

بررسی تأثیر زبری سطح ناپیوستگی بر مقاومت نمونه‌های سنگی درزه‌دار

ابوالفضل رضایی پور^۱، حمیدرضا نجاتی*^۱، عبدالهادی قزوینیان^۱، میر رئوف هادئی^۲

پذیرش مقاله: ۹۵/۰۷/۰۷

دریافت مقاله: ۹۳/۱۱/۱۲

چکیده

ناپیوستگی‌ها یکی از مهمترین عواملی هستند که باعث ایجاد آنیزوتروپی مکانیکی در سنگ شده و سبب کاهش مقاومت سنگ می‌گردند، در نتیجه جهت توصیف رفتار سنگ باید خواص مربوط به ناپیوستگی‌ها و میزان تأثیری که بر روی مقاومت سنگ می‌گذارند مورد توجه و بررسی قرار گیرد. از جمله مهمترین خواص ناپیوستگی‌ها که بر روی مقاومت نمونه‌ی آنیزوتروپ اثر می‌گذارد، زبری سطح ناپیوستگی‌هاست. از طرفی با توجه به اینکه در طبیعت سنگ‌ها تحت فشار جانبی قرار دارند، بنابراین بهتر است رفتار سنگ‌های درزه‌دار تحت شرایط محصور شده مورد بررسی قرار بگیرد. در تحقیق حاضر به منظور بررسی تأثیر زبری سطح درزه بر روی مقاومت سنگ، از نمونه‌های مصنوعی ساخته شده از ترکیب گچ و سیمان استفاده شده است. نمونه‌های مصنوعی در چهار سطح زبری و در هفت زاویه‌ی شیب ناپیوستگی نسبت به تنش اصلی حداکثر تهیه شدند، و در پنج فشار جانبی ۰/۵، ۱/۵، ۲، ۳/۵ و ۵ مگاپاسکال تحت آزمایش مقاومت فشاری سه محوری قرار گرفتند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد با افزایش زبری سطح ناپیوستگی، مقاومت سنگ‌های آنیزوتروپ افزایش می‌یابد، که این افزایش مقاومت هنگامی که زاویه‌ی ناپیوستگی با تنش اصلی حداکثر بین ۲۵° تا ۵۰° باشد بیشتر از بخش‌های دیگر است. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین مقاومت سنگ آنیزوتروپ در یکی از زوایای ۰ و یا ۹۰ درجه اتفاق می‌افتد که این زاویه برای مقادیر مختلف JRC متفاوت است.

کلید واژه‌ها: آنیزوتروپی، زبری سطح ناپیوستگی، زاویه‌ی ناپیوستگی، فشار محصور کننده.

۱. گروه مهندسی مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس h.nejati@modares.ac.ir

۲. گروه مهندسی مکانیک سنگ، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی قزوین

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

توده‌های سنگی شامل ترک‌ها، ریزترک‌ها درزه‌ها و شکستگی‌ها می‌باشند. این نواقص بر روی مقاومت سنگ اثر می‌گذارند و مقاومت آن را کنترل می‌کنند. جدا از تعداد ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ جهت یافتگی آنها نسبت به محور بارگذاری و همچنین ویژگی‌های آنها مانند زبری سطح ناپیوستگی نقش مهمی در مقاومت سنگ دارد و هنگام طراحی سازه‌های سنگی باید مورد توجه قرار گیرد. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه‌ی بررسی تأثیر جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها بر روی مقاومت سنگ انجام شده است اما در بیشتر آنها تأثیر زبری سطح ناپیوستگی در نظر گرفته نشده است و مطالعات بر روی درزه‌ی صاف انجام شده است. از آن جمله می‌توان به مطالعات انجام شده توسط (Jaeger, 1960)، (Walsh and Brace, 1964)، (McLamore and Gray, 1967) و (Donath, 1964) و (Donath, 1972) اشاره کرد. کارهای Jaeger بر اساس تئوری ضعف منفرد توسعه یافته بود. این تئوری یک راهکار اولیه به منظور در نظر گرفتن تأثیر ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ بر روی مقاومت سنگ فراهم می‌کرد. Gray و McLamore به منظور توصیف رفتار سنگ‌های انیزوتروپ طبیعی مانند اسلیت تئوری Jaeger را اصلاح کردند. آنها بر اساس منطق تئوری Jaeger یک معادله‌ی تجربی پیشنهاد کردند. به منظور نشان دادن کاربرد معادله تجربی McLamore و Gray، (Donath, 1964) یک سری آزمایش بر روی اسلیت مارتینسبورگ (Martinsburg slate) انجام داد.

Bray (1967) تأثیر چند دسته ناپیوستگی یکسان را بر روی مقاومت سنگ بررسی کرد. او منحنی مقاومتی (مقاومت توده‌سنگ در مقابل زاویه‌ی ناپیوستگی) پیشنهاد کرد که با آنچه که توسط (McLamore and Gray, 1967) براساس نتایج آزمایش بر روی اسلیت پیشنهاد شد متفاوت بود. بررسی‌های Bray نشان داد، هنگامی که تعداد ناپیوستگی‌های توده‌سنگ افزایش می‌یابد مقاومت آن به سمت ایزوتروپ شدن میل می‌کند.

بررسی‌های زیادی به منظور بررسی تغییرات مقاومت و رفتار شکل‌پذیری، بر روی توده‌های درزه‌دار ساخته شده، سنگ‌های درزه‌دار و سنگ‌های متورق انجام شده است، که از آن جمله می‌توان به مطالعات (Hayashi, 1966)، (Brown, 1970)، (Hirschfeld Einstein and Ladanyi and Archambault, 1972)، (Reik and Zacas, 1973)، (Lama and Vutukuri, 1978)، (1978) اشاره کرد که به بررسی تأثیر دسته درزه‌ها و جهت‌یافتگی آنها بر روی مقاومت سنگ پرداختند. (Chenevert, 1965) and Gatlin (1965)، (Attewell and Sandford, 1974) و (Brown et al., 1970) مطالعات خود را بر روی اسلیت و شیل متمرکز کردند. (Deklotz et al., 1966)، (Akai et al., 1970)، (Martin McCabe and Koerner, 1975)، (Behrestaghi et al., 1997)، (Nasseri et al., 1997) و (Singh et al., 2001) بر روی گنیس و شیست و (Ramamurthy et al., 1988) بر روی فیلیت تحقیقات خود را انجام دادند. همچنین (Rao et al., 1986)، تحقیقات خود را بر روی ماسه سنگ متمرکز کردند. (Pomeroy et al., 1971) تأثیر ناپیوستگی بر روی مقاومت سنگ را در نمونه‌های ذغال سنگ بررسی کردند و (Allirot and Boehler, 1979) بررسی‌های خود را بر روی دیاتومیت انجام دادند. Tien and Tsao (2000) بررسی‌های خود را بر روی نمونه‌های مصنوعی انجام دادند. (Ghazvinian and Hadei, 2012) تأثیر جهت‌داری ناپیوستگی‌ها و فشار محصور کننده را بر روی مقاومت سنگ انیزوتروپ بررسی کردند. بررسی کلی کارهای آنها نشان می‌دهد که بیشترین مقاومت سنگ در یکی از زوایای $\beta = 0^\circ$ یا $\beta = 90^\circ$ اتفاق می‌افتد، که در آن β زاویه‌ی بین ناپیوستگی و تنش اصلی حداکثر است و کمترین مقاومت در اطراف زاویه‌ی $\beta = 30^\circ$ اتفاق می‌افتد.

