گسترده در مورد ماده مدل و نحوه مدلسازی، از ماده مدلی متشکل از گچ، ماده پرکننده ماسه دارای دانه‌بندی خاص، آب و مواد افزودنی بوراکس برای کنترل زمان گیرش استفاده شد. همچنین تغییر در درصد مقدار مواد تشکیل‌دهنده ماده مدل تأثیر بسزایی در ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌ها خواهد داشت [۲۵، ۲۶]. در این تحقیق نسبت وزنی گچ به مجموع گچ و ماسه برابر ۵۰ درصد و نسبت وزنی ماسه نسبت به مجموع گچ و ماسه ۵۰ درصد، نسبت وزنی آب به مجموع گچ و ماسه ۲۴ درصد و نسبت وزنی بوراکس به آب ۰٫۵ درصد انتخاب شد. ماسه مصرفی در ماده مدل از نوع شسته با دانه‌بندی بین ۰٫۹ تا ۱٫۲ میلی‌متر و گچ مصرفی دارای زمان گیرش اولیه ۸ دقیقه و گیرش نهایی ۱۷ دقیقه استفاده شد.

برای مدلسازی از قالب‌های استوانه‌ای توخالی دارای قطر داخلی ۵۴ میلی‌متر (قطر NX) بر اساس دستورالعمل پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ [۲۷، ۲۸] از PVC و گیره‌های مربوطه ساخته و آماده شدند. ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای بدون ناپیوستگی از ماده مدل برای آزمون‌های مقاومت فشاری و کششی بر اساس استاندارد آماده‌سازی شدند. نمونه‌های ماده مدل فاقد ناپیوستگی در دمای اتاق در تابستان پس از مدت دو

شده است. برای آماده‌سازی نمونه‌های دارای ناپیوستگی صفحه‌ای صاف با شیب‌های ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه، ابتدا مغزه‌های استوانه‌ای سنگ آهک بر اساس استاندارد تهیه شد، سپس به وسیله اره الماسه کوچک در زاویه‌های مورد نظر در آن‌ها ناپیوستگی ایجاد شده است. تجهیزات آزمایشگاهی برای انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری یک محوری و سه محوری شامل ماشین آزمایش اعمال بار محوری ساخت شرکت انگلیسی ELE، دارای ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن، سلول سه محوری هوک و دستگاه پمپ الکتریکی تامین‌کننده فشار جانبی دارای ظرفیت ۷۰ مگاپاسکال ساخت شرکت انگلیسی ELE در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه ارومیه بودند.

که در اغلب حالات به صورت سطوح زبر موجدار بود برای تهیه نمونه انتخاب شد که کاملاً با زبری دنداندار و صفحه‌ای صاف متفاوت بود. هر یک از بلوک‌های سنگ دارای ناپیوستگی زبر موجدار طوری در ملات گچ تثبت شد که بتوان مغزه استوانه‌ای پیوستگی با شیب معین از آن تهیه کرد. هر یک از گروه‌های مغزه‌های استوانه‌ای دارای ناپیوستگی زبر موجدار با زوایای مورد نیاز ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه به این ترتیب ایجاد شدند. دو سر مغزه‌های دارای ناپیوستگی زبر موجدار با اره مغزه‌بر مطابق استاندارد عمود بر محور طولی بریده شدند. نمونه‌ای از هر یک از مغزه‌های دارای ناپیوستگی زبر موجدار در شکل ۳ نشان داده شده است. زمان طولانی و تعداد بلوک‌های قابل توجهی برای آماده‌سازی دقیق پنج گروه نمونه‌های دارای ناپیوستگی زبر موجدار با پنج نوع شیب مختلف صرف شد. تعدادی از نمونه‌های گروه‌های مختلف دارای سطوح زبر موجدار در شکل ۴ نشان داده



شکل ۱- نمونه‌ای از نحوه ایجاد دندانها بر روی یک طرف قالب استوانه یونولیت برای ساخت ناپیوستگی دارای شیب ۳۰ درجه



شکل ۲- نمونه‌ای از هریک از ناپیوستگی دنداندار (T-M) دارای شیب‌های ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه پس از آماده‌سازی با استفاده ماده مدل



شکل ۳- نمونه‌ای از هریک از گروه‌های ناپیوستگی زبر موجدار (R-L) دارای شیب‌های ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه



شکل ۴- تعدادی از نمونه‌های آماده‌سازی شده گروه‌های مختلف دارای ناپیوستگی زبر موجدار (R-L) با شیب‌های مختلف تهیه شده از سنگ آهک

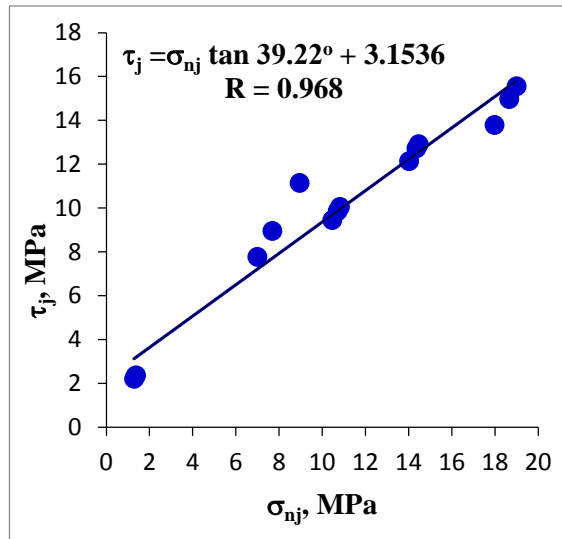
مقاومت فشاری یک محوری و سه محوری نمونه‌های ماده مدل و گروه‌های مختلف نمونه‌های استوانه‌ای دارای ناپیوستگی دنداندار دارای شیب‌های ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه تحت فشارهای جانبی از پیش تعیین شده ۰، ۵، ۷، ۱۰، ۱۴ و ۲۰ مگاپاسکال بر اساس دستورالعمل پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ اندازه‌گیری شد. مقاومت فشاری یک محوری متوسط ( $\sigma_{ciav}$ ) سنگ آهک سالم برابر ۲۸/۸۱ مگاپاسکال و مقاومت کششی متوسط ( $\tau_{av}$ ) آن بر اساس آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم برزیلی برابر ۲/۳۰ مگاپاسکال به دست آمد.

سنگ آهک مورد تحقیق تحت فشار جانبی بیشتر از ۲۰ مگاپاسکال رفتار شکننده از خود نشان نداد. در نتیجه حداکثر فشار جانبی برای نمونه‌های استوانه‌ای دارای ناپیوستگی زبر موجدار و صفحه‌ای صاف برابر ۲۰ مگاپاسکال اعمال شد.

