

## مطالعه رفتار دندانهای سطح درزه‌های سنگی در آزمایش برش مستقیم

خبات امیری حسینی<sup>۱</sup>، نیما بابانوری<sup>۲</sup>، سعید کریمی نسب<sup>۳\*</sup>

۱- کارشناس ارشد مکانیک سنگ، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳- دانشیار بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، [kariminasab@uk.ac.ir](mailto:kariminasab@uk.ac.ir)

(دریافت ۱۷ فروردین ۱۳۹۲، پذیرش ۲۵ دی ۱۳۹۲)

### چکیده

در اغلب معیارها و مدل‌های ارائه شده، رفتار درزه در دو حالت برش و لغزش مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر برش و لغزش، تغییرشکل دندانها قبل از شکست در رفتار برشی درزه‌ها نقش تعیین کننده‌ای دارد. سهم هر یک از این مکانیزم‌ها در رفتار برشی درزه با توجه به شرایط حاکم بر رفتار درزه متفاوت است. در این تحقیق، به منظور بررسی مکانیزم‌های حاکم بر رفتار برشی درزه در شرایط بار نرمال ثابت (CNL)، درزه‌های مصنوعی در چهار سطح زبری از درزه‌های طبیعی با استفاده از هفت ترکیب مختلف پلاستی و بتنی ساخته شد و در چهار بار نرمال ۰/۵۷، ۰/۱۳، ۰/۲ و ۰/۵ مگا پاسکال تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفتند. نتایج ۱۱۰ آزمایش برش مستقیم نشان داد که در درزه‌های با مورفولوژی سطح یکسان، تحت تنش‌های نرمال پایین، افزایش مقاومت فشاری دیواره درزه موجب کاهش مقاومت برشی درزه شده است. این در حالی است که در تحقیقات صورت گرفته گذشته در رابطه با رفتار برشی درزه‌ها، در کلیه بارهای نرمال، با افزایش مقاومت فشاری دیواره درزه مقاومت برشی افزایش می‌یابد. این پدیده، که در تضاد با مشاهدات قبلی است، را می‌توان با توجه به سهم مکانیزم‌های مختلف در آزمایش برش مستقیم بررسی و توجیه کرد. در ادامه به بررسی تأثیر پارامترهای زبری سطح درزه، مقاومت فشاری دیواره درزه، تنش نرمال، مدول تغییرشکل پذیری و زاویه اصطکاک مینا بر سطح تخریب درزه‌های سنگی پرداخته شده است. در نهایت با توجه به نتایج و بررسی‌های آماری رابطه‌ای برای ارزیابی سطح تخریب شده ارائه شده است.

### کلمات کلیدی

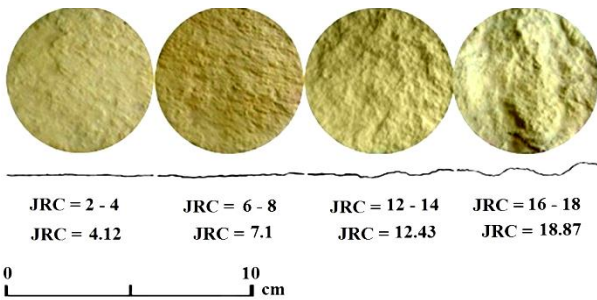
سطح تخریب، برش، لغزش، تغییرشکل، آزمایش برش مستقیم

## ۱. مقدمه

شناخت مکانیزم حاکم بر رفتار درزه‌های سنگی، جهت پیش بینی رفتار برشی و نرمال شکستگی بسیار مؤثر هستند. مکانیزم‌های اصلی در برش درزه‌های سنگی شامل برش، لغزش و تغییرشکل دندانه‌های سطح قبل از برش می‌باشند. میزان تأثیر هر یک از این مکانیزم‌ها با توجه به عوامل متعددی نظیر مورفولوژی سطح درزه، مقاومت فشاری دیواره درزه، بار نرمال وارد بر سطح درزه [۲،۱]، قابلیت تغییرشکل پذیری دندانه‌ها [۴،۳]، مقیاس [۵]، جفت شدگی [۷،۶]، سرعت بارگذاری [۸]، شرایط مرزی حاکم بر رفتار برشی شامل شرایط بار نرمال ثابت (CNL)<sup>۱</sup> و سختی نرمال ثابت (CNS)<sup>۲</sup> [۹]، نسبت بیش-تحکیم یافتگی [۱۰] و هوازدگی سطح درزه [۱۱] تغییر می‌کند. زبری سطح درزه در حین جابجایی برشی به دلیل تخریب دندانه‌های سطح درزه تغییر می‌کند. به منظور دست یابی به یک مدل رفتاری برای درزه‌هایی که تحت بارهای برشی قرار می‌گیرند، ارائه یک مدل مناسب برای تخریب دندانه‌ها مورد نیاز می‌باشد. تا کنون تحقیقات محدودی جهت کمی کردن تخریب ایجاد شده در سطح درزه انجام شده است. ابتدایی‌ترین آنها معیار دو خطی پاتن<sup>۳</sup> (۱۹۶۶) است که برای شرایط CNL توسعه یافته‌است [۱۲،۱۳]. در معیار پاتن فرض می‌شود که در تنش‌های نرمال پایین، جابجایی برشی توسط لغزش روی سطح دندانه‌ها اتفاق می‌افتد، در حالی که در تنش‌های نرمال بالاتر، جابجایی برشی توسط برش در دندانه‌ها رخ می‌دهد. لادانی و آرشمبولت<sup>۴</sup>، پارامتر نسبت ناحیه برش،  $a_s$ ، را جهت کمی کردن میزان تخریب سطح درزه پیشنهاد کردند و رابطه‌ای برای تخمین آن ارائه نمودند [۱۴،۱۵]. محدودیت اصلی این مدل فرض صلبیت برای دندانه‌های سطح درزه و در نظر نگرفتن پارامتر زبری سطح در ارزیابی مقدار ناحیه تخریب می‌باشد. هابرفیلد و جانسون بیان کردند که استفاده از زبری صلب موجب می‌شود که تأثیر بار در دندانه‌های با شیب مختلف به صورت جدا از هم پیشروی کند. در یک مقطع شامل دندانه‌های صلب با زاویه مختلف، جابجایی برشی همراه با اتساع در سطح دندانه شیبدارتر ایجاد می‌شود. دیگر دندانه‌ها به صورت دست نخورده باقی می‌مانند [۳]. در واقعیت به دلیل خاصیت ارتجاعی دندانه‌ها، وقتی که تحت بار برشی قرار می‌گیرند دندانه‌های شیبدارتر اندکی تغییرشکل می‌دهند به طوری که به صورت یک برجستگی مجزا عمل نمی‌کند. بار به صورت تدریجی با توجه به شیب دندانه‌ها بین آنها تقسیم می‌شود [۴]. جنتایر<sup>۵</sup> و همکاران با استفاده از تکنیک ویرایش تصویر روشی را جهت تشخیص و کمی کردن نواحی تخریب شده در حین برش در یک جهت خاص ارائه کردند [۱۵]. گراسلی<sup>۶</sup> بر اساس

مشاهدات آزمایشگاهی بیان کرد که ناحیه تماس واقعی مقدار کمی از کل ناحیه تماس است. علاوه بر این، ناحیه تماس برای سطوح با زبری یکسان با تغییر در راستای برش و یا مقدار بار عمودی تغییر خواهد کرد. وی همچنین اظهار داشت که تنها توسط مطالعه تمام سطح به صورت سه بعدی و نه فقط یک پروفیل از آن، می‌توان تأثیر این پدیده را بر مقاومت برشی درک کرد [۱۶،۱۷،۱۸]. هومند<sup>۵</sup> و همکاران، پارامتر درجه تخریب سطح درزه،  $D_w$ ، را جهت بررسی سطح تخریب شده پیشنهاد کردند. این پارامتر بر اساس اندازه‌گیری خصوصیات مورفولوژیکی<sup>۷</sup> درزه‌های برش خورده با استفاده از پروفایلمتر<sup>۸</sup> لیزری قبل و بعد از آزمایش برش ارزیابی می‌شود [۱۹]. تخریب دندانه‌های سطح درزه تحت سیکل‌های بارگذاری برشی توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۲۰،۲۱]. بلم<sup>۱۸</sup>، بر اساس پارامترهای مورفولوژی سطح درزه، شرایط برش شامل تعداد سیکل‌ها و جابجایی در هر سیکل و همچنین مقاومت فشاری دیواره درزه مدلی جهت ارزیابی میزان تخریب سطح درزه پیشنهاد کرد [۲۲]. تی هیو کوان<sup>۹</sup> و همکاران، با بررسی رفتار برشی دندانه‌های مستطیلی شکل نشان دادند که در بارهای نرمال کم، دندانه‌های کوچکتر تأثیر بیشتری بر مقاومت برشی درزه دارند [۲۳].