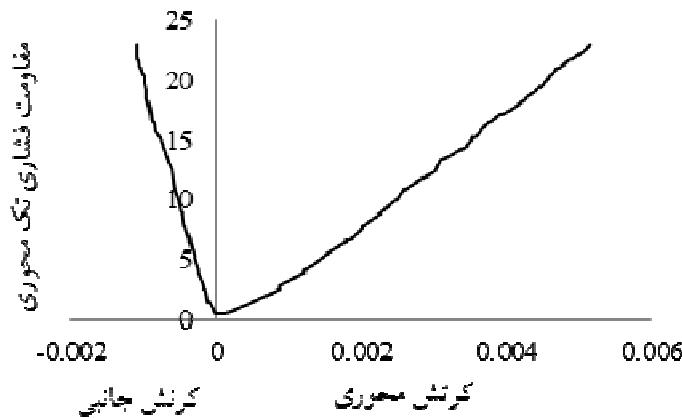
در این تحقیق مطالعات گسترده‌ای در زمینه‌ی بررسی تأثیر زبری سطح ناپیوستگی بر روی مقاومت سنگ تحت در فشارهای جانبی مختلف انجام شده است. برای دستیابی به این هدف نمونه‌های مصنوعی در چهار سطح زبری با استفاده از ترکیب گچ و سیمان ساخته شده است و تحت آزمایش مقاومت فشاری سه محوری قرار گرفته است. استفاده از

به منظور تهیه‌ی نمونه‌های آزمایش از مخلوط گچ و سیمان استفاده شده است. مخلوط مورد استفاده شامل ۵۰٪ وزنی گچ عبوری از الک ۳۰ مش ۱۸٪ درصد وزنی سیمان و ۳۲٪ آب می‌باشد. مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها با استفاده از استاندارد ISRM در آزمایشگاه تعیین شده است. شکل (۱) یک نمونه از منحنی تنش کرنش بدست آمده از آزمایش بر روی نمونه‌های بکر را نشان می‌دهد. در جدول (۱) مشخصات نمونه‌های مورد آزمایش بیان شده است.

نمونه‌های مصنوعی این امکان را فراهم کرد که تأثیر هر یک از پارامترها با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها مورد بررسی قرار گیرد. پس از انجام آزمایش‌ها نمودارهای مقاومت فشاری سه‌محوری نسبت به زاویه‌ی بین ناپیوستگی و تنش اصلی حداکثر رسم گردید و بر اساس نتایج آنها تأثیر زبری سطح ناپیوستگی بر روی مقاومت سنگ مورد بررسی قرار گرفت.

۲. مشخصات تحقیق

۱-۲. مشخصات مواد مورد استفاده جهت ساخت نمونه‌ها



شکل ۱. نمونه‌ای از نمودار تنش - کرنش برای نمونه‌های بکر آزمایش شده

جدول ۱. پارامترهای مکانیکی سنگ بکر

ویژگی	σ_c (MPa)	E (GPa)	ρ (gr/cm ³)	ν
مقدار	۲۳/۰۹	۴/۳۹	۱/۸	۰/۲۲

نمونه‌های بکر انجام شد که در جدول (۲) مقدار مقاومت حداکثر (σ_1) برای فشارهای جانبی مختلف آورده شده است.

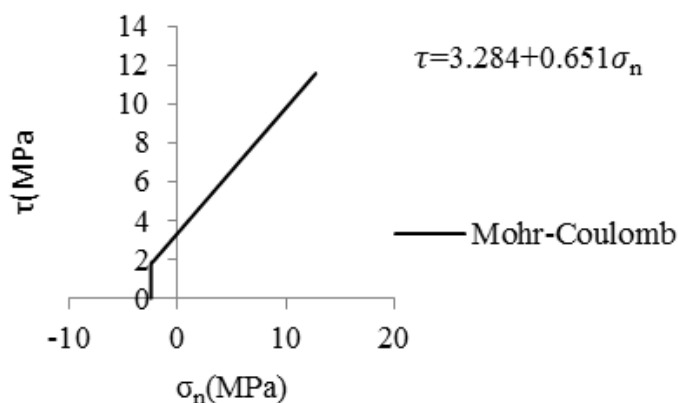
اضافه بر آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، یک سری آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوری نیز تحت فشارهای جانبی مختلف (۰/۵، ۱/۵، ۲، ۳/۵ و ۵ مگاپاسکال) بر روی

جدول ۲. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوری بر روی نمونه‌های بکر

σ_r (MPa)	۰/۵	۱/۵	۲	۳/۵	۵
σ_c (MPa)	۲۳/۲۴	۲۷/۴۷	۲۸/۳۳	۳۱/۹۹	۳۶/۳۵

اصکاک داخلی (ϕ) برای نمونه‌های بکر برابر با $C=۳/۲۹$ MPa و $\phi=۳۳/۰۷^\circ$ می‌باشد.

نتایج به منظور به دست آوردن پوش موهر- کولمب مورد استفاده قرار گرفت که در شکل (۲) نشان داده شده است. بر اساس معیار موهر- کولمب مقادیر چسبندگی (C) و زاویه‌ی



شکل ۲. پوش موهر- کولمب به دست آمده حاصل از آزمایش مقاومت فشاری سه محوری بر روی نمونه های بکر

۲-۲. روش ساخت نمونه ها

به منظور ساخت نمونه ها از یک سری قالب پلکسی گلاس استفاده شد. قالب های مورد استفاده دارای ابعاد $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 15\text{cm}$ می باشند که در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳. قالب پلکسی گلاس مورد استفاده جهت ساخت نمونه ها

پس از ساخت قالب پلکسی گلاس، به منظور ساخت نمونه های درزه دار زبر از پروفیل های استاندارد (Barton and Choubey (1977) استفاده شده است. نحوه استفاده از این پروفیل ها بدین صورت است که ابتدا پروفیل های مورد نیاز، با توجه به زبری آنها انتخاب، و سپس بر روی پلاستیک فشرده ساخته شد. با توجه به اینکه برای ساخت نمونه های مورد نیاز، پروفیل ها به صورت نرگی و مادگی مورد نیاز بود، قسمت دوم هریک از پروفیل ها نیز به

همین صورت ساخته شد. در شکل (۴) یک نمونه از این پروفیل ها نشان داده شده است. نحوه تهیه نمونه ها بدین صورت است که ابتدا هر یک از قسمت های پروفیل نشان داده شده در شکل (۴) در داخل قالب نشان داده شده در شکل (۳) قرار می گیرد و سپس ملات گچ و سیمان بر روی آن ریخته می شود. با این کار یک طرف هر پروفیل که یک بلوک با یک سطح زبر و به ابعاد $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 15\text{cm}$ می باشد ساخته می شود. در شکل (۵) نمونه ای از بلوک زبر ساخته شده با استفاده از پروفیل بارتن- چوبی نشان داده شده است.