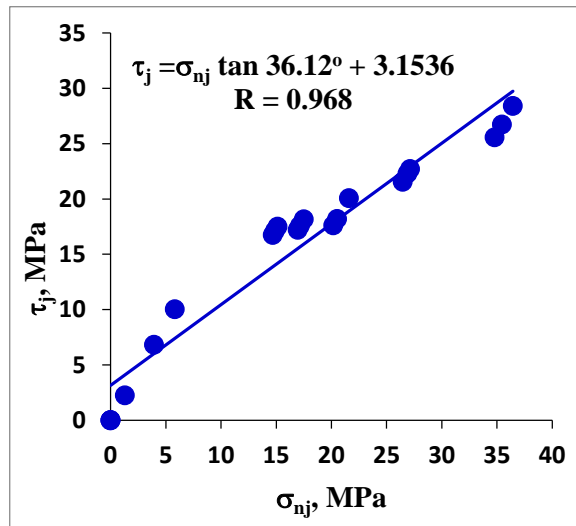
برای تحلیل نتایج با رابطه جیگر [۳۰]، زاویه اصطکاک سطح ناپیوستگی ( $\phi_j$ ) نیز نیاز است تعیین شود. زاویه اصطکاک سطح ناپیوستگی صفحه‌ای صاف از طریق آزمایش برش مستقیم تعیین و برابر ۳۲/۶۴ درجه حاصل شد، اما برای تعیین زاویه اصطکاک سطح ناپیوستگی ( $\phi_j$ ) دنداندار و زبر موجدار در آزمایش برش مستقیم پس از اعمال تنش عمودی با افزایش تنش برشی، تنش عمودی نیز افزایش می‌یابد. به این علت در آزمایش برش مستقیم نتایج به دو صورت بار عمودی ثابت (CNL) و سختی عمودی ثابت (CNS) انجام می‌شود. نتایج تحقیقات مختلف نشان می‌دهد

مقاومت فشاری یک محوری و سه محوری نمونه‌های ماده مدل و گروه‌های مختلف نمونه‌های استوانه‌ای دارای ناپیوستگی دنداندار دارای شیب‌های ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه تحت فشارهای جانبی از پیش تعیین شده ۰، ۲/۵، ۵، ۷ و ۱۰ مگاپاسکال بر اساس دستورالعمل پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ اندازه‌گیری شد [۲۸]. مقاومت فشاری یک محوری متوسط ( $\sigma_{ciav}$ ) ماده مدل برابر ۱۹/۰۷ مگاپاسکال حاصل شد. ماده مدل تحت فشار جانبی بیشتر از ۱۰ مگاپاسکال رفتار شکننده از خود نشان نداد. در نتیجه حداکثر فشار جانبی برای نمونه‌های استوانه‌ای دارای ناپیوستگی دنداندار تا ۱۰ مگاپاسکال اعمال شد. تغییرات فشار جانبی در نمونه‌های ساخته شده از ماده مدل شبیه تغییرات فشار جانبی نمونه‌های ساخته شده از سنگ آهک است، با این تفاوت که بین فشار جانبی صفر و ۵ مگاپاسکال، یک فشار جانبی ۲/۵ مگاپاسکال نیز استفاده شده است. چون چنین نمونه‌هایی که سست‌تر از سنگ آهک بوده است و در دامنه کمتری از فشار جانبی شکننده‌اند، برای این که رفتار مقاومتی آن‌ها تحت تنش‌های جانبی کمتر با ظرافت بیشتری نشان داده شود، فشار جانبی ۲/۵ مگاپاسکال نیز در آزمایش مقاومت فشاری سه محوری استفاده شد.

مقاومت فشاری یک محوری و سه محوری نمونه‌های سنگ آهک سالم و گروه‌های مختلف نمونه‌های استوانه‌ای دارای



شکل ۵- رابطه بین مقاومت برشی ( $\tau_j$ ) و تنش عمودی ( $\sigma_{nj}$ ) برای ناپیوستگی دنداندار (زاویه اصطکاک سطح برابر  $39.22^\circ$  درجه)



شکل ۶- رابطه بین مقاومت برشی ( $\tau_j$ ) و تنش عمودی ( $\sigma_{nj}$ ) برای ناپیوستگی زبر موجدار (زاویه اصطکاک سطح برابر  $36.12^\circ$  درجه)

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- تحلیل نتایج تأثیر زبری و شیب ناپیوستگی‌ها در مقاومت سنگ درزه‌دار تحت تنش‌های سه محوری

رابطه بین مقاومت محوری ( $\sigma$ ) زاویه شیب ناپیوستگی‌ها نسبت به حالت افقی ( $\alpha$ ) تحت فشارهای جانبی مختلف برای نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری سه محوری بر روی نمونه‌های دارای ناپیوستگی با زبری متفاوت مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. رابطه بین مقاومت محوری ( $\sigma$ ) و زاویه شیب ناپیوستگی‌های دنداندار تحت فشارهای جانبی مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است و همچنین رابطه بین مقاومت محوری و زاویه شیب ناپیوستگی‌های زبر موجدار و صفحه‌ای

که روش آزمایش برش مستقیم به صورت بار عمودی ثابت (CNL) کمتر مبین واقعیت بوده است زیرا در این حالت صفحه ناپیوستگی برای اتساع در جهت قائم نسبت به حالت سختی عمودی ثابت (CNS) آزادتر است. به طوری که نتایج آزمایش برش مستقیم به روش سختی عمودی ثابت، رفتار ناپیوستگی‌ها را واقع بینانه‌تر نشان می‌دهد [۱] اما در آزمایش مقاومت فشاری سه محوری چنین مشکلی وجود ندارد.

برای تعیین زاویه اصطکاک هر یک از سطوح ناپیوستگی دنداندار و زبر موجدار از نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه محوری آن‌ها استفاده شد. به این منظور زوج تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل بر روی صفحه ناپیوستگی دنداندار و زبر موجدار گروه‌های نتایج دارای شیب  $60^\circ$  درجه تصویر شدند و زوج تنش‌های برشی و عمودی بر روی صفحه ناپیوستگی حاصل شد. با استفاده از رابطه بین مقاومت برشی ( $\tau_j$ ) و تنش عمودی ( $\sigma_{nj}$ ) زاویه اصطکاک سطح ناپیوستگی ( $\phi_j$ ) برای ناپیوستگی دنداندار و زبر موجدار به ترتیب برابر  $39.22^\circ$  و  $36.12^\circ$  درجه به دست آمد (شکل ۵ و ۶).

سه نوع زبری ایجاد شده بازه وسیعی از زبری را تشکیل می‌دهند. بر اساس نمودار زبری مقیاس‌داری که توسط بارتن و چوبی [۸] برای تعیین ضریب زبری درزه (JRC) ارائه شده است، مقدار JRC حداقل و حداکثر در بازه صفر تا ۲۰ در تغییر است. زبری صفحه‌ای صاف ایجاد شده در این تحقیق با نمودار مربوط به زبری دارای JRC حداقل و برابر صفر مطابقت خوبی نشان می‌دهد و یکسان است. همچنین در ناپیوستگی‌های دارای زبری دنداندار این تحقیق، سطوح ناپیوستگی در هم قفل شده به طوری با افزایش فشار جانبی لغزش در سطح دندانده اتفاق نمی‌افتد بلکه دنداندها شکسته می‌شوند که این با بالاترین حد زبری در نمودار زبری ارائه شده توسط بارتن و چوبی [۸] تقریباً قابل مقایسه است. همچنین زبری ناپیوستگی‌های زبر موجدار بین دو نوع زبری صفحه‌ای صاف و دنداندار واقع می‌شود. هدف از مقایسه زبری حاصل از این تحقیق با نمودار زبری مربوط به تعیین JRC صرفاً برای نشان دادن بازه وسیع تغییرات زبری ایجاد شده است.