تقریباً در هیچ یک از تحقیقات گذشته مجموعه آزمایش سیستماتیک جهت بررسی خصوصیات مقاومتی و تغییر شکل پذیری با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها انجام نگرفته است. در این تحقیق به بررسی مکانیزم‌های مختلف حاکم بر رفتار برشی درزه‌های سنگی و شکل‌گیری نواحی تخریب دندانه‌ها در بازه وسیعی از بار نرمال، زبری سطح درزه و خصوصیات مکانیکی دندانه‌های سطح درزه پرداخته شده است. جهت بررسی تأثیر خصوصیات مقاومتی و قابلیت تغییر شکل پذیری بر رفتار زبری در سطوح درزه از مواد پلاستری و بتنی با هفت ترکیب مختلف استفاده شده است. درزه‌های مصنوعی در حالت انطباق یافته و تحت شرایط بار نرمال ثابت مورد آزمایش قرار گرفتند. در مجموع ۱۱۰ آزمایش برش مستقیم بر روی درزه‌های مدل<sup>۱۰</sup> انجام گرفت. استفاده از درزه‌های مدل این امکان را فراهم کرد که تأثیر هر یک از پارامترها را با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها مورد بررسی قرار گیرد. در ادامه به بررسی رفتار برشی و اتساعی آزمایش‌ها و سطوح شکست بعد از آزمایش برش مستقیم پرداخته شد. سهم مکانیزم‌های حاکم بر رفتار برشی درزه‌ها با تغییر هر یک از پارامترهای ذکر شده مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت با استفاده از روشهای پردازش تصویر به بررسی کمی سطح برش خورده پرداخته شد.



JRC = 2 - 4      JRC = 6 - 8      JRC = 12 - 14      JRC = 16 - 18  
 JRC = 4.12      JRC = 7.1      JRC = 12.43      JRC = 18.87

0 10 cm

شکل ۱: درزه‌های پلاستری ساخته شده در چهار زبری مختلف به همراه مقادیر JRC به دست آمده از دو روش مقایسه چشمی به کمک پروفیلومتری و استفاده از پارامترهای آماری.

همچنین برای این که بتوان تأثیر خصوصیات مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری را بر رفتار برشی درزه بررسی کرد، نیاز است که مواد تشکیل دهنده نمونه‌ها به گونه‌ای انتخاب شوند که موجب تغییرات قابل تشخیصی در نتایج آزمایش‌ها شوند. به این منظور از ترکیبات مختلف پلاستری و بتنی برای ساخت نمونه‌های درزه استفاده شد. در ابتدا از ترکیبات مختلف آب و نوعی پلاستر با نام Crystacal D استفاده شد. این پلاستر از کانی گچ با خلوص بسیار بالا ساخته شده است [۲۶، ۱۰]. نمونه‌های پلاستری با نسبت‌های مختلف پلاستر به آب، تحت شرایط یکسان با درزه‌های پلاستری مدل عمل آمده و تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوره، برزلی و آزمایش انحراف قرار گرفتند. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به اینکه زاویه اصطکاک مینای درزه‌های سنگی بر خلاف زاویه اصطکاک ماده سنگ (در معیار موهر-کلمب) بیشتر جزء خصوصیات فیزیکی سطح سنگ است تا یک خصوصیت مکانیکی و بر اساس نتایج آزمایش انحراف در تحقیق حاضر، با وجود تنوع بسیار زیاد مقادیر خصوصیات مکانیکی نظیر مقاومت فشاری، در عمل مقادیر زاویه اصطکاک مینا تغییرپذیری بسیار کمی دارند. زاویه اصطکاک مینا برای نسبت‌های مختلف پلاستر به آب،  $1/56 \pm 34/12$  درجه به دست آمد.

جدول ۱: مشخصات مکانیکی نمونه‌های پلاستری

نسبت پلاستر به آب $\frac{P}{W}$	مدول یانگ (GPa)	مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	چگالی ( $\frac{g}{cm^3}$ )
۴	$11/36 \pm 0/02$	$52/12 \pm 2/14$	$4/23 \pm 0/34$	۱/۸۹
۳	$8/66 \pm 0/45$	$41/59 \pm 1/18$	$3/18 \pm 0/41$	۱/۶۴
۲	$3/83 \pm 1/24$	$17/24 \pm 2/78$	$2/81 \pm 0/24$	۱/۳۱

جهت ساخت نمونه‌های بتنی از ترکیبات مختلف آب، سیمان، فوق روان‌کننده و ماسه سیلیسی استفاده شد. جدول ۲، مشخصات مکانیکی نمونه‌های بتنی ساخته شده را نشان می‌دهد. زاویه اصطکاک مینا برای ترکیبات مختلف نمونه‌های بتنی رنگ شده،  $28 \pm 2/01$  درجه به دست آمد.

## ۲. ارزیابی زبری سطح

زبری سطح درزه تأثیر اساسی بر رفتار مکانیکی آن دارد، محققین متعددی برای تعیین زبری درزه و گسترش سیستم‌های کمی کردن آن تلاش نموده‌اند. تسه و کروندن، تلاش کردند به جای تخمین مقدار ضریب زبری درزه، JRC، به صورت چشمی، تا مقدار آن را با استفاده از پارامترهای آماری هندسه پروفیل درزه محاسبه کنند. آنها روابط رگرسیونی زیر را بین JRC و پارامترهای مختلف بنا نهادند. از این میان، پرکاربرترین رابطه ارائه شده رابطه زیر می‌باشد [۲۴]:

$$JRC = 32.2 + 32.47 \log Z_2 \quad R^2 = 0.986 \quad (1)$$

$Z_2$  مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۴].

$$Z_2 = \text{RMS} \left( \frac{\Delta x}{\Delta y} \right) = \left[ \frac{1}{M(\Delta x)} \sum_{i=1}^M (y_{i+1} - y_i)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

در این رابطه،  $\Delta x$  فواصل برداشت،  $y_i$  و  $y_{i+1}$  ارتفاع دندانه‌های دو نقطه برداشت شده مجاور با اختلاف ارتفاع  $\Delta y$  و  $M$  تعداد نقاط برداشت شده در دامنه پروفیل است. در این تحقیق جهت اندازه‌گیری اولیه و انتخاب نمونه معرف، پروفیل‌هایی از سطح درزه‌های طبیعی که در راستای برش و با استفاده از شانه کارپینتر برداشت شده بودند، با ده پروفیل ارائه شده توسط بارتن و چوبی [۲۵] مقایسه شده و حدود مقادیر JRC برای هر پروفیل به دست آمد. در مرحله بعد برای تعیین دقیق مقادیر JRC، برای هر هندسه سطح، سه پروفیل در راستای برش رقمومی شد و مقادیر  $y_i$  و  $y_{i+1}$  در گام‌های  $\Delta x = 0/5 \text{ mm}$  به دست آمد. بدین ترتیب با قرار دادن در رابطه (۲) مقادیر  $Z_2$  برای هر پروفیل محاسبه شد و با استفاده از رابطه (۱) مقادیر JRC هر پروفیل تخمین زده شد. در نهایت مقدار JRC هر سطح در راستای برش برابر میانگین JRC محاسبه شده برای سه پروفیل برداشت شده از آن سطح در نظر گرفته شد. در شکل ۱، مقادیر JRC به دست آمده از دو روش مقایسه چشمی به کمک پروفیلومتری و استفاده از پارامترهای آماری، نشان داده شده است.