شکل ۴. یک جفت از پروفیل های زبر ساخته شده بر روی پلاستیک فشرده

به منظور ایجاد یک درزه ی زبر، طرف دوم هر پروفیل در قالب قرار داده می شود و مانند حالت قبل یک بلوک دیگر که مکمل بلوک اول است ساخته می شود. پس از این که بلوک ها

در مرحله‌ی بعد، سر و ته مغزه‌های تهیه شده صیقل داده شد، تا نمونه‌های مناسب جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری سه محوری تهیه گردد. در شکل (۶) روند تهیه نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش نشان داده شده است.

در شکل (۸) یک سری نمونه که سر و ته آنها صیقل داده شده است، در زوایای مختلف اینزوتروپی نشان داده شده است. پروفیل‌ها به گونه‌ای انتخاب شدند که سطوح مختلف زبری ($JRC=0$) برای ناپیوستگی با سطح صیقلی و $JRC=17$ برای ناپیوستگی با درجه زبری بالا را شامل شوند.

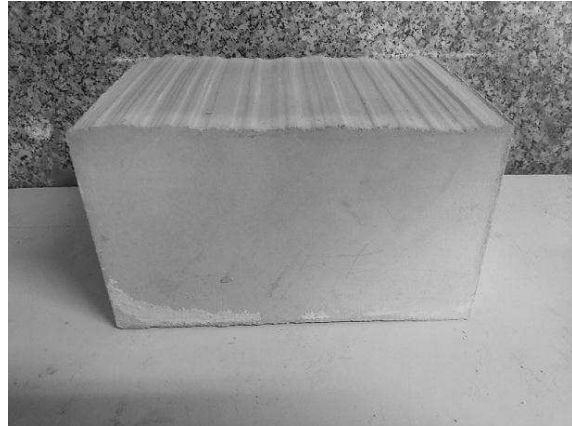
با توجه با اینکه در جهت‌داری‌های مختلف ناپیوستگی نسبت به محور تنش اصلی حداکثر، طول ناپیوستگی متفاوت است لذا باید پروفیل‌ها به گونه‌ای انتخاب شود که مقدار JRC برای یک سری از نمونه‌های مربوط به هر آزمایش (۳۵) نمونه‌ای که برای ۵ فشار جانبی مختلف نیاز است) ثابت بماند. بدین منظور از رابطه‌ی زیر که توسط بارتن- چوبی (Barton and Chouby (1977) ارائه شده، استفاده شده است:

$$JRC_n = JRC \cdot \left(\frac{L_n}{L} \right)^{-0.7JRC} \quad (1)$$

که در آن JRC_0 و L_0 زبری و طول درزه با اندازه ۱۰cm و JRC_n و L_n زبری و طول در بلوک‌های برجا می‌باشد. نکته‌ی دیگر که باید به آن توجه کرد این است که با توجه به اینکه پروفیل‌های استاندارد بارتن- چوبی برای یک ناپیوستگی به طول ۱۰cm می‌باشد، لذا امکان تهیه‌ی مغزه‌های استاندارد نمی‌باشد. بنابراین با استفاده از رابطه‌ی بارتن- بندیس ابتدا باید زبری برای یک درزه‌ی بزرگتر (با توجه به طول مغزه‌ی مورد نیاز) محاسبه گردد، و سپس بر اساس آن پروفیل‌ها انتخاب گردد. اگر ۱۰ پروفیل بارتن- چوبی در ۱۰ کلاس تقسیم‌بندی شود، مقدار JRC برای هر کلاس در مقیاس ۱۵cm در جدول (۳) آورده شده است. در زیر فرآیند محاسبه‌ی زبری برای حالت $JRC=17$ توضیح داده شده است.

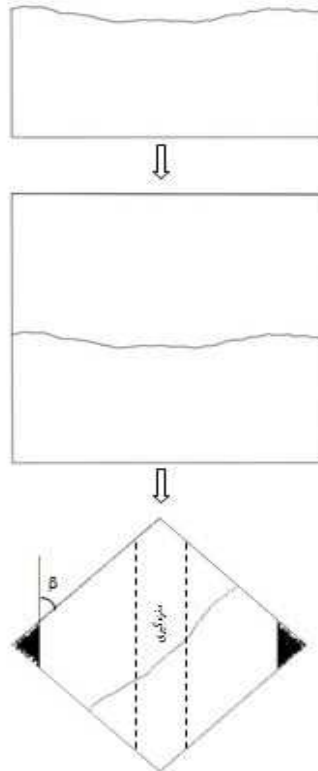
طول مغزه‌ها برای محاسبه‌ی JRC (L_n) بنابر استاندارد ISRM (نسبت طول به قطر به ۲ به ۳ برای آزمایش سه محوری) برابر با ۱۱cm در نظر گرفته شده است. بنابراین مقدار JRC

تهیه شد باید از این بلوک‌ها مغزه‌گیری شود تا نمونه‌های مناسب جهت انجام آزمایش سه محوری به دست آید. به این منظور بلوک‌های تهیه شده، در زوایای مختلف نسبت به محور بارگذاری (۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه) برش داده شد و سپس مغزه‌گیری از هر بلوک انجام شد. قطر مغزه‌های تهیه شده ۵۴mm است.

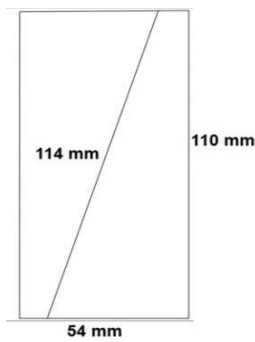


شکل ۵. نمونه‌ای از یک بلوک با سطح زبر، ساخته شده با

استفاده از پروفیل بارتن- چوبی



شکل ۶. فرآیند تهیه نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش



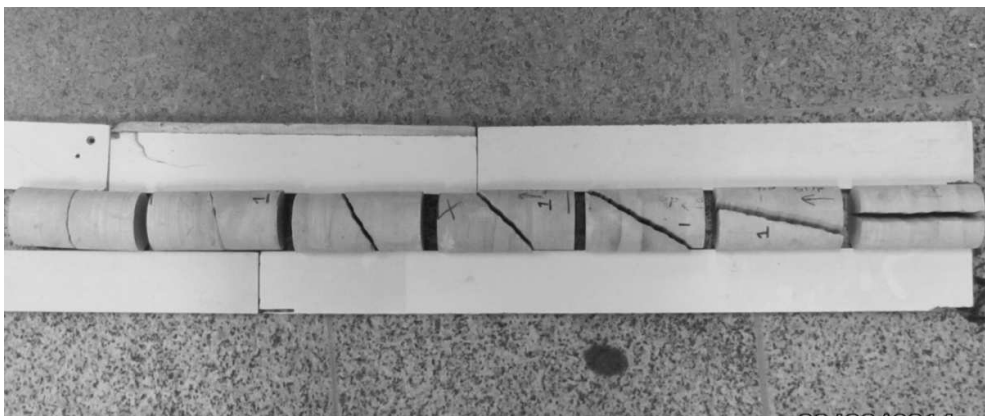
شکل ۷. شماتیکی از یک مغزه‌ی تهیه شده با زاویه‌ی ناپیوستگی 15°