و صفحه‌ای صاف این است که ناپیوستگی‌های دنداندار از ماده مدل ساخته شده‌اند (شکل ۱۰). در کل چنین نتیجه می‌شود که ناپیوستگی‌ها تحت مقدار تنش‌های زیاد مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند به طوری که مقاومت سنگ دارای ناپیوستگی به مقاومت سنگ سالم نزدیک می‌شود و ناپیوستگی‌ها تحت تنش جانبی کمتر تأثیر مخرب‌تری دارند.

رابطه بین مقاومت محوری ( $1\sigma$ ) و زاویه شیب ناپیوستگی‌ها در فشارهای جانبی ثابت بر اساس تئوری جیگر [۳۰] در رابطه ۱ ارایه شده است.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2(c_j + \sigma_3 \tan\phi_j)}{(1 - \tan\phi_j \cot\alpha) \sin 2\alpha} \quad (1)$$

که در آن:

$1\sigma$  تنش محوری

$3\sigma$  تنش جانبی

$\alpha$  زاویه بین ناپیوستگی و جهت تنش جانبی ( $3\sigma$ )

$C$  مقاومت چسبندگی ناپیوستگی

$\phi_j$  زاویه اصطکاک ناپیوستگی

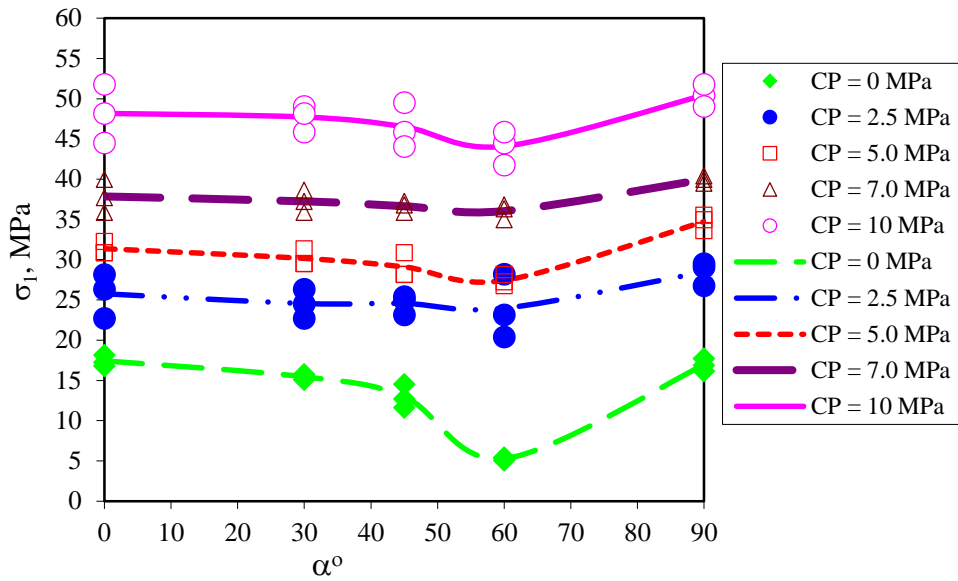
بر اساس رابطه جیگر وقتی که  $\alpha$  بین  $\phi_j$  و  $90^\circ$  درجه است لغزش در صفحه ناپیوستگی اتفاق می‌افتد و در  $\alpha$  برابر  $\phi_j$  و  $90^\circ$  درجه دارای دو مجانب قائم است که در بازه  $0 \leq \alpha < \phi_j$  و  $90^\circ = \alpha$ ، مقاومت محوری ( $1\sigma$ ) برابر مقاومت محوری سنگ سالم فاقد ناپیوستگی در نظر گرفته می‌شود. برای  $\alpha = \pi/4 + \phi_j/2$ ، مقدار  $1\sigma$  یا ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) دارای مقدار حداقل است. با داشتن مقدار زاویه اصطکاک ناپیوستگی ( $\phi_j$ ) و مقاومت چسبندگی ناپیوستگی ( $C$ ) برای فشار جانبی ثابت، مقاومت محوری با به عنوان تابعی از زاویه شیب قابل رسم است. مقدار مقاومت چسبندگی نتایج برابر صفر است.

رابطه بین مقاومت محوری و زاویه شیب ( $\alpha$ ) برای ناپیوستگی‌های دنداندار و زبر موجدار نتایج اندازه‌گیری شده با رابطه جیگر در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ با هم مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌شود که نتایج تجربی با تئوری جیگر تفاوت قابل توجهی نشان می‌دهد.

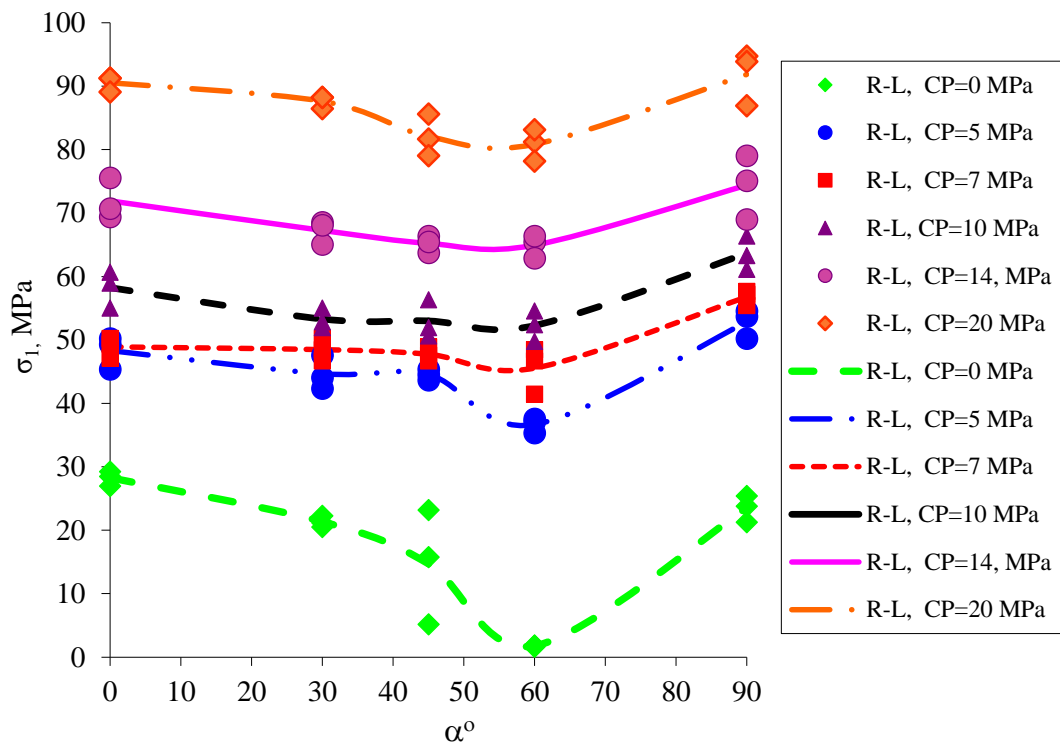
صاف در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. برای مقایسه تأثیر شیب و زبری در مقاومت محوری تحت فشارهای جانبی مختلف، رابطه بین مقاومت محوری و زاویه شیب برای ناپیوستگی‌های زبر موجدار و صفحه‌ای صاف در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