## ۳. آماده‌سازی نمونه‌ها

جهت بررسی تأثیر هر یک از پارامترهای زبری سطح درزه، بار نرمال وارد بر سطح درزه، خصوصیات مکانیکی و اصطکاک مواد تشکیل‌دهنده سطح درزه لازم است سایر پارامترها ثابت نگه داشته شوند. از آن‌جاکه یافتن درزه‌های طبیعی با خصوصیات هندسی سطح کاملاً یکسان امکان‌پذیر نیست، از درزه‌های طبیعی نمونه‌های مدل تهیه شد.

جدول ۲. مشخصات مکانیکی نمونه‌های بتنی

ترکیبات	مدول یانگ (GPa)	مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)	چگالی ( $\frac{g}{cm^3}$ )
۱	۱۱/۹۱±۱/۳	۵۲/۵±۱/۲۱	۲/۱۵
۲	۸/۰۲±۰/۶۲	۳۷/۳۷±۰/۱۴	۲/۰۲
۳	۵/۳۲±۰/۲۱	۱۷/۴۸±۱/۹۵	۱/۹۱
۴	۲/۸۸±۰/۲	۸±۰/۷۵	۱/۸۵

کنترل جابجایی‌ها در ۱/ بار نرمال حداکثر، خطای دستگاه به حداقل مقدار رسیده است. پس از این که نمونه در تنش نرمال مورد نظر به عنوان حداکثر تنش نرمال وارد بر سطح درزه تحکیم شد، فاز برش آغاز می‌شد. بار برشی با سرعت ثابت به قسمت بالایی نمونه وارد می‌شد، در حالی که قسمت پایین ثابت بود. در نهایت با توجه به ملاحظات تکنیکی مرتبط با دستگاه برش مستقیم و مقاومت نمونه‌های مصنوعی تصمیم گرفته شد که جابجایی برشی ۸mm نقطه خاتمه آزمایش‌ها باشد.

از آنجا که در مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق هدف رفتار نگاری برش دندانه‌های سطح درزه بوده است. در این حالت می‌بایست مقادیر پارامترها به‌گونه‌ای انتخاب می‌شدند که بتوان تأثیر آن‌ها را در نتایج ردیابی نمود. هرچه پراکندگی در چیدمان مقادیر مختلف پارامترها در آزمایش‌ها بیشتر باشد نتایج قابلیت تعمیم بیشتری دارند. همچنین مرزهای بالا و پایین مسأله نظیر آنچه بارتن برای نسبت تنش نرمال به مقاومت فشاری دیواره در نظر گرفته بود تعیین شدند تا بتوان نتایج را با کارهای پیشین در این زمینه مقایسه نمود. دست آخر می‌بایست محدودیت‌های تکنیکی نظیر ظرفیت جک‌ها و مقاومت نمونه‌های ساخته شده نیز در چیدمان مقادیر پارامترها در هر آزمایش مورد توجه قرار می‌گرفت. بنابراین، به منظور ارزیابی دقیق تأثیر پارامترها بر یکدیگر، جهت انجام کامل آزمایش‌های نمونه‌های پلاستری در ۴ سطح زبری درزه، ۳ سطح بار نرمال و ۳ سطح از خصوصیات مکانیکی مواد در مجموع ۳۶ ( $3^2 \times 3^1 = 3^3$ ) نمونه درزه پلاستری ساخته شد. در ادامه با توجه به هدف تحقیق و تحلیل نتایج نمونه‌های پلاستری، ۵۰ نمونه درزه بتنی ساخته شد. همچنین جهت کنترل نتایج آزمون برش مستقیم از بین ۸۶ آزمایش انجام شده ۱۰ آزمایش به صورت تصادفی انتخاب شده و تکرار شدند. بیشترین میزان اختلاف مقاومت برشی میان هر جفت آزمایش ۲/۳٪ مقاومت برشی کوچک‌تر بود. ۱۴ نمونه با سطح صیقلی نیز جهت انجام آزمون برش مستقیم بر روی سطوح صاف ساخته شد. در مجموع ۱۱۰ آزمایش برش مستقیم در این تحقیق انجام شده است که مشخصات آنها در جدول ۳، ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات آزمایش‌های انجام شده

شماره آزمایش	شماره ترکیب (C: بتن، و: پلاستر)	JRC	$\sigma_n$ (MPa)
۱، ۱۷، ۳۱، ۴۰، ۵۴، ۶۶، ۷۸	(۴، ۶، ۵، ۷) <sup>C</sup> (۳، ۲، ۱) <sup>P</sup>	۱۸/۸۷	۰/۵۷
۲، ۲۱، ۳۴، ۴۴، ۵۸، ۷۰، ۸۲	(۶، ۴، ۵، ۷) <sup>C</sup> (۲، ۳، ۱) <sup>P</sup>	۱۸/۸۷	۱/۳

جهت ساخت نمونه‌های اصلی به منظور انجام آزمایش برش مستقیم، چهار سطح درزه طبیعی با درجات زبری مختلف به عنوان درزه‌های مادر انتخاب شدند. سپس قالب سیلیکونی از این درزه‌ها تهیه گردید. ماده سیلیکونی به کار رفته در ساخت قالب سطح درزه C-silicones نام دارد که شامل یک ماده سخت کننده<sup>۱۲</sup> برای سرعت بخشیدن به گیرش نهایی است [۱۰]. برای ساخت درزه‌های مدل، ابتدا یک سطح درزه با استفاده از قالب سیلیکونی، قالب گیری و ساخته شد، سپس سطح دیگر درزه روی سطح اول، قالب گیری و ساخته شد. بدین ترتیب درزه‌های جفت شده استوانه‌ای و با قطر ۶cm ساخته شدند. سطوح بالا و پایین درزه‌های مدل‌سازی شده با رنگ پوستر قرمز رنگ آمیزی شدند تا پس از برش، نواحی بریده شده به راحتی قابل تشخیص باشند.

#### ۴. آزمایش برش مستقیم

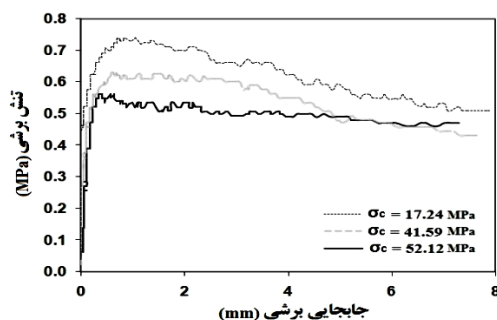
بررسی آزمایشگاهی رفتار درزه‌های سنگی از طریق آزمایش‌های برش مستقیم تحت شرایط بار نرمال ثابت (CNL) با استفاده از تجهیزات آزمایش برش مستقیم هیدرولیکی در آزمایشگاه مکانیک سنگ معدن گل‌گهر صورت گرفت. در این دستگاه برش مستقیم، بارهای افقی و عمودی توسط دو بازوی هیدرولیکی<sup>۱۳</sup> اعمال می‌شوند که مجهز به شیرهای تنظیم بار<sup>۱۴</sup> و فشارشکن<sup>۱۵</sup> هستند که امکان تنظیم سرعت برش و انجام آزمایش یکنواخت را به طور دستی فراهم می‌سازند. هر بازو ظرفیت بارگذاری ۵۰ کیلو نیوتن دارند. نیروهای عمودی و افقی توسط سلول‌های فشاری که به طور سری با بازوها نصب شده‌اند، اندازه‌گیری می‌شوند و در ترکیب با یک سیستم ثبت اطلاعات متصل به یک رایانه، دقت اندازه‌گیری ۰/۰۴ کیلو نیوتن است. جابجایی برشی توسط یک LVDT<sup>۱۶</sup> و جابجایی عمودی توسط دو LVDT در دو طرف نمونه اندازه‌گیری می‌شود که دقت همگی برابر ۰/۰۳ میلی‌متر است. وجود دو LVDT در راستای قائم، این امکان را فراهم می‌کند که در صورت توزیع نامناسب بار در سطح نمونه، چرخش نمونه قابل مشاهده باشد. با تنظیم راستای بار نرمال، انطباق قالب‌ها در دستگاه برش و