$$L_n = 11/4 \text{ cm}, L = 15 \text{ cm}, JRC_n = 17$$

$$JRC_n = JRC \cdot \left(\frac{L_n}{L} \right)^{0.7 JRC} \rightarrow 17 = JRC \cdot \left(\frac{11}{15} \right)^{0.7 JRC}$$

$$\rightarrow \ln \left(\frac{17}{JRC} \right) = 0.0055 JRC \rightarrow JRC = 15/6.2$$

این مقدار JRC مربوط به کلاس X از جدول (۳) می‌باشد. همین روند برای زبری‌های دیگر ($JRC=12$ و $JRC=7$) و زوایای دیگر نیز انجام می‌شود و پروفیل مربوط به هر زاویه تعیین می‌گردد.



شکل ۱. نمونه‌های صیقل داده شده در زوایای مختلف انیزوتروپی

جدول ۳. مقدار JRC برای کلاس‌های مختلف پروفیل‌های بارتن برای یک درزه به طول ۱۵cm

Class No	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
	-	۱/۹۶۸	۳/۸۷۲	۵/۷۱۵	۷/۴۹۷	۹/۲۲۱	۱۰/۸۸۷	۱۲/۴۹۷	۱۴/۰۵۳	۱۵/۵۵۵
JRC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	۱/۹۶۸	۳/۸۷۲	۵/۷۱۵	۷/۴۹۷	۹/۲۲۱	۱۰/۸۸۷	۱۲/۴۹۷	۱۴/۰۵۳	۱۵/۵۵۵	۱۷/۰۰۶

برای یک ناپیوستگی زبر در زاویه‌ی انیزوتروپی 0° درجه برابر است با:

$$L_n = 11 \text{ cm}, L = 15 \text{ cm}, JRC = 15/5$$

$$JRC_n = JRC \cdot \left(\frac{L_n}{L} \right)^{-0.7 JRC} = 15/5 \times \left(\frac{11}{15} \right)^{-0.7 \times 15/5} = 17$$

بنابراین مقدار JRC برای این حالت برابر با ۱۷ می‌باشد. دلیل انتخاب مقدار $15/5$ برای JRC_0 این است که پس از تبدیل مقیاس بیشترین مقدار JRC براساس پروفیل‌های بارتن-چوبی برای یک درزه‌ی ۱۵cm تقریباً بین ۱۵ تا ۱۷ می‌باشد. حال $JRC=17$ به عنوان مقدار ثابت در نظر گرفته می‌شود و روندی معکوس برای یافتن پروفیلی که (در مقیاس ۱۵cm) این مقدار JRC را برای زوایای مختلف به دست دهد انجام می‌شود. در زیر این روند برای زاویه‌ی 15° توضیح داده شده است.

همانطور که در شکل (۷) نشان داده شده است برای زاویه‌ی 15° طول ناپیوستگی ۱۱/۴cm می‌باشد. با توجه به اینکه مقدار JRC_n باید برابر با ۱۷ باشد لذا باید JRC_0 محاسبه شود:

۳. آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوری بر روی نمونه‌های انیزوتروپ نمونه‌های دارای ناپیوستگی با شیب مختلف و همچنین زبری سطح مختلف، تحت آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوری در فشارهای جانبی مختلف قرار گرفتند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها در جدول‌های (۴ تا ۸) آورده شده است.

جدول ۱. نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوری، σ_1 (MPa)، بر روی نمونه‌های انیزوتروپ برای حالت $\sigma_3=0/5$ MPa

JRC β'	۰	۷	۱۲	۱۷
۰	۱۹/۷۲	۲۰/۱۵	۲۱/۴۳	۲۱
۱۵	۱۴/۵۷	۱۶/۲۹	۱۸/۴۳	۱۸/۸۶
۳۰	۴/۷۲	۷/۷۲	۱۰/۷۲	۱۲/۴۳
۴۵	۷/۲۹	۱۵/۴۳	۱۷/۱۵	۱۸
۶۰	۱۵/۸۶	۱۸/۴۳	۱۹/۲۹	۲۰/۱۵
۷۵	۲۰/۵۸	۲۰/۱۵	۲۱/۴۳	۲۱/۸۲
۹۰	۱۹/۷۲	۲۱/۸۶	۱۸/۸۶	۱۹/۷۲

جدول ۲. نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوری، σ_1 (MPa)، بر روی نمونه‌های انیزوتروپ برای حالت $\sigma_3=1/5$ MPa

JRC β'	۰	۷	۱۲	۱۷
۰	۲۴/۸۶	۲۶/۱۵	۲۶/۱۵	۲۷/۰۱
۱۵	۱۸	۲۰/۵۸	۲۲/۲۹	۲۴/۰۱
۳۰	۱۰/۷۲	۱۴/۱۵	۱۶/۷۲	۱۸/۴۳
۴۵	۱۲	۲۰/۱۵	۲۱/۴۳	۲۲/۷۲
۶۰	۱۹/۲۹	۲۲/۲۹	۲۳/۵۸	۲۴/۸۶
۷۵	۲۳/۵۸	۲۴/۴۳	۲۵/۷۲	۲۶/۱۵
۹۰	۲۵/۷۲	۲۵/۲۹	۲۵/۲۹	۲۶/۵۸

جدول ۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوری، σ_1 (MPa)، بر روی نمونه‌های انیزوتروپ برای حالت $\sigma_3=2$ MPa

JRC β'	۰	۷	۱۲	۱۷
۰	۲۶/۵۸	۲۷/۰۱	۲۷/۴۳	۲۸/۲۹
۱۵	۲۱/۴۳	۲۲/۷۲	۲۴/۸۶	۲۶/۵۸
۳۰	۱۲/۸۶	۱۷/۵۸	۲۰/۱۵	۲۱/۸۶
۴۵	۱۴/۱۵	۲۱/۸۶	۲۴/۴۳	۲۵/۷۲
۶۰	۲۱/۴۳	۲۴/۴۳	۲۵/۷۲	۲۶/۵۸
۷۵	۲۵/۲۹	۲۶/۱۵	۲۶/۵۸	۲۷/۴۳
۹۰	۲۷/۴۳	۲۷/۸۶	۲۷/۷۲	۲۶/۵۸