با افزایش زاویه شیب ناپیوستگی‌ها از صفر تا  $30^\circ$  درجه مقاومت محوری ناپیوستگی صفحه‌ای صاف، زبر موجدار و دنداندار تحت فشار جانبی ثابت به مقدار کمی کاهش می‌یابد. با افزایش زاویه شیب ناپیوستگی از  $30^\circ$  تا  $45^\circ$  و  $60^\circ$  درجه مقاومت محوری نمونه‌های دارای ناپیوستگی صاف به شدت کاهش می‌یابد اما مقاومت محوری ناپیوستگی‌های زبر موجدار و دنداندار با افزایش زاویه شیب از  $30^\circ$  تا  $45^\circ$  درجه تحت فشار جانبی ثابت نسبت به ناپیوستگی دارای صفحه‌ای صاف به مقدار کمتری کاهش می‌یابد. در زاویه شیب  $60^\circ$  درجه مقاومت محوری سه نوع زبری به حداقل می‌رسد و در کل مقاومت محوری نمونه‌های دارای ناپیوستگی صفحه‌ای صاف کمتر از مقاومت محوری نمونه‌های دارای ناپیوستگی‌های زبر موجدار و دنداندار است. برای نمونه‌های دارای ناپیوستگی‌های در شیب صفر و  $90^\circ$  درجه و سه نوع زبری، شکست در سنگ سالم اتفاق افتاد اما برای نمونه‌های دارای ناپیوستگی‌های زبر موجدار و دنداندار در شیب  $30^\circ$  درجه نیز شکست در سنگ سالم اتفاق افتاد (شکل‌های ۱۱ و ۱۲) و همچنین برای نمونه‌های دارای ناپیوستگی‌های دنداندار در زاویه شیب  $45^\circ$  درجه به ویژه با افزایش فشار جانبی نیز شکست در سنگ سالم اتفاق افتاد. در نمونه‌های دارای ناپیوستگی‌های دنداندار در زاویه شیب  $60^\circ$  درجه تحت تنش یک محوری، لغزش در یک طرف سطوح دنداندارها اتفاق افتاد و باعث جابه‌جایی دو صفحه کلی ناپیوستگی شد، اما با افزایش فشار جانبی دنداندار شکسته شدند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فشار جانبی تأثیر شیب کاهش می‌یابد و شدت کاهش با افزایش زبری بیشتر می‌شود، به طوری که مقاومت سنگ درزه‌دار با زبری بالا تحت فشارهای جانبی فزاینده به مقاومت سنگ سالم نزدیک می‌شود. با افزایش فشار جانبی نتایج سه نوع زبری به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شود و علت تفاوت ناچیز مقاومت گروه‌های نتایج مربوط به ناپیوستگی‌های دنداندار با گروه‌های زبر موجدار

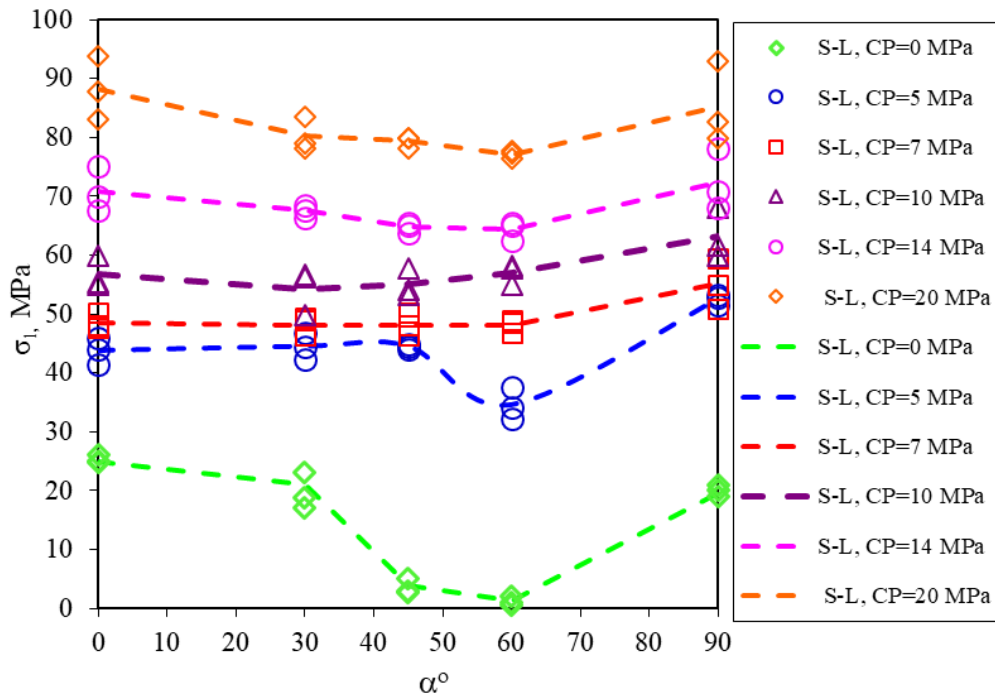




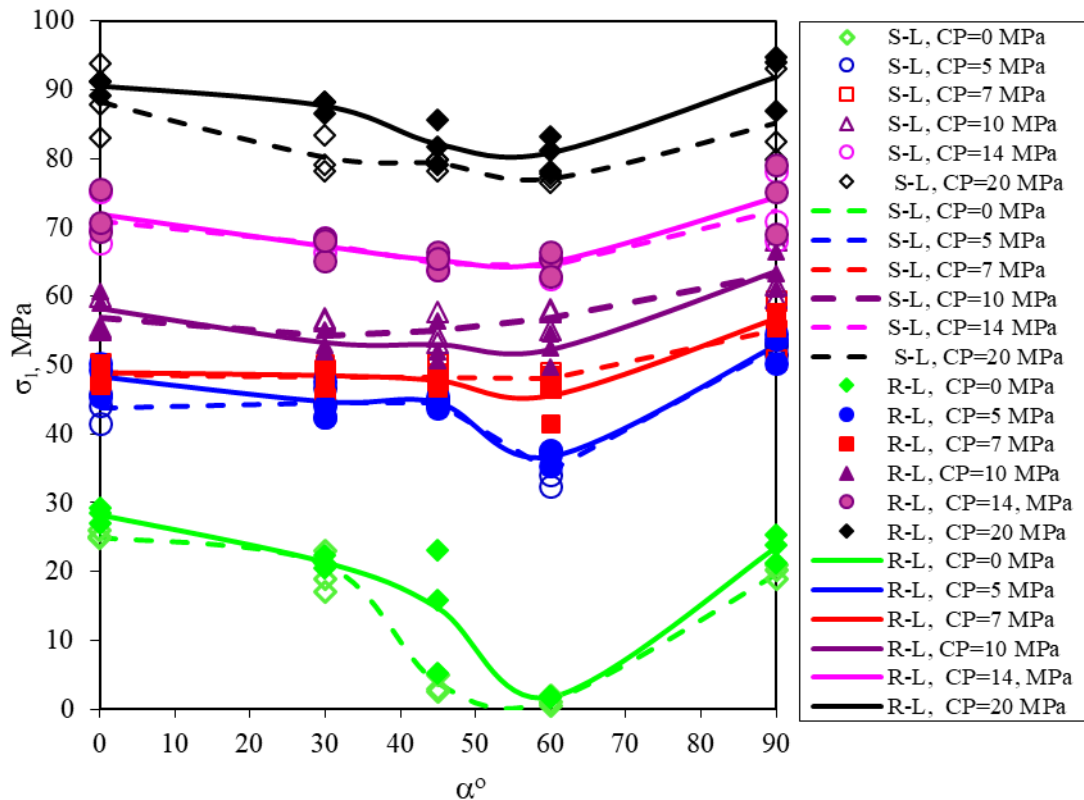
شکل ۷- رابطه بین مقاومت محوری ( $\sigma_1$ ) و زاویه شیب ( $\alpha$ ) برای ناپیوستگی دندانه‌دار (T-M) تحت فشارهای جانبی (CP) مختلف