ادامه جدول ۳

۲	۱۸/۸۷	$(2.3, 1)^P (6.4, 5.7)^C$	۳.۲۶، ۳۶.۴۵، ۶۲.۷۴، ۸۶
۲/۵	۱۸/۸۷	$(4, 5.6)^C$	۴.۳۸، ۵۰
۰/۵۷	۴/۱۲	$(2.3, 1)^P (4, 5.6)^C$	۵.۱۹، ۵۱.۶۳، ۷۵
۰/۵۷	۷/۱	$(2.3, 1)^P (6.4, 5.7)^C$	۶.۱۸، ۲۹.۴۲، ۵۲.۶۴، ۷۶
۰/۵۷	۱۲/۴۳	$(2.3, 1)^P (6.4, 5.7)^C$	۷.۲۰، ۳۲.۴۱، ۵۳.۶۵، ۷۷
۱/۳	۱۲/۴۳	$(2.3, 1)^P (6.4, 5.7)^C$	۸.۲۳، ۳۵.۴۶، ۵۷.۶۹، ۸۱
۱/۳	۷/۱	$(3, 2, 1)^P (6.4, 5.7)^C$	۹.۲۴، ۳۰.۵۶، ۶۸.۸۰
۱/۳	۴/۱۲	$(3, 2, 1)^P (4, 5.6)^C$	۱۰.۲۲، ۵۵.۶۷، ۷۹
۲	۴/۱۲	$(3, 2, 1)^P (6.4)^C$	۱۱.۲۸، ۵۹.۷۱، ۸۳
۲	۱۲/۴۳	$(2.3, 1)^P (6.4, 5.7)^C$	۱۲.۲۷، ۳۷.۴۷، ۶۱.۷۳، ۸۵
۲	۷/۱	$(2.3, 1)^P (6.4, 5.7)^C$	۱۳.۲۵، ۳۳.۴۳، ۶۰.۷۲، ۸۴
۲/۵	۱۲/۴۳	$(6.4, 5.7)^C$	۱۴.۳۹، ۴۹
۲/۵	۷/۱	$(4, 5.6)^C$	۴۸.۱۶
۱/۳	۴/۱۲	۴	۱۵
۰/۵۷	درزه صیقلی	$(2.3, 1)^P (6.4, 5.7)^C$	تعداد ۷ آزمایش
۲	درزه صیقلی	$(2.3, 1)^P (6.4, 5.7)^C$	تعداد ۷ آزمایش

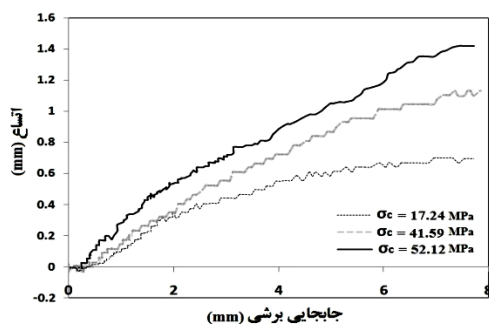
## ۵. نتایج آزمایش‌ها

بودن مقدار اتساع و کمتر بودن ناحیه تخریب برای درزه‌های با مقاومت فشاری بالاتر در این حالت است که به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴، نشان داده شده است. همچنین با افزایش مدول یانگ، قابلیت تغییر شکل الاستیک دندانه‌ها کاهش می‌یابد، بنابراین با شروع فرآیند برش دندانه‌های با شیب بیشتر قسمت بیشتر بار را تحمل می‌کنند و سطح تماس مؤثر در فرآیند برش کاهش می‌یابد. در صورتی که مقاومت فشاری دندانه به گونه‌ای باشد که بریده نشود، مقاومت اصطکاکی سطح محدودی که با یکدیگر در تماس هستند مقاومت برشی درزه را تعیین می‌کند. اما در صورتی که مقاومت فشاری تک‌محوره پایین باشد قابلیت تغییر شکل پذیری بالا، از طرفی موجب افزایش جفت شدگی سطح درزه و از طرفی دیگر موجب کاهش زاویه دندانه‌ها می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده، تأثیر مثبت تغییر شکل دندانه‌ها در مقاومت برشی درزه‌های سنگی (از طریق افزایش سطح تماس)، بیشتر از تأثیر منفی آن (از طریق کاهش زاویه دندانه‌ها) است. بنابراین، برآیند این عوامل موجب افزایش مقاومت برشی درزه با مقاومت فشاری کمتر تحت بارهای نرمال پایین می‌گردد.

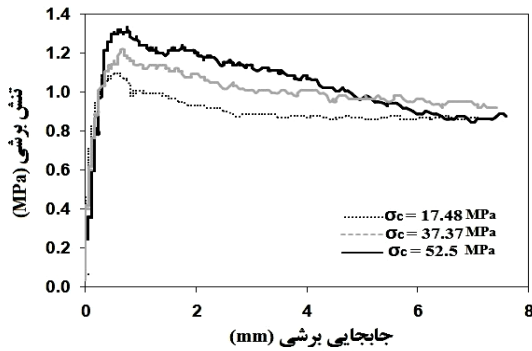


شکل ۲: نمودار تنش برشی - جابجایی برشی، درزه‌هایی با سه ترکیب مختلف از پلاستر ( $\sigma_n = 0/57 \text{ MPa}$ ,  $JRC = 18/87$ ).

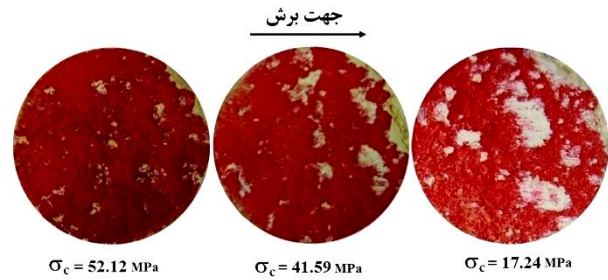
در بارهای عمودی بالا (در این تحقیق بیشتر از  $1/3 \text{ MPa}$ ) با افزایش مقاومت فشاری تک‌محوره مقاومت برشی درزه نیز افزایش می‌یابد. شکل ۶ و ۷، مقایسه رفتار برشی درزه‌ها در مقاومت‌های فشاری دیواره مختلف به ترتیب برای نمونه‌های پلاستری و بتنی در بار نرمال بالا را نشان می‌دهند.



نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های برش مستقیم روی نمونه‌ها، در قالب نمودارهای تنش برشی - جابجایی برشی و اتساع - جابجایی برشی بیان شده‌اند. شکل ۲، نمودار تنش برشی - جابجایی برشی، شکل ۳، نمودار اتساع - جابجایی برشی و شکل ۴، تصاویر سطح درزه پس از برش برای سه ترکیب پلاستری در بار عمودی یکسان  $0/57 \text{ MPa}$  را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۲، مشاهده می‌شود در بارهای عمودی کم ( $\sigma_n = 0/57 \text{ MPa}$ )، با وجود افزایش مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت برشی سطح درزه کاهش یافته است. شکل ۵، نمودار تنش برشی - جابجایی برشی برای نمونه‌های بتنی در بار نرمال  $0/57 \text{ MPa}$  برای سطوح با  $JRC = 12/43$  را نشان می‌دهد. در نمونه‌های بتنی نیز در بار نرمال کم ( $\sigma_n = 0/57 \text{ MPa}$ ) مقاومت برشی سطوح درزه با کاهش مقاومت فشاری دیواره درزه افزایش می‌یابد. این مشاهدات در حالی است که در کلیه معیارهای ارائه شده برای مقاومت برشی درزه‌های سنگی همواره رابطه مستقیم میان خصوصیات مقاومتی دندانه‌ها و مقاومت برشی درزه در نظر گرفته شده است. تأثیر معکوس مقاومت فشاری بر مقاومت برشی درزه در بارهای نرمال پایین، به دلیل مکانیزم حاکم بر برش زبری درزه می‌باشد. سه مکانیزم اصلی که رفتار درزه‌ها را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد، لغزش، برش و تغییر شکل دندانه‌های سطح درزه قبل از برش می‌باشند. سهم این مکانیزم‌ها در رفتار برشی با توجه به عوامل مؤثر بر رفتار برشی درزه تغییر می‌کند. با افزایش مقاومت فشاری تک‌محوره در بارهای عمودی پایین، رفتار برشی بیشتر به صورت لغزش بین دو سطح درزه بر روی یکدیگر می‌باشد و سهم مکانیزم برش دندانه‌ها اندک است. شاهد این مدعا بیشتر

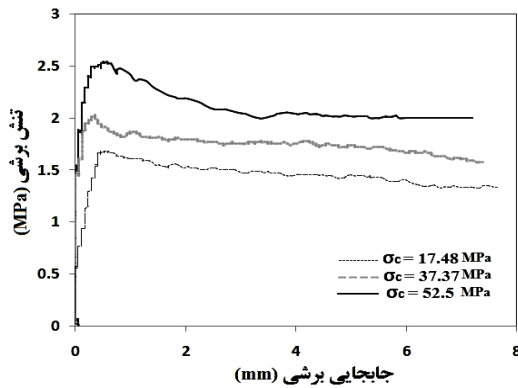


شکل ۳: نمودار اتساع - جابجایی برشی، درزه‌هایی با سه ترکیب مختلف از پلاستر (JRC=۱۸/۸۷,  $\sigma_n=0/57$  MPa).

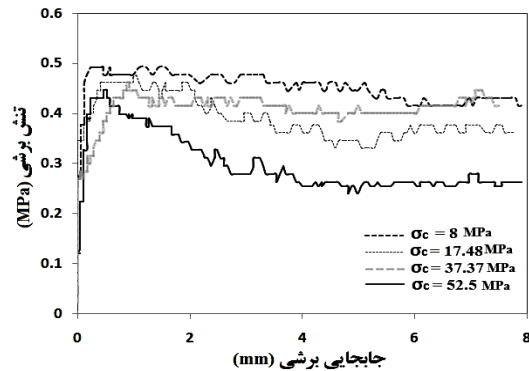


شکل ۴: سطوح درزه‌های مدل پلاستری پس از برش ( $\Delta u = 8$ mm) در سه ترکیب مختلف تحت بار نرمال پایین ( $0/57$ MPa): قسمت-هایی که رنگ روشن دارند نواحی تخریب‌شده را نشان می‌دهند.

شکل ۶: نمودار تنش برشی - جابجایی برشی درزه‌های پلاستری تحت بار نرمال بالا (JRC=۱۸/۸۷,  $\sigma_n=1/3$  MPa).



شکل ۷: نمودار تنش برشی - جابجایی برشی درزه‌های بتنی تحت بار نرمال بالا (JRC=۱۸/۸۷,  $\sigma_n=2/5$  MPa).



شکل ۵: نمودار تنش برشی - جابجایی برشی برای درزه‌هایی با سه ترکیب مختلف از بتن (JRC=۱۲/۴۳,  $\sigma_n=0/57$  MPa).

این جابجایی در ابتدای شروع حرکت برشی به علت تخریب زبری ثانویه، جفت شدگی بیشتر دو سطح درزه و تراکم ناشی از تغییر شکل دندانها به صورت اتساع منفی (در جهت بار نرمال وارد بر سطح درزه) می‌باشد. با ثبت جابجایی‌ها در ۰/۱ بار نرمال حداکثر، جابجایی‌های ناشی از خطای دستگاه بررسی شد. در موارد اندکی که این خطا وجود داشت تأثیر آن از محاسبات حذف شده است. با افزایش مقدار جابجایی برشی و لغزش دندانهای سطح درزه بر روی یکدیگر، میزان اتساع، بیشتر می‌شود و در مقدار مقاومت برشی اوج، نرخ افزایش اتساع به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. پس از آن به دلیل تخریب دندانهای سطح درزه نرخ اتساع نیز کاهش می‌یابد. خصوصیات مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری مواد تشکیل دهنده دندانها در رفتار اتساعی درزه نقش بسزایی دارند. شکل‌های ۸ و ۹، نمودارهای اتساع - جابجایی برشی را به ترتیب برای بارهای نرمال ۱/۳ و ۲/۵ مگاپاسکال برای ترکیبات مختلف بتن در زبری JRC=۱۸/۸۷ نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۸، با افزایش مقاومت فشاری مواد تشکیل‌دهنده دندانهای سطح درزه، اتساع ایجاد شده در سطح درزه بیشتر می‌شود. مقایسه شکل‌های ۸ و ۹، نشان می‌دهد که افزایش بار نرمال وارد بر

در بارهای نرمال بالا، جفت شدگی سطح درزه در مواد با مقاومت فشاری بالا نیز افزایش می‌یابد. به‌علاوه، مکانیزم حاکم بر رفتار برشی درزه برای مواد با مقاومت فشاری دیواره بالا نیز به صورت برش دندانهای سطح درزه می‌باشد. در این حالت بالاتر بودن مقاومت فشاری دیواره درزه، منجر به مقاومت برشی بیشتر شده است.

همراه با جابجایی برشی در سطح درزه، به دلیل حرکت دندان بر روی یکدیگر جابجایی نرمال در سطح درزه ایجاد می‌شود.

شکل‌های ۱۱ و ۱۲، منحنی‌های برش را تحت تنش نرمال و زبری سطح یکسان و به ترتیب برای درزه‌های با مقاومت فشاری پایین و بالا نشان می‌دهند. با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق توصیف رفتار برشی درزه‌ها در قسمت‌های مختلف نمودار تنش برشی-جابجایی برشی به شرح زیر می‌باشد:

#### انتهای مرحله تحکیم و ابتدای مرحله برش (نقطه A):

در ابتدا درزه به حالت کاملاً جفت شده قرار دارد. در مرحله تحکیم بسته به مقدار تغییرشکل‌پذیری مواد درزه، سطح تماس اولیه متفاوت می‌باشد. تحکیم سطح درزه موجب جفت شدگی بیشتر و اتساع منفی در سطح درزه می‌شود. در مرحله تحکیم مواد با مقاومت فشاری دیواره کمتر جابجایی نرمال بیشتری نشان داده است.

#### قسمت خطی قبل از اوج (A-B): نیروهای عمودی و

برشی بر سطح دو نیمه درزه وارد می‌شوند. در این قسمت برای مواد با قابلیت تغییرشکل‌پذیری بالا، تغییر شکل الاستیک بیشتری بدون جابجایی برشی ایجاد می‌شود، شکل ۱۱. کاهش قابلیت تغییر شکل‌پذیری مواد تشکیل دهنده درزه در این قسمت با مقداری جابجایی برشی همراه خواهد بود، شکل ۱۲. این جابجایی برشی در درزه‌های با دندانه‌های نسبتاً صلب به دلیل حرکت جزئی سطوح درزه و تمرکز بار بر روی دندانه‌های با شیب بیشتر می‌باشد.