جدول ۷. نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه محوری، σ_1 (MPa)، بر روی نمونه‌های انیزوتروپ برای حالت $\sigma_3=3/5$ MPa

JRC β^*	۰	۷	۱۲	۱۷
۰	۳۰/۴۴	۳۱/۲۹	۳۱/۲۹	۳۱/۷۲
۱۵	۲۶/۲۵	۲۸/۲۹	۳۰/۰۱	۳۰/۸۶
۳۰	۱۶/۲۹	۲۴/۴۳	۲۶/۵۸	۲۷/۸۶
۴۵	۱۸	۲۷/۸۶	۲۸/۷۲	۲۹/۵۸
۶۰	۲۵/۷۲	۲۹/۵۸	۳۰/۴۴	۳۰/۸۶
۷۵	۲۹/۵۸	۳۱/۲۹	۳۱/۲۹	۳۱/۷۲
۹۰	۳۱/۲۹	۳۱/۷۲	۳۰/۴۴	۳۰/۴۴

جدول ۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه محوری، σ_1 (MPa)، بر روی نمونه‌های انیزوتروپ برای حالت $\sigma_3=5$ MPa

JRC β^*	۰	۷	۱۲	۱۷
۰	۳۴/۲۹	۳۴/۷۲	۳۵/۵۸	۳۶/۰۱
۱۵	۳۰/۸۶	۳۳/۰۱	۳۴/۲۹	۳۴/۷۲
۳۰	۲۰/۵۸	۲۹/۵۸	۳۱/۷۲	۳۰/۴۴
۴۵	۲۴/۰۱	۳۰/۸۶	۳۳/۰۱	۳۳/۸۶
۶۰	۳۰/۰۱	۳۲/۵۸	۳۴/۲۹	۳۴/۷۲
۷۵	۳۲/۵۸	۳۴/۲۹	۳۴/۷۲	۳۵/۱۵
۹۰	۳۴/۷۲	۳۵/۱۵	۳۵/۱۵	۳۵/۵۸

هنگامی که فشار جانبی افزایش می‌یابد تفاوت میان این نمودارها آشکار می‌گردد، به گونه‌ای که در فشار جانبی ۵MPa نمودار برای نمونه‌های زبر تقریباً یک تابع ثابت است درحالی که برای نمونه‌های با سطح صاف حالت شانه‌ای دارد، که این نشان می‌دهد تأثیر زبری سطح درزه بر روی مقاومت سنگ در فشارهای جانبی بالاتر، بیشتر است. نکته‌ی دیگری که باید به آن توجه کرد کاهش فرم شانه‌ای نمودارها با افزایش زبری است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش زبری، منحنی مقاومت فشاری نسبت به زاویه‌ی ناپیوستگی به سمت بالا حرکت کرده و حالت شانه‌ای نمودارها کمتر می‌شود (طول X_i با افزایش زبری کاهش می‌یابد).

همچنین همانگونه که از نمودارها مشاهده می‌شود با افزایش زبری، نمودارها به سمت چپ منتقل شده و زاویه‌ی مربوط به کمترین مقاومت، (β_{min})، کاهش یافته است. زمانی که سطح ناپیوستگی صاف باشد کمترین مقاومت در زاویه‌ی حدود 35° اتفاق می‌افتد در صورتی که برای سطوح زبر این مقدار کاهش می‌یابد و به حدود 30° میل می‌کند. اما با افزایش فشار

۴. بررسی تأثیر زبری سطح درزه بر مقاومت سنگ در شرایط محصور شده

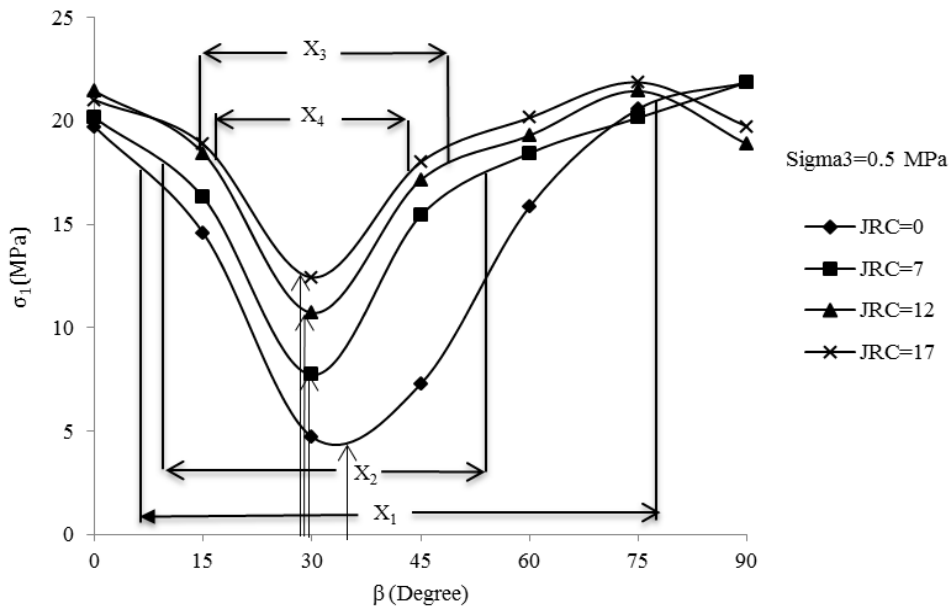
در شکل ۲ تا ۱۳ تغییرات مقاومت فشاری سه محوری نمونه‌ها (σ_1) نسبت به زاویه‌ی بین ناپیوستگی و تنش اصلی حداکثر (β) در زبری‌های مختلف برای هر یک از فشارهای محصور کننده نشان داده شده است.

همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود با افزایش زبری در هر یک از نمودارها مقاومت نمونه‌های انیزوتروپ افزایش یافته است. این افزایش مقاومت در زوایای حدود 25° تا 50° بسیار بیشتر از بخش‌های دیگر نمودار است. این شرایط برای تمام زوایای شیب به جز $\beta=90^\circ$ برقرار است. در زاویه‌ی شیب 90° هنگامی که زبری افزایش می‌یابد مقاومت نمونه کاهش می‌یابد، که دلیل این می‌تواند تمرکز تنش ایجاد شده در نوک دندانها باشد. ولی در فشارهای جانبی بالا این شرایط برقرار نیست.