شکل ۸- رابطه بین مقاومت محوری ( $\sigma_1$ ) و زاویه شیب ( $\alpha$ ) برای ناپیوستگی زبر موجدار (R-L) تحت فشارهای جانبی (CP) مختلف



شکل ۹- رابطه بین مقاومت محوری ( $\sigma_1$ ) و زاویه شیب ( $\alpha$ ) برای ناپیوستگی صفحه‌ای صاف (S-L) تحت فشارهای جانبی (CP) مختلف



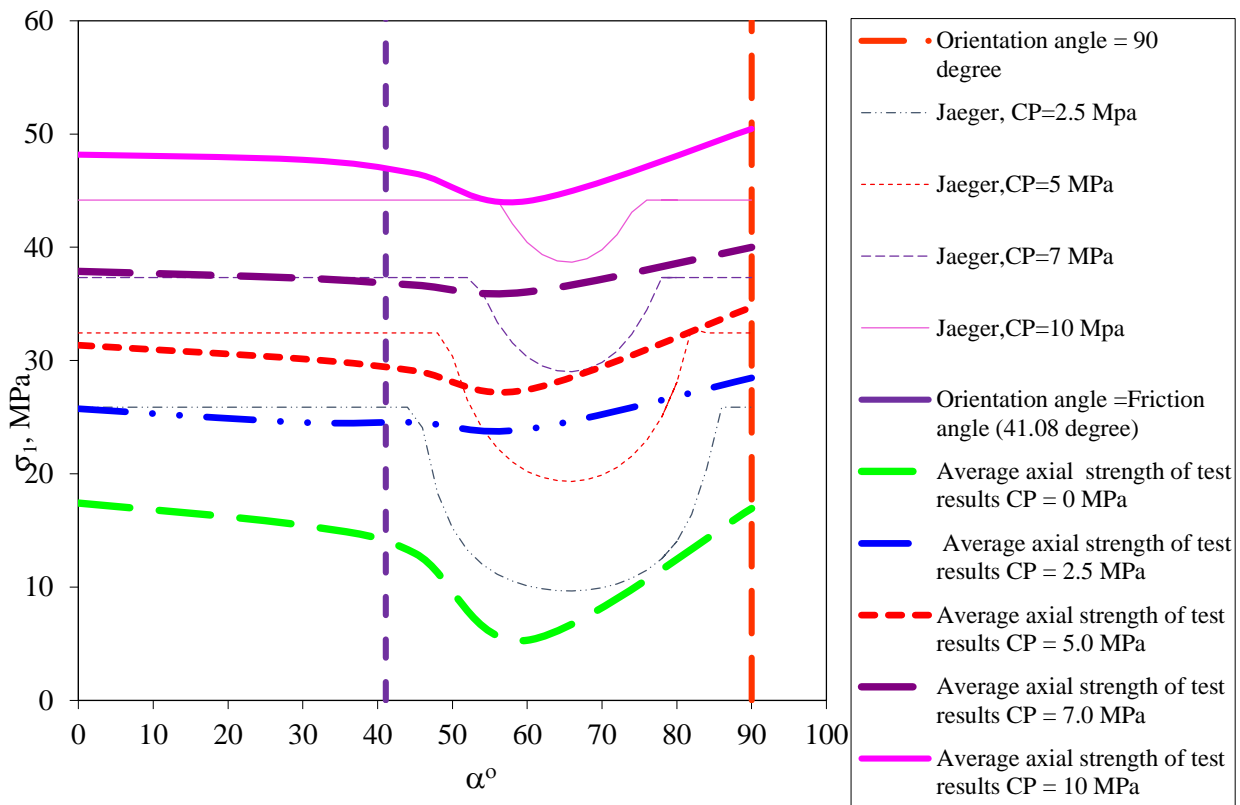
شکل ۱۰- مقایسه رابطه بین نسبت مقاومت محوری و زاویه شیب ( $\alpha$ ) ناپیوستگی‌های دارای سطوح زبر موجدار (R-L) و صفحه‌ای صاف (S-L) تحت فشارهای جانبی (CP) مختلف



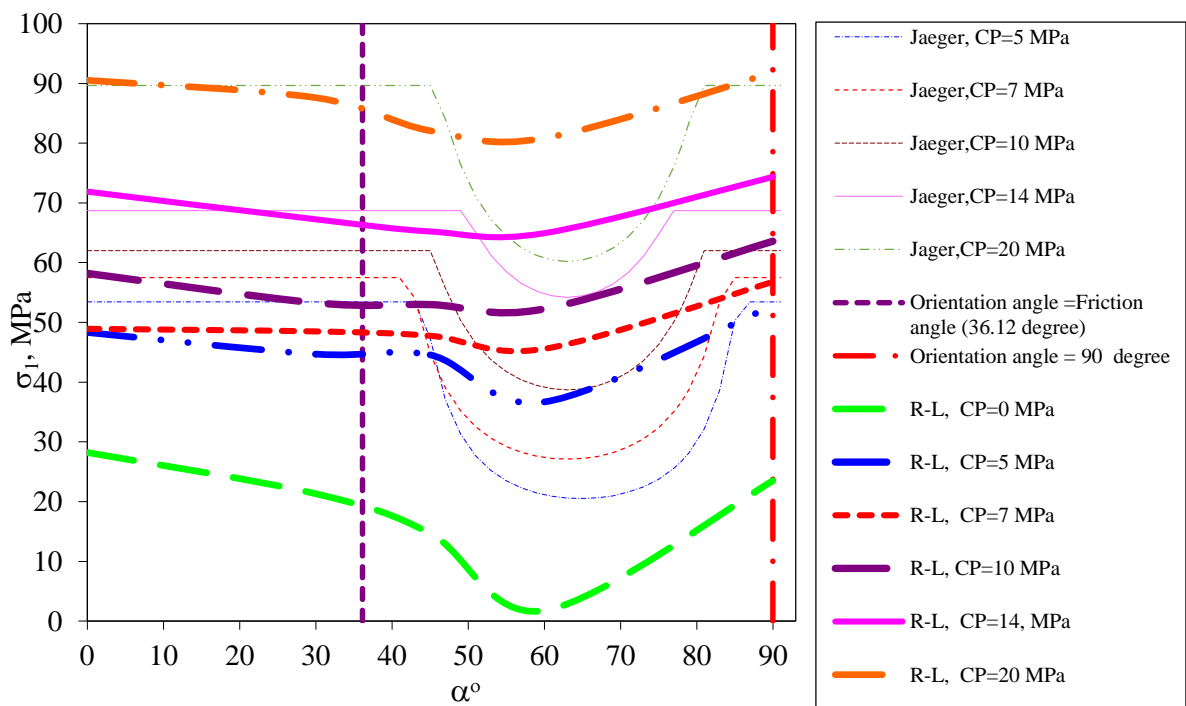
شکل ۱۱- شکست در بدنه سالم نمونه‌های دارای ناپیوستگی زبر دندان‌دار دارای زاویه صفر و ۳۰ درجه و لغزش در امتداد ناپیوستگی زبر دندان‌دار دارای زاویه ۴۵ درجه تحت تنش یک محوری