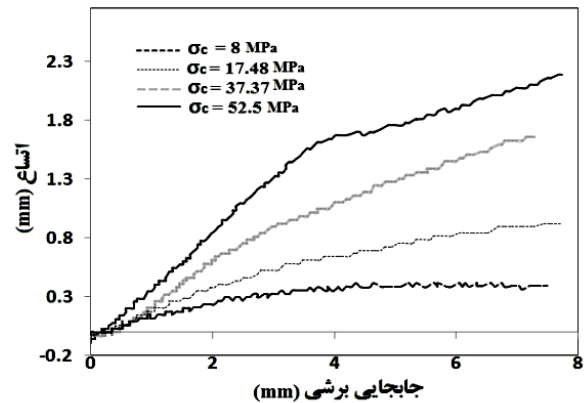
#### قسمت غیر خطی قبل از اوج (B-C): با نزدیک شدن

نیروی برشی به نیروی نرمال وارد بر سطح درزه، جهت نیروی برآیند از حالت عمود بر سطح درزه به نیروی عمود بر دندانه‌های سطح درزه تغییر می‌یابد. کاهش سختی برشی در این مرحله به دلیل لغزش و تغییرشکل دندانه‌های سطح درزه اتفاق می‌افتد. این مرحله تا رسیدن به مقدار تنش برشی اوج ادامه می‌یابد، شکل‌های ۱۱ و ۱۲. در نقطه C، دندانه‌های شیب‌دارتر شروع به شکستن می‌کنند و نرخ اتساع رو به کاهش می‌گذارد. در مواد با قابلیت تغییرشکل‌پذیری بالا سختی برشی به مقدار بیشتری نسبت به مواد با قابلیت تغییر شکل‌پذیری پایین، کاهش می‌یابد.

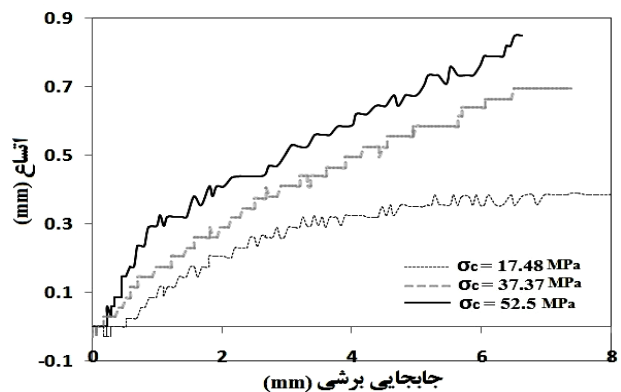
#### قسمت بعد از اوج (C-D): بسته به مقدار جابجایی برشی،

مقدار بار عمودی وارد بر سطح درزه، سطح تماس مؤثر در فرآیند برش، مقاومت فشاری دیواره درزه و درجه زبری، تخریب در سطح درزه اتفاق می‌افتد. در نتیجه رفتار منحنی تنش برشی-جابجایی برشی به سمت نرم‌شوندگی پیش می‌رود، شکل‌های ۱۱ و ۱۲.

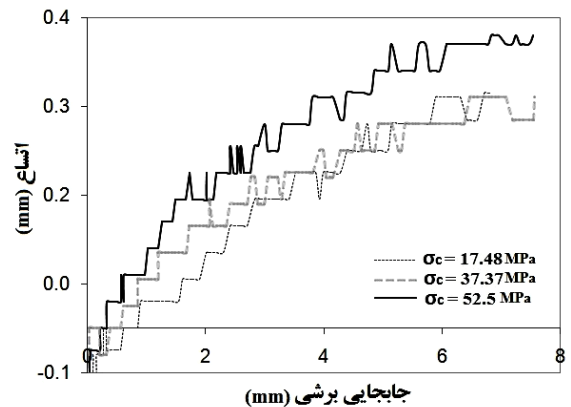
سطح درزه موجب کاهش اتساع در سطح درزه شده و اختلاف اتساع ایجاد شده در مواد با مقاومت فشاری دیواره مختلف نیز کمتر می‌شود. شکل ۱۰، نمودار اتساع - جابجایی برشی برای مواد با مقاومت مختلف، در زبری و بار نرمال پایین را نشان می‌دهد. در سطوح با زبری کم، میزان اتساع ایجاد شده در مواد با مقاومت فشاری دیواره مختلف به یکدیگر نزدیک می‌شوند.



شکل ۸: نمودار اتساع - جابجایی برشی درزه‌های بتنی با مقاومت‌های مختلف به‌ازای  $\sigma_n = 1/3$  MPa،  $JRC = 18/87$ .

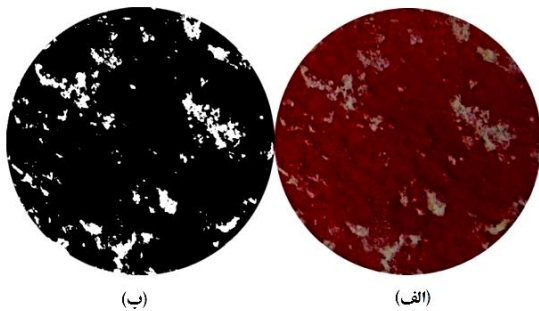


شکل ۹: نمودار اتساع - جابجایی برشی درزه‌های بتنی با مقاومت‌های مختلف به‌ازای  $\sigma_n = 2/5$  MPa،  $JRC = 18/87$ .



شکل ۱۰: نمودار اتساع - جابجایی برشی درزه‌های بتنی با مقاومت‌های مختلف به‌ازای  $\sigma_n = 0/57$  MPa،  $JRC = 7/1$ .

مساحت ناحیه تخریب از روش پردازش تصویر استفاده شد. در این روش ابتدا تصویر رنگی به تصویر خاکستری تبدیل می‌شود و سپس با مقایسه مقدار پیکسل‌های تصویر با یک مقدار آستانه<sup>۱۷</sup>، تصویر باینری به دست می‌آید که در آن نواحی تخریب شده به رنگ سفید کاملاً از نواحی سالم سطح به رنگ سیاه تفکیک شده‌اند (شکل ۱۳-ب). مقدار آستانه برای تفکیک این دو ناحیه به شدت رنگ نواحی سالم و تخریب شده بستگی دارد و بین ۰-۱ تغییر می‌کند. این مقدار در برنامه نوشته شده در محیط MATLAB به طور دستی قابل تنظیم است.



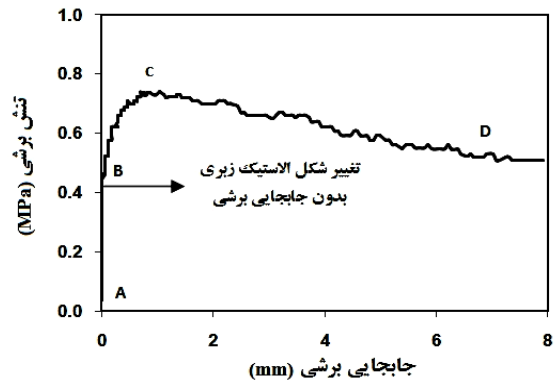
شکل ۱۳: تصویر سطح یک درزه پلاستری پس از برش، قسمت‌هایی که رنگ روشن دارند نواحی تخریب شده را نشان می‌دهند: الف) تصویر درزه برش خورده، ب) تصویر باینری.