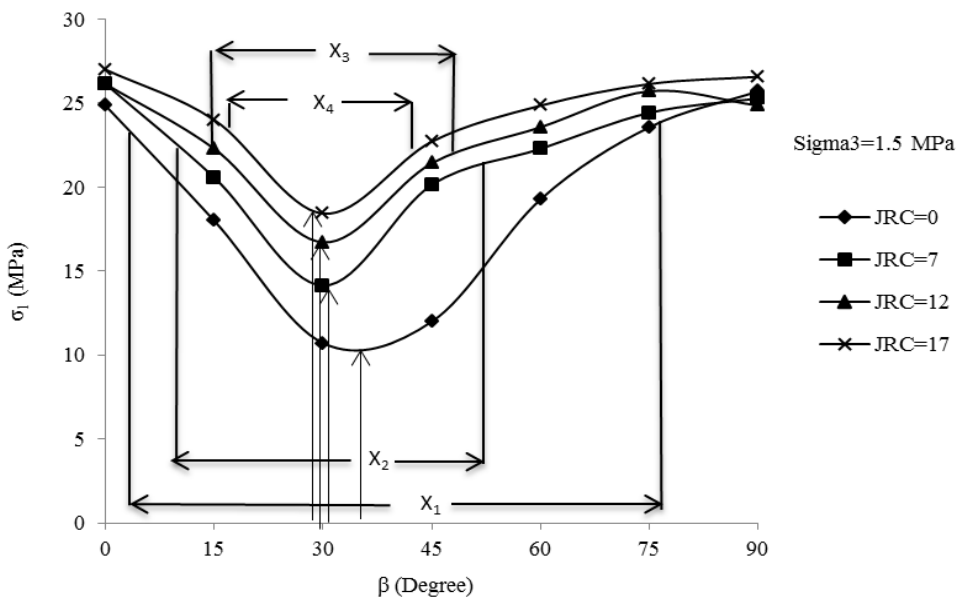
زمانی که فشار جانبی کم است نمودار مربوط به نمونه‌های دارای سطح صاف تقریباً شبیه نمونه‌های با سطح زبر است، اما

آورده شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در یک زاویه‌ی شیب مشخص با افزایش فشار جانبی میزان قفل شدگی ایجاد شده در دندانه‌ها و در نتیجه مقاومت نمونه افزایش یافته است. چرا که در فشارهای جانبی کم امکان لغزش سطوح روی یکدیگر بیشتر است و در حالتی که لغزش روس سطح اتفاق بیفتد مقاومت نمونه نسبت به حالتی که سطوح حالت درگیر داشته باشند کاهش می‌یابد.

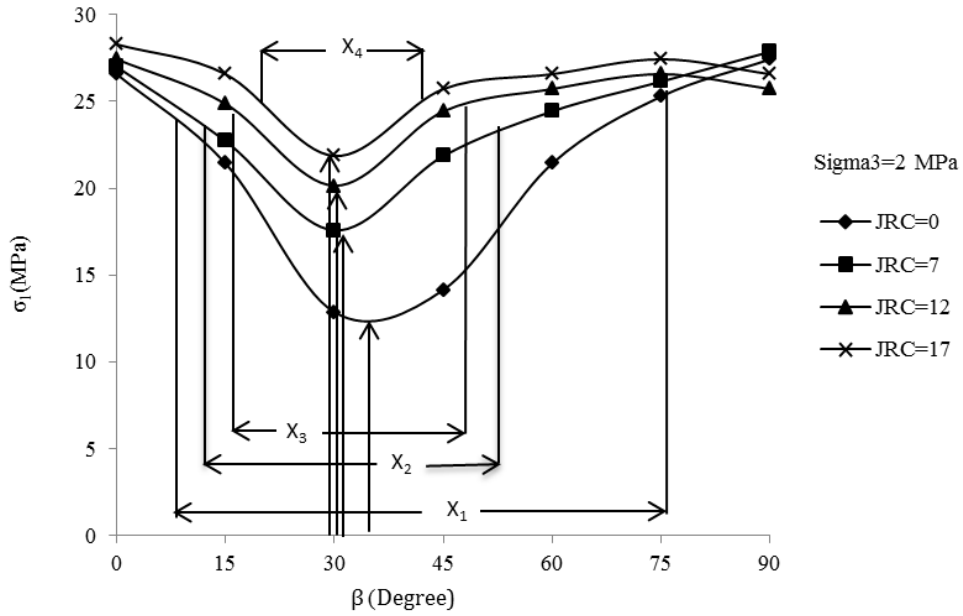
جانبی این اختلاف کمتر می‌شود. دلیل این رفتار را می‌توان به این صورت بیان کرد که هنگامی که فشار جانبی افزایش می‌یابد تأثیر زبری سطح ناپیوستگی بر روی مقاومت نمونه کم می‌شود و رفتار نمونه به سمت ایزوتروپ شدن میل می‌کند. در شکل ۷ تغییرات β_{min} نسبت به JRC نشان داده شده است. در شکل ۸ تصاویر مربوط به ۴ در نمونه در زاویه‌ی شیب ۴۵ درجه و در $JRC=7$ برای فشارهای جانبی مختلف



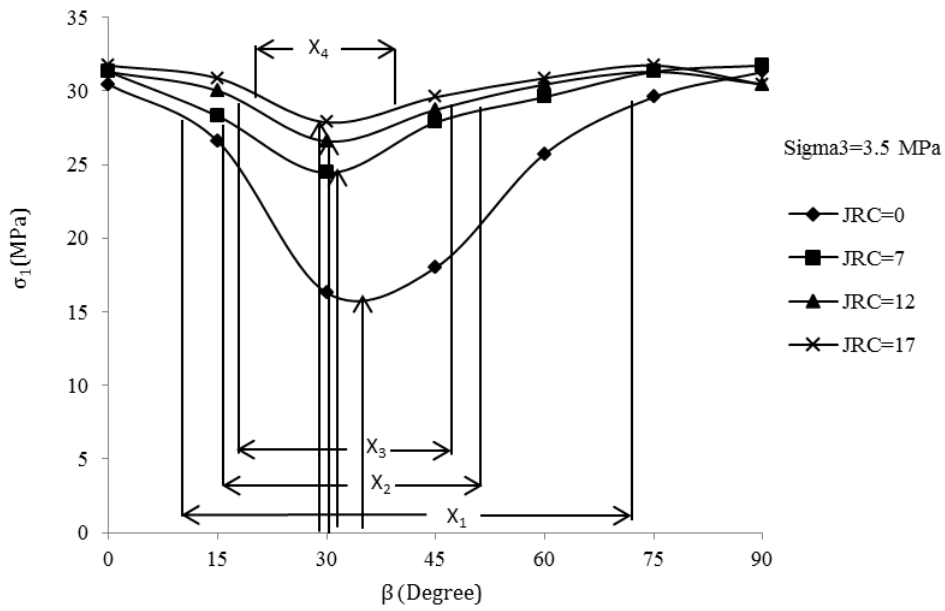
شکل ۲. تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های انیزوتروپ نسبت به زاویه‌ی ناپیوستگی برای $\sigma_3=0.5 \text{ MPa}$