شکل ۱۲- شکست در بدنه سالم نمونه‌های دارای ناپیوستگی زبر موج‌دار دارای زاویه شیب صفر و ۳۰ درجه و لغزش در امتداد ناپیوستگی زبر موج‌دار دارای زاویه ۴۵ درجه تحت تنش یک محوری



شکل ۱۳- مقایسه رابطه بین مقاومت محوری ( $\sigma_1$ ) و زاویه شیب ( $\alpha$ ) برای ناپیوستگی دنداندار (T-M) تحت فشارهای جانبی (CP) مختلف  
نتایج اندازه‌گیری شده و تئوری جیگر



شکل ۱۴- مقایسه رابطه بین مقاومت محوری ( $\sigma_1$ ) و زاویه شیب ( $\alpha$ ) برای ناپیوستگی زبر موجدار (R-L) تحت فشارهای جانبی (CP) مختلف  
نتایج اندازه‌گیری شده و تئوری جیگر

## ۲-۳- ضریب مقاومت محوری حداکثر به مقاومت محوری

(حداقل سنگ  $R_{\text{triax}} = \sigma_{1\text{max}} / \sigma_{1\text{min}}$ )

و رابطه بین  $R_{\text{triax}}$  و  $\sigma_3$  برای ترکیب نتایج سه نوع زبری از رابطه ۲ به دست می‌آید (شکل ۱۶).

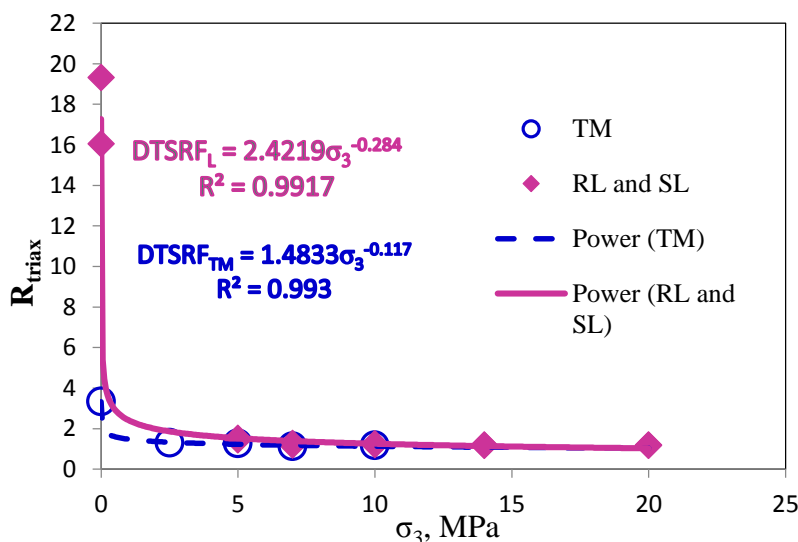
$$R_{\text{triax}} = 2.0329\sigma_3^{-0.229} \quad (2)$$

ضریب  $R_{\text{triax}}$  دارای حداکثر مقدار برای فشار جانبی صفر است و مقدار آن به صورت تابع توانی منفی ابتدا با افزایش فشار جانبی ( $\sigma_3$ ) به شدت کاهش یافته است سپس به مقدار ثابتی نزدیک می‌شود (شکل ۱۵ و ۱۶). بدین معنی که تأثیر زبری و شیب در مقاومت محوری تحت تنش‌های زیاد بسیار ناچیز است. با وجود اینکه پراکندگی نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه محوری، همبستگی خوبی بین ضریب  $R_{\text{triax}}$  و فشار جانبی ( $\sigma_3$ ) وجود دارد. همچنین ضریب  $R_{\text{triax}}$  همبستگی خوبی با تفاضل مقاومت محوری حداقل با فشار جانبی ( $\sigma_3 - \sigma_{1\text{min}}$ ) نشان می‌دهد (شکل ۱۷). رابطه بین  $R_{\text{triax}}$  و  $(\sigma_3 - \sigma_{1\text{min}})$  برای ترکیب نتایج سه نوع زبری از رابطه ۳ به دست می‌آید (شکل ۱۸).

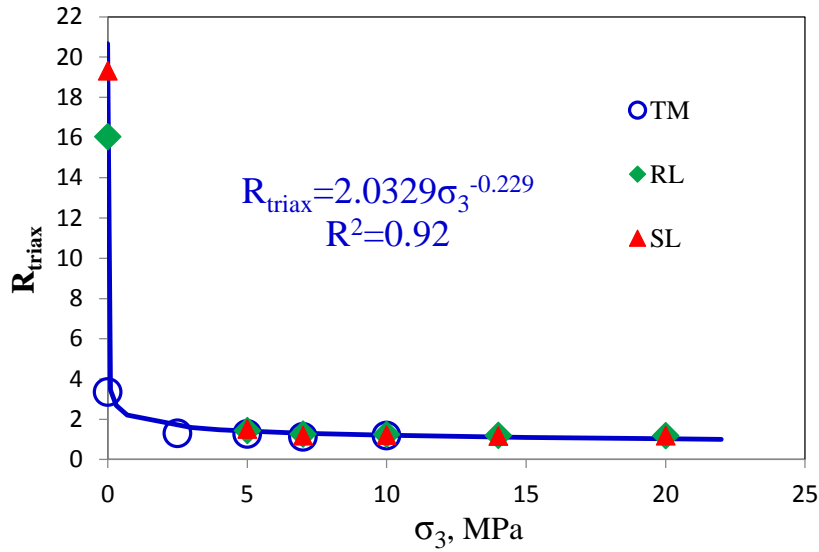
$$R_{\text{triax}} = 13.468(\sigma_{1\text{min}} - \sigma_3)^{-0.663} \quad (3)$$

با استفاده از نسبت مقاومت محوری حداکثر به مقاومت محوری حداقل سنگ ( $R_{\text{triax}}$ ) ارایه شده، تأثیر ترکیب عوامل شیب، زبری و فشاری جانبی در میزان حداکثر تغییرات نسبت مقاوت محوری بهتر مشخص می‌شود.

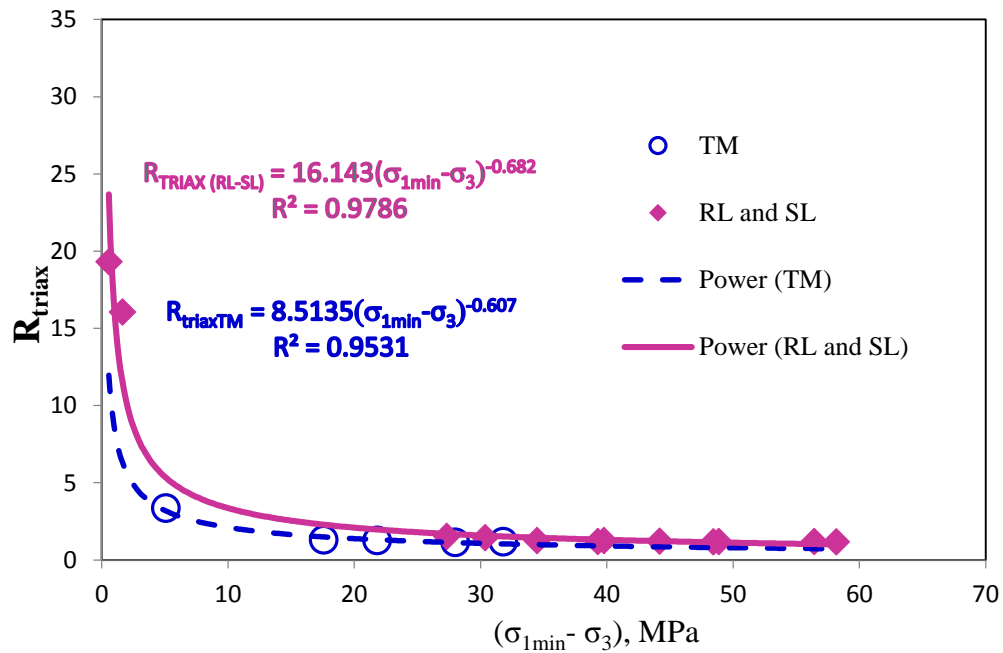
ضریب ناهمسانگردی ( $R$ ) تحت تنش یک محوری به صورت نسبت مقاومت فشاری یک محوری حداکثر ( $\sigma_{\text{cmax}}$ ) به مقاومت فشاری یک محوری حداقل ( $\sigma_{\text{cmin}}$ ) تعریف شده است [۲۳، ۲۴، ۲۵]. با افزایش فشار جانبی نسبت مقاومت محوری حداکثر ( $\sigma_{1\text{max}}$ ) به مقاومت محوری حداقل ( $\sigma_{1\text{min}}$ ) می‌تواند تغییر کند. تأثیر شیب در مقاومت با افزایش فشار جانبی کاهش یافته طوری در فشارهای جانبی زیاد، مقاومت نمونه‌های دارای ناپیوستگی با زبری مختلف به مقاومت سنگ سالم نزدیک می‌شود. مقاومت محوری حداکثر ( $\sigma_{1\text{max}}$ ) معمولاً در زاویه شیب صفر یا ۹۰ درجه و مقاومت محوری حداقل ( $\sigma_{1\text{min}}$ ) در زاویه شیب برابر  $\pi/4 + \phi_d$  درجه (نزدیک به ۶۰ درجه) اتفاق می‌افتد. برای نشان دادن میزان تغییرات نسبت مقاومت محوری حداکثر ( $\sigma_{1\text{max}}$ ) به مقاومت محوری حداقل ( $\sigma_{1\text{min}}$ ) در رابطه با شیب ناپیوستگی‌ها و تغییرات افزایش فشار جانبی ( $\sigma_3$ )، ضریبی به صورت نسبت مقاومت محوری حداکثر به مقاومت محوری حداقل سنگ ( $R_{\text{triax}} = \sigma_{1\text{max}} / \sigma_{1\text{min}}$ ) تعریف شد. رابطه بین ضریب  $R_{\text{triax}}$  و فشار جانبی ( $\sigma_3$ ) برای نمونه‌های دارای ناپیوستگی‌های صفحه‌ای صاف و زبر موجدار حاصل از سنگ آهک و ناپیوستگی‌های دنداندار حاصل از ماده مدل در شکل ۱۵ نشان داده شده است



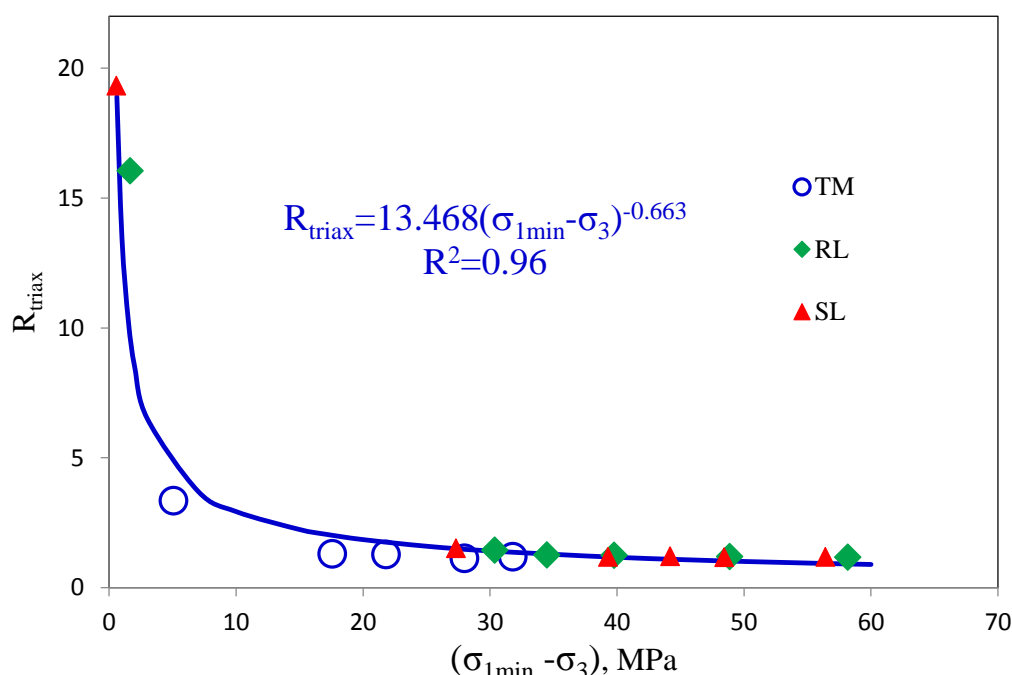
شکل ۵- رابطه بین ضریب  $R_{\text{triax}}$  و فشار جانبی ( $\sigma_3$ ) برای دو گروه ناپیوستگی‌های صفحه‌ای صاف (SL) و زبر موجدار (RL) از سنگ آهک و ناپیوستگی‌های دنداندار از ماده مدل (TM)



شکل ۱۶- رابطه بین ضریب  $R_{triax}$  و فشار جانبی ( $3\sigma$ ) برای ترکیب نتایج سه گروه ناپیوستگی‌های دندانه‌دار از ماده مدل (TM)، زبر موجدار از سنگ آهک (RL) و صفحه‌ای صاف از سنگ آهک (SL)



شکل ۱۷- رابطه بین ضریب  $R_{triax}$  و تفاضل مقاومت محوری حداقل با فشار جانبی ( $3\sigma_1 - \sigma_3$ ) برای دو گروه ناپیوستگی‌های صفحه‌ای صاف و زبر موجدار از سنگ آهک (RL and SL) و ناپیوستگی‌های دندانه‌دار از ماده مدل (TM)



شکل ۱۸- رابطه بین ضریب  $R_{triax}$  و تفاضل مقاومت محوری حداقل با فشار جانبی  $(\sigma_{1min} - \sigma_3)$  برای ترکیب نتایج سه گروه ناپیوستگی‌های دنداندار از ماده مدل (TM)، زبر موجدار از سنگ آهک (RL) و صفحه‌ای صاف از سنگ آهک (SL)

مقدار ثابتی نزدیک می‌شود. بدین معنی که تأثیر زبری و زاویه شیب ناپیوستگی تحت تنش‌های بالا در مقاومت محوری بسیار ناچیز است.

- سازه‌های سنگی سطحی مانند پله و دیواره معادن روباز و سازه‌های زیرزمینی مانند تونل تحت تنش‌های جانبی کمی قرار می‌گیرند. در چنین سازه‌هایی ناپیوستگی‌ها تأثیر مخربی در ناپایداری آن‌ها دارند.