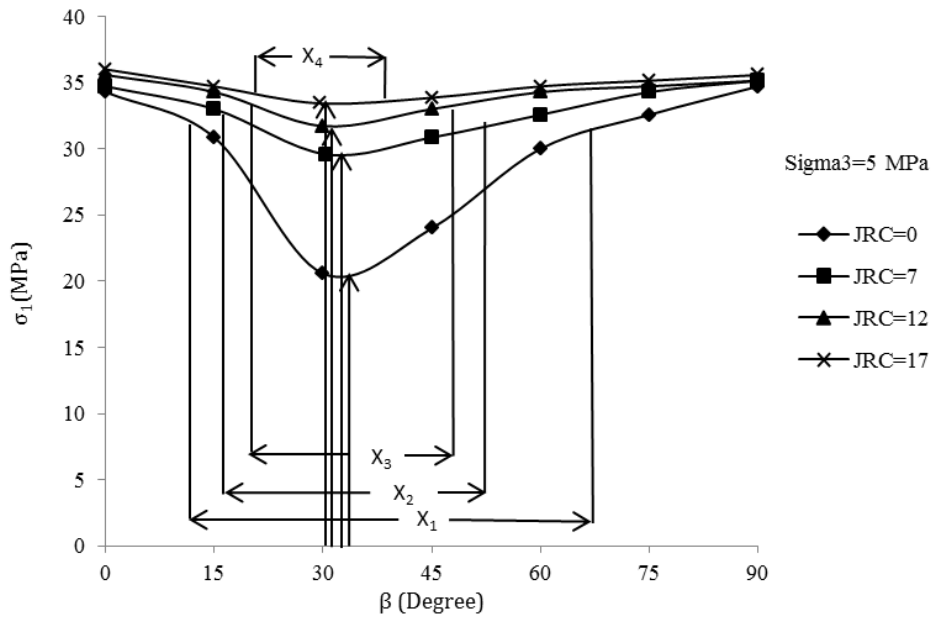
شکل ۳. تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های انیزوتروپ نسبت به زاویه‌ی ناپیوستگی برای $\sigma_3=1.5 \text{ MPa}$



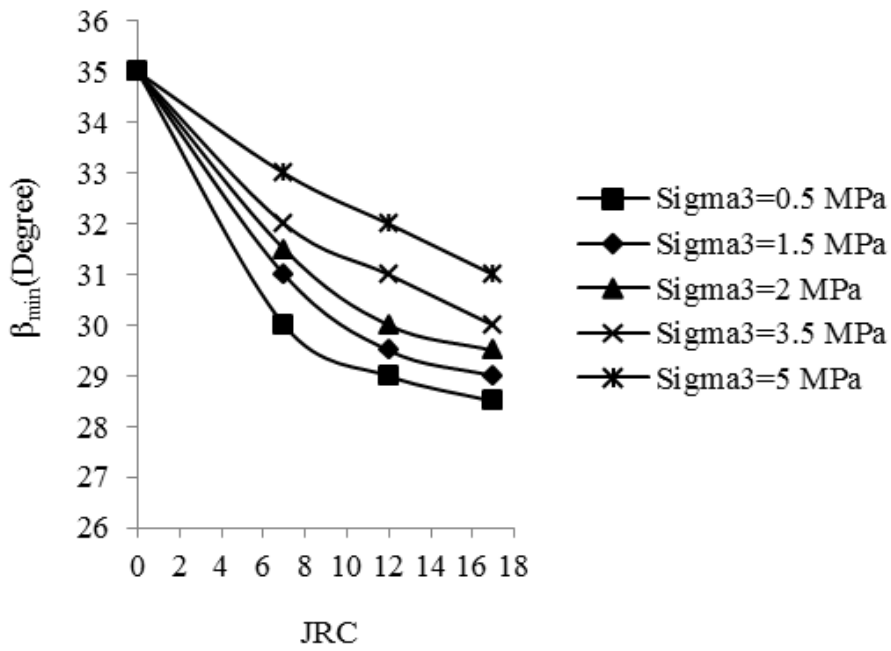
شکل ۴. تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های انیزوتروپ نسبت به زاویه‌ی ناپیوستگی برای $\sigma_3 = 2$ MPa



شکل ۵. تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های انیزوتروپ نسبت به زاویه‌ی ناپیوستگی برای $\sigma_3 = 3.5$ MPa



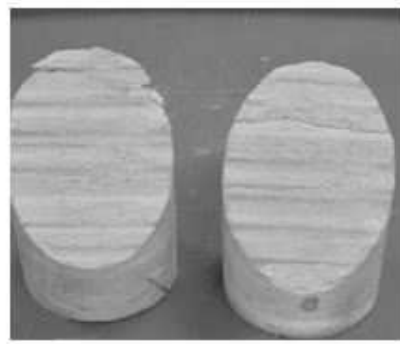
شکل ۶. تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های انیزوتروپ نسبت به زاویه‌ی ناپیوستگی برای $\sigma_3=5$ MPa



شکل ۷. تأثیر زبری سطح ناپیوستگی بر روی زاویه‌ی مربوط به کمترین مقاومت سنگ انیزوتروپ در فشارهای جانبی مختلف



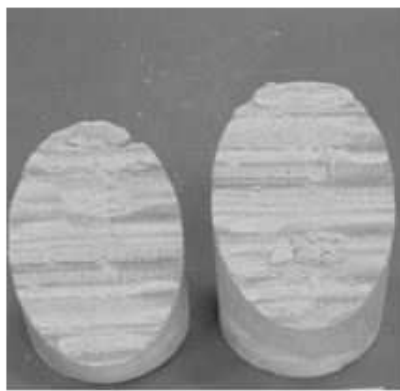
$\sigma_3 = 0.5 \text{ MPa}$



$\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$



$\sigma_3 = 3.5 \text{ MPa}$



$\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$

شکل ۸. تصاویر مربوط به ۴ نمونه در زاویه‌ی شیب ۴۵ درجه و در $JRC=7$ برای فشارهای جانبی مختلف

۵. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از این مقاله نشان می‌دهد، به طور کلی افزایش زبری سطح ناپیوستگی باعث افزایش مقاومت سنگ می‌گردد. این شرایط برای تمام زوایای شیب به جز $\beta=90^\circ$ برقرار است. در زاویه‌ی شیب 90° هنگامی که زبری افزایش می‌یابد مقاومت نمونه کاهش می‌یابد که علت آن می‌تواند تمرکز تنش در نوک دندان و شکست در ناحیه‌ی بکر نمونه باشد. اما هنگامی که فشار محصور کننده افزایش می‌یابد این روند تغییر می‌کند و کاهش مقاومت در این زاویه مشاهده نمی‌شود، زیرا در فشارهای جانبی بالا سنگ درزه‌دار مانند یک سنگ ایزوتروپ رفتار می‌کند.

کمترین مقاومت سنگ ایزوتروپ زمانی اتفاق می‌افتد که زاویه‌ی شیب ناپیوستگی با تنش اصلی حداکثر در محدوده‌ی 25° تا 50° باشد. به عبارتی دیگر، هنگامی که سطح درزه

صاف باشد کمترین مقاومت در $\beta=35^\circ$ اتفاق می‌افتد در حالی که برای سطوح زبر کمترین مقاومت در $\beta=30^\circ$ مشاهده می‌شود. اما با افزایش فشار جانبی زاویه‌ی مربوط به کمترین مقاومت برای نمونه‌های با سطح صاف کاهش می‌یابد و $\beta=30^\circ$ میل می‌کند.

نکته‌ی دیگری که با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان به آن اشاره کرد، کاهش فرم شانه‌ای نمودارهای ایزوتروپی با افزایش زبری سطح ناپیوستگی است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش زبری، منحنی مقاومت فشاری نسبت به زاویه‌ی ناپیوستگی به سمت بالا حرکت کرده و حالت شانه‌ای نمودارها کاهش یافته است. علت این حالت را می‌توان به این صورت بیان کرد که، با افزایش زبری سطح ناپیوستگی محدوده‌ای که در آن لغزش اتفاق می‌افتد کاهش می‌یابد و در نتیجه طول بخش شانه‌ای نمودار ایزوتروپی کم می‌شود.

منابع

- Akai, K., Yamamoto, K., Ariola, M., 1970. Experimentelle forschung Uber anisotropische eigenschaften von kristallinen schieferen. In Proceedings of the 2nd international congress on rock mechanics. Belgrade.
- Allirot, D., Boehler, J.P., 1979. Evolution Of Mechanical Properties Of A Stratified Rock Under Confining Pressure. 4th ISRM Congress. International Society for Rock Mechanics.
- Attewell, P.B., Sandford, M.R., 1974. Intrinsic shear strength of a brittle, anisotropic rock — I: experimental and mechanical interpretation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 11(11), 423–430. [http://doi.org/10.1016/0148-9062\(74\)90454-9](http://doi.org/10.1016/0148-9062(74)90454-9)
- Barton, N., Choubey, V., 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, 10(1-2), 1–54. <http://doi.org/10.1007/BF01261801>
- Behrestaghi, M.H.N., Seshagiri Rao, K., Ramamurthy, T., 1996. Engineering geological and geotechnical responses of schistose rocks from dam project areas in India. *Engineering Geology*, 44(1-4), 183–201. [http://doi.org/10.1016/S0013-7952\(96\)00069-5](http://doi.org/10.1016/S0013-7952(96)00069-5)
- Bray, J., 1967. A study of jointed and fractured rock. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 5(2-3), 117–136.
- Brown, E.T., 1970. Strength of Models of Rock With Intermitted Joints. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 96(SM6).
- Chenevert, M.E., Gatlin, C., 1965. Mechanical Anisotropies of Laminated Sedimentary Rocks. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 5(01), 67–77. <http://doi.org/10.2118/890-PA>
- Deklotz, E.J., Brown, J.W., Stemler, O.A., 1966. Anisotropy of a Schistose Gneiss. 1st ISRM Congress. Lisbon: International Society for Rock Mechanics.
- Donath, F. A., 1964. A strength variation and deformational behavior of anisotropic rocks. In W. R. Judd (Ed.), *State of Stress in the Earth's Crust* (pp. 281–298). Elsevier.
- Donath, F.A., 1972. Effects of Cohesion and Granularity on Deformational Behavior of Anisotropic Rock. *Geological Society of America Memoirs* (Vol. 135). Geological Society of America. <http://doi.org/10.1130/MEM135>
- Einstein, H.H., Hirschfeld, R. C., 1973. Model Studies on Mechanics of Jointed Rock. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 99(3), 229–248.
- Ghazvinian, A., Hadei, M. R., 2012. Effect of discontinuity orientation and confinement on the strength of jointed anisotropic rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 55, 117–124. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.06.008>
- Hayashi, M., 1966. Strength And Dilatancy of Brittle Jointed Mass - The Extreme Value Stochastics And Anisotropic Failure Mechanism. 1st ISRM Congress. Lisbon: International Society for Rock Mechanics.
- Jaeger, J.C., 1960. Shear failure of anisotropic rocks. *Geological Magazine*, 97(01), 65–72. <http://doi.org/10.1017/S0016756800061100>
- Ladanyi, B., Archambault, G., 1972. Evaluation de la resistance au cisaillement d'un massif rocheux fragmente. Proc. 24th Int. Geol. Cong., Montreal, Section.
- Lama, R.D., Vutukuri, V. S., 1978. Handbook on Mechanical Properties of Rocks Testig Techniques and Results. Volume 2 (Vol. 3).
- Martin McCabe, W., Koerner, R.M., 1975. High pressure shear strength investigation of an anisotropic mica schist rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 12(8), 219–228. [http://doi.org/10.1016/0148-9062\(75\)91402-3](http://doi.org/10.1016/0148-9062(75)91402-3)
- McLamore, R., Gray, K.E., 1967. The Mechanical Behavior of Anisotropic Sedimentary Rocks. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 89(1), 62–73. <http://doi.org/10.1115/1.3610013>
- Nasseri, M.H., Rao, K.S., Ramamurthy, T., 1997. Failure mechanism in schistose rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3-4), 219.e1–219.e15. [http://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)00099-3](http://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)00099-3)
- Pomeroy, C.D., Hobbs, D.W., Mahmoud, A., 1971. The effect of weakness-plane orientation on the fracture of Barnsley Hards by triaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 8(3), 227–238. [http://doi.org/10.1016/0148-9062\(71\)90021-0](http://doi.org/10.1016/0148-9062(71)90021-0)

- Ramamurthy, T., Rao, G.V., Singh, J., 1988. A Strength Criterion for Anisotropic Rocks. In Fifth Australia-New Zealand Conference on Geomechanics (pp. 253–257). Sydney.
- Rao, K., Rao, G., Ramamurthy, T., 1986. A strength criterion for anisotropic rocks. Proceedings of the Indian Geotechnical Journal, 317–333.
- Reik, G., Zacas, M., 1978. Strength and deformation characteristics of jointed media in true triaxial compression. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15, 295–303. [http://doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)91470-5](http://doi.org/10.1016/0148-9062(78)91470-5)
- Singh, V., Singh, D., Singh, T., 2001. Prediction of strength properties of some schistose rocks from petrographic properties using artificial neural networks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38(2), 269–284. [http://doi.org/10.1016/S1365-1609\(00\)00078-2](http://doi.org/10.1016/S1365-1609(00)00078-2)
- Tien, Y.M., Tsao, P.F., 2000. Preparation and mechanical properties of artificial transversely isotropic rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37(6), 1001–1012. [http://doi.org/10.1016/S1365-1609\(00\)00024-1](http://doi.org/10.1016/S1365-1609(00)00024-1)
- Walsh, J.B., Brace, W.F., 1964. A fracture criterion for brittle anisotropic rock. Journal of Geophysical Research, 69(16), 3449–3456. <http://doi.org/10.1029/JZ069i016p03449>.