#### منابع و مراجع

[1] Sivanathan Thirukumaran, S. and Indraratn, B. 2016, "A review of shear strength models for rock joints subjected to constant normal stiffness", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol.8 pp. 405-414.

[2] Zhang, G., Karakus, M., Tang, H., Ge, Y., Zhang, L. 2014, "A new method estimating the 2D Joint Roughness Coefficient for discontinuity surfaces in rock masses", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 72, pp. 191-198.

[3] Jafary, M.N., Amini Hosseini, K., Pellet, F., Boulon, M. And Buzzi, O. 2003, "Evaluation of shear strength of rock joints subjected to cyclic loading", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 23, pp. 619-630.

#### ۴- نتیجه‌گیری

- در نمونه‌های دارای ناپیوستگی‌های با شیب صفر و ۹۰ درجه برای سه نوع زبری، شکست در سنگ سالم اتفاق افتاد اما برای نمونه‌های دارای ناپیوستگی‌های زبر موجدار و دنداندار، در شیب ۳۰ درجه نیز شکست در سنگ سالم اتفاق افتاد. همچنین برای نمونه‌های دارای ناپیوستگی‌های دنداندار در جهت یافتگی‌های ۴۵ درجه به ویژه با افزایش فشار جانبی نیز شکست در سنگ سالم اتفاق افتاد.

- در نمونه‌های دارای ناپیوستگی‌های دنداندار در شیب ۶۰ درجه تحت تنش یک محوری، لغزش در یک طرف سطوح دندانها اتفاق افتاد و باعث جابه‌جایی دو صفحه کلی ناپیوستگی شد اما با افزایش فشار جانبی دندانها شکسته شد.

- نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فشار جانبی تأثیر زاویه شیب ناپیوستگی کاهش یافته است و شدت کاهش با افزایش زبری بیشتر می‌شود، به طوری که مقاومت سنگ درزه‌دار با زبری بالا تحت فشارهای جانبی بالا به مقاومت سنگ سالم نزدیک می‌شود.

- نسبت مقاومت محوری حداکثر به مقاومت محوری حداقل سنگ  $(R_{triax} = \sigma_{1max} / \sigma_{1min})$  دارای حداکثر مقدار برای فشار جانبی صفر است و مقدار آن به صورت تابع توانی منفی ابتدا با افزایش فشار جانبی  $(\sigma_3)$  به شدت کاهش یافته است سپس به

- Comprehensive Rock Engg., Pergamon Press, U.K. Vol. 1, pp. 313 – 329.
- [14] Arora, V.K. 1987, “*Strength and deformational behaviour of jointed rocks*”. Ph.D thesis Indian Institute of Technology, Delhi, India.
- [15] Ramamurthy, T. 1993, “*Strength and modulus responses of anisotropic rocks*”, In: Hudson JA, editor. Comprehensive rock engineering, Vol. 1. Fundamentals. Oxford: Pergamon Press, pp. 313–329.
- [16] Zhang, L. 2006, “*Engineering Properties of Rocks*”, Elsevier, 290 Pages.
- [17] Ramamurthy, T. 2008, “*Joint factor concept in solving rock engineering problem*”, In: proceedings of the 5th Asian Rock Mechanics Symposium, November 24-26, Tehran, pp. 147-148.
- [18] Sinha, U.N., Singh, B. 2000, “*Testing of rock joints filled with gouge using a triaxial apparatus*”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37, pp. 961- 981.
- [19] Stimpson, B. 1970, “*Modelling materials for engineering rock mechanics*”, International journal of rock Mechanics and mining sciences, 7, pp. 71-121.
- [20] Saucier, K. L. 1967, “*Development of material for modelling rock*”, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station (Viskburg Mississippi). Miscellaneous Paper, No. 6-93, October.
- [21] Hobbs, D. W., 1966, “*Scale model studies of strata movement around mine roadways*”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.3, pp.101-127.
- [22] Rosenblad, J. L., 1968, “*Development of rock like material*”, Tenth U.S. Symposium on Rock Mechanics, pp. 331-361.
- [23] Indraratna, B. 1990, “*Development and application of synthetic material to simulate soft sedimentary rocks*”, Geotechnique. 40:(2), pp. 189-200.
- [24] Gu, Dazhao and Mostyn, G. R. 1991, “*The study of a method of making equivalent material models*”, School of Civil Engineering, The University of New South.
- [4] Saneie, M., Rahmati, A., Dehghani, B., Faramarzi, L. and Bagherpour, R, 2013, “*Optimal selection criteria for estimate shear strength of roughened joint surfaces in hard rock andezit*”, Journal of Applied Geology, 9(2), pp. 111-121.
- [5] Jiang, Y., Lib, B., Tanabashia, Y. 2006, “*Estimating the relation between surface roughness and mechanical properties of rock joints*”, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 43, pp. 837–846.
- [6] Zhang, G., Karakus, M., Tang, H., Ge, Y., Zhang, L. 2014, “*A new method estimating the 2D Joint Roughness Coefficient for discontinuity surfaces in rock masses*”, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 72, pp. 191-198.
- [7] Barton, N.R. and Bandis, S.C. 1982, “*Effects of block size on the the shear behaviour of jointed rock*”, 23rd U.S. symp. on rock mechanics, Berkeley, 739-760.
- [8] Barton, N.R., Choubey, V. 1977, “*The shear strength of rock joints in theory and practice*”, Rock Mech. Vol. 10 (1-2), pp. 1-54.
- [9] Barton, N.R. and Bandis, S.C. 1990, “*Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice*”, In Rock joints, proc. int. symp. on rock joints, Loen, Norway, (eds N. Barton and O. Stephansson), 603-610. Rotterdam: Balkema.
- [10] Azizian, F., Ghazvinian, A. and Mahmoud, B., 2014, “*Prediction of peak strength of transversely isotropic rocks by using distinct element method*”, Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining and Engineering, Vol. 4, No. 7, pp. 9-16.
- [11] Amit K.V. and Singh, T.N. 2010, “*Modeling of a jointed rock mass under triaxial conditions*”, Arab J Geosci., 3, pp. 91 - 103.
- [12] Park, P. and Min, K.B. 2015, “*Bonded particle discrete element modeling of mechanical behavior of transversely isotropic rock*”, International journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 76, pp. 243–255.
- [13] Ramamurthy, T. 1993, “*Strength and modulus responses of anisotropic rocks*”. Chpt. 13,



[25] Vutukuri, V.S., Moomivand, H. 1996, "Development of a brittle rock-like material having different values of porosity, density and strength" EUROCK '96, Proc. ISRM International Symposium on Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering, Torino, Italy, 2 - 5 September, pp. 213 - 220.

[26] Moomivand, H. 2000, "Physical modelling of rock: Fifth International Conference on Civil Engineering", Volume 1, Geotechnical Engineering. Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, pp. 45 - 52.

[27] ISRM. 1981, "Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials", In: Brown E.T., editor. Rock characterization, testing and monitoring ISRM suggested methods. Oxford: Pergamon Press, pp. 113.

[28] ISRM. 1983, "Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression: Revised version", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, Vol. 20, pp. 283 - 290.

[29] Aminpour, F. 2016, "An investigation into effect of joints roughness on the strength of rock under triaxial stresses", MSc Thesis, Urmia University.

[30] Jaeger, J. C. 1960, "Shear failure of anisotropic rock", Geol. Mag., 1, pp. 65 - 7.