لادانی و آرشمبولت (۱۹۷۰) مدلی برای تخمین ناحیه تخریب نسبی سطح درزه ( $a_s$ ) پس از برش به شکل زیر پیشنهاد دادند [۱۴]:

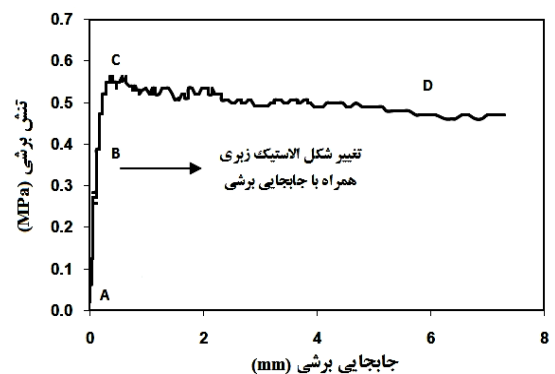
$$a_s = 1 - \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_T}\right)^k \quad 0 \leq a_s \leq 1 \quad (3)$$

در این رابطه  $\sigma_n$ : تنش نرمال،  $\sigma_T$ : مقاومت فشاری تک محوره سنگ مجاور سطح ناپیوستگی است و  $k$ : ثابت مواد است که به صورت تجربی برابر ۱/۵ در نظر گرفته می‌شود. محدودیت اصلی این مدل وارد نکردن تأثیر زبری سطح درزه و جابجایی برشی در نسبت ناحیه تخریب می‌باشد. با برآزش رابطه (۳)، بر داده‌های حاصل از آزمایش‌ها، مشخص شد که برای درزه‌های با زبری مختلف، مقادیر  $k$  مختلفی به دست می‌آید. جدول ۴، ضرایب همبستگی ( $R^2$ )، و ثابت  $k$ ، برای مقادیر مختلف زبری سطح درزه آزمایش شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. با افزایش زبری سطح درزه، مقدار  $k$  در رابطه (۳) افزایش می‌یابد و بنابراین  $a_s$  افزایش می‌یابد. با توجه به ضرایب همبستگی جدول ۴، با افزایش زبری سطح درزه کارایی رابطه (۳) جهت ارزیابی نسبت سطح تخریب شده کاهش می‌یابد.

**مقاومت باقی مانده (نقطه D):** از این نقطه به بعد تنش برشی ثابت می‌ماند و جابجایی برشی با تخریب زبری باقی مانده ادامه می‌یابد، شکل‌های ۱۱ و ۱۲.



شکل ۱۱: نمودار تنش برشی - جابجایی برشی ( $\sigma_c = 17/24$ )



شکل ۱۲: نمودار تنش برشی - جابجایی برشی ( $\sigma_c = 52/12$ )

### ۶. ناحیه تخریب سطح درزه

نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که هر چه مقدار ناحیه تخریب سطح درزه بیشتر باشد دندانها بیشتر با یکدیگر درگیر شده‌اند و در نتیجه غالب بودن مکانیزم برش دندانها، درزه مقاومت برشی بیشتری نشان می‌دهد. بنابراین دانستن تأثیر پارامترهای مختلف بر چگونگی تخریب دندانهای سطح درزه در پیش بینی مقاومت برشی نهایی بسیار اهمیت دارد.

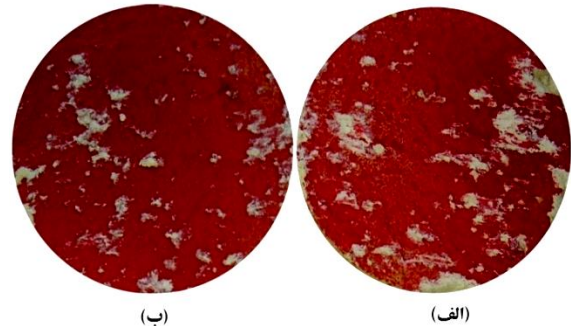
در این تحقیق با توجه به تصاویر گرفته شده از سطوح درزه‌ها پیش و پس از انجام آزمون برش مستقیم با جابجایی برشی ۸mm، و مقایسه آنها با یکدیگر به روشنی می‌توان ناحیه تخریب شده را تشخیص داد. شکل ۱۳-الف، تصویر سطح یک درزه مدل پلاستری را نشان می‌دهد که پیش از برش با رنگ پوستر قرمز رنگ آمیزی شده بود. نواحی روشن در این شکل قسمت‌های تخریب شده را نشان می‌دهند. جهت ارزیابی کمی



جدول (۴): ضرایب همبستگی ( $R^2$ )، و ثابت  $K$ ، برای مقادیر مختلف زبری سطح درزه آزمایش شده در این تحقیق.

ضریب زبری سطح درزه (JRC)	۱۸/۸۷	۱۲/۴۳	۷/۱	۴/۱۲
ضریب همبستگی ( $R^2$ )	۰/۳۹۲	۰/۵۶۵	۰/۶۹۱	۰/۷۱۹
مقدار ثابت $k$	۳/۲۳۷	۲/۲۷۱	۲/۲۰۷	۱/۶۶

با توجه به نتایج بدست آمده، مشاهده شد که در سطح پایین درزه برش بیشتری نسبت به سطح بالایی ایجاد می‌شود. علت این موضوع به تفاوت در درجه آزادی جعبه‌های بالایی و پایینی دستگاه برش بر می‌گردد. سطح پایین امکان هیچگونه جابجایی ندارد، بنابراین نیروی وارد بر آن تماماً صرف تغییر شکل و برش دندانه‌ها می‌شود. در حالی که نمونه بالایی در جعبه برش درجه آزادی دارد و مقداری از نیرو موجب جابجایی برشی و نرمال سطح بالای درزه شده، در نتیجه تغییر شکل و برش دندانه‌ها کمتر خواهد بود. بنابراین، تأثیر دندانه‌های سطح درزه و مقاومت آنها در مورد نمونه پایینی بیشتر خواهد بود. شکل ۱۴، سطوح بالا و پایین درزه بعد از برش را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴: (الف) سطوح پایین و (ب) سطح بالای درزه بعد از برش

بار نرمال بالا، جفت شدگی سطح درزه و سطح مؤثر در فرآیند برش را افزایش می‌دهد و موجب بیشتر شدن ناحیه تخریب می‌گردد. بنابراین با افزایش مقاومت فشاری دیواره درزه سطح برش درزه کاهش می‌یابد. نتایج بدست آمده نشان داد که علاوه بر مقاومت فشاری دیواره درزه و بار نرمال وارد بر سطح درزه، زبری و زاویه اصطکاک مبنای سطح درزه تأثیر قابل توجهی بر مقدار سطح تخریب شده داشته است. افزایش زاویه اصطکاک سطح درزه ( $i + \phi_b$ ) و به تبع آن مقاومت اصطکاکی بالاتر، موجب کاهش جابجایی برشی متناظر با مقاومت برشی اوج، افزایش سطح مؤثر در مقاومت برشی اوج و همچنین افزایش زمان رسیدن به مقاومت برشی ماکزیمم (برش دندانه‌های سطح درزه) شد. مجموعه این عوامل سطح برش خورده درزه را افزایش می‌دهد.

مطالبی که در این مقاله در ارتباط با رابطه‌ای که توسط لادانی و آرشمبولت (رابطه ۳) به منظور کمی کردن ناحیه برش

خورده ارائه شد نشان داد که، زبری سطح درزه تأثیر قابل توجهی بر مقدار ناحیه تخریب شده داشته است. در معیار مقاومت برشی ارائه شده توسط بارتن [۲]، زاویه اتساع سطح درزه به صورت  $i = JRC \log\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right)$  بیان شده است. نسبت  $(JCS/\sigma_n)$ ، به عنوان عامل گسیختگی دندانه‌ها می‌باشد. با توجه به نتایج آزمایش‌های صورت گرفته در این تحقیق، قبل از گسیختگی دندانه‌ها با توجه به قابلیت تغییر شکل‌پذیری مواد تشکیل دهنده دندانه‌ها در آنها تغییر شکل ایجاد می‌شود. این رفتار را می‌توان به صورت کرنش ایجاد شده در دندانه‌های سطح درزه بیان کرد. در اکثر معیارها جهت ارزیابی مقاومت برشی اوج، از پارامتر مقاومت فشاری تک محوره جهت تأثیر خصوصیات مکانیکی مواد تشکیل دهنده دندانه‌ها استفاده شده است. بر مبنای معیار بارتن (۱۹۷۶)، نسبت مقاومت فشاری به بار نرمال به عنوان عامل گسیختگی دندانه‌ها در نظر گرفته شده است و در معیار ارائه شده توسط لادانی و آرشمبولت (۱۹۶۹)، جهت ارزیابی ناحیه تخریب سطح درزه از نسبت بار نرمال به مقاومت فشاری استفاده شده است. بر این اساس و با توجه به تراکم ایجاد شده در دندانه‌های سطح درزه به دلیل نیروهای فشاری حاکم در سطح دندانه‌ها، در این تحقیق حداکثر کرنش ایجاد شده در سطح درزه تا قبل از گسیختگی دندانه‌ها به صورت نسبت  $(JCS/E)$  بیان می‌شود. علاوه بر نسبت  $(JCS/\sigma_n)$  که عامل گسیختگی دندانه‌ها می‌باشد نسبت  $(JCS/E)$  نیز به عنوان عامل تغییر شکل دندانه‌ها قبل از گسیختگی بر مقدار زبری مؤثر در فرآیند برش تأثیر گذار بوده است. با توجه به مطالب ذکر شده و استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، براساس روش‌های رگرسیون-گیری چندگانه غیر خطی، رابطه زیر جهت پیش بینی مقدار سطح تخریب شده در فرآیند برش پیشنهاد شده است:

$$\alpha_s = \left(1 - \left(1 - \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_c}\right)^k\right)\right) \cdot \tan(\phi_b + i) \quad (4)$$

$\phi_b$ : زاویه اصطکاک مبنای؛  $i$ : زاویه اتساع سطح درزه می‌باشد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها و بررسی‌های آماری صورت گرفته نشان می‌دهد که مقدار زاویه اتساع ( $i$ )، بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود (این در حالی است که استفاده از رابطه ارائه شده توسط بارتن برای تخمین زاویه اتساع همبستگی خوبی را با نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها در این تحقیق نشان نمی‌دهد):

$$i = JRC \log\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right) \log\left(\frac{JCS}{E}\right) \quad (5)$$

دلیل تراکم ایجاد شده و جفت شدگی بیشتر، سختی برشی بیشتر است. با افزایش بار برشی وارد بر سطح درزه، در بارهای برشی نزدیک به مقاومت برشی اوج، جهت نیروی برآیند وارد بر سطح درزه به صورت عمود بر دندانه‌های درگیر در فرآیند برش می‌باشد. در این حالت در مواد با قابلیت تغییر شکل بیشتر به دلیل کاهش زاویه دندانه‌ها سختی برشی به مقدار بیشتری کاهش می‌یابد.

- افزایش زاویه اصطکاک و زبری سطح درزه سطح درزه، موجب افزایش سطح تخریب شد. افزایش زاویه اصطکاک موجب کاهش جابجایی برشی متناظر با مقاومت برشی اوج، افزایش سطح مؤثر در مقاومت برشی اوج و همچنین افزایش زمان رسیدن به مقاومت برشی ماکزیمم شده است.
- به دلیل تأثیر اتساع و تغییر شکل دندانه‌ها بر مقدار زبری سطح درزه، استفاده از زبری اولیه در بررسی فرآیند برش نتایج نادرستی را بدست می‌دهد. علاوه بر نسبت  $(JCS/\sigma_n)$  به عنوان عامل گسیختگی دندانه‌ها که توسط بارتن ارائه شد، نسبت  $(JCS/E)$  نیز به عنوان عامل تغییر شکل دندانه‌ها قبل از گسیختگی بر مقدار زبری مؤثر در فرآیند برش تأثیر گذار بوده است.

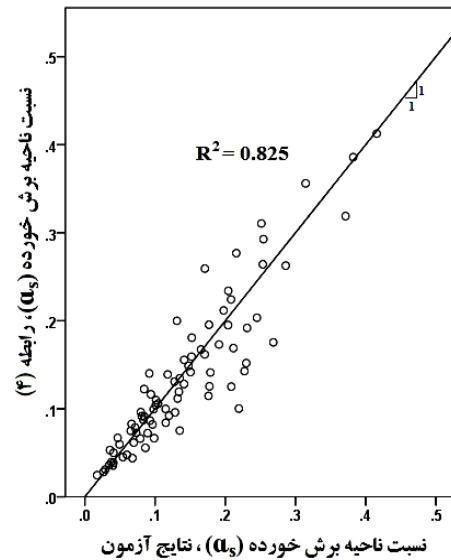
#### ۸. تشکر و قدردانی:

از کارشناسان مرکز تحقیق و توسعه و واحد آزمایشگاه مکانیک سنگ معدن گل‌گهر سیرجان که در راستای تحقق این پژوهش از هیچ‌گونه مساعدتی دریغ نکردند تشکر و قدردانی می‌شود.

#### ۹. منابع:

- [1] Jing, L., Stephansson, O; 2007; "Constitutive models of rock fractures and rock masses-the basics"; *Developments in Geotechnical Engineering*, 85:47-109.
- [2] Barton, N; 1976; "The shear strength of rock and rock joints"; *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomech. Abstr.* 13:255-279.
- [3] Haberfield, C, M., Johnston, I, W; 1994; "A mechanistically - based model for rough rock joints"; *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomech Abstr* Vol. 31, No. 4, pp. 279-292.
- [4] Seidel, J, P., Haberfield, C, M; 2002; "A theoretical model for rock joints subjected to

بر اساس برازش رابطه (۴) بر داده‌های آزمایشگاهی، مقدار ثابت  $k$  برای درزه‌های مدل سازی شده در این تحقیق برابر با  $3/5$  به دست آمد. شکل ۱۵، همبستگی نتایج آزمایشگاهی با رابطه (۴) برای مقدار  $k=3/5$  را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵: همبستگی نتایج آزمایشگاهی با رابطه (۴) برای مقدار  $k=3/5$ .

#### ۷. نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، با انجام آزمایش‌های مکانیکی بر روی درزه‌های مدل ساخته شده از بتن و پلاستر و با مورفولوژی طبیعی، به بررسی مکانیزم برش درزه در شرایط بار نرمال ثابت (CNL) پرداخته شد. این آزمایش‌ها در محدوده وسیعی از مقادیر زبری سطح، بار نرمال، خصوصیات مقاومتی و تغییر شکل پذیری انجام گرفت. نتایج حاصل از بررسی‌ها انجام شده در این مطالعه عبارت است از:

- مقایسه رفتار برشی دو درزه با زبری کاملاً یکسان و تحت بار عمودی برابر نشان داد که در بارهای عمودی کم، درزه‌های تشکیل شده از مواد با مقاومت فشاری تک محوره بالا نسبت به درزه‌های با مقاومت فشاری تک محوره پایین، مقاومت برشی کمتری را از خود نشان می‌دهند. کاهش مقاومت فشاری دندانه‌ها در بارهای نرمال پایین موجب تغییر مکانیزم غالب رفتار برشی درزه از لغزش به برش، و در نتیجه افزایش مقاومت برشی می‌شود.
- در قسمت خطی منحنی برش، برآیند نیروی وارد بر سطح درزه به صورت عمود بر سطح درزه می‌باشد. بنابراین در مواد با قابلیت تغییر شکل پذیری بالاتر به

- rough surface and parameter evolution with shearing*"; International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 39:789-800.
- [19] Homand, F., Belem, T., Souley, M; 2001; "Friction and degradation of rock joint surfaces under shear loads"; Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech, 25:973-999.
- [20] Hutson, R. W., Dowding, C, H; 1990; "Joint asperity degradation during cyclic shear"; International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomech Abstr, 2:109-119.
- [21] Lee, H, S., Park, Y, J., Cho, T, F., You, K, H; 2001; "Influence of asperity degradation on the mechanical behavior of rough rock joints under cyclic shear loading"; International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 38:967-980.
- [22] Belem, T; 2002; "Modeling rock joint walls surface degradation during the course of shearing"; Proceedings of the 55<sup>th</sup> Canadian Geotechnical and 3<sup>rd</sup> Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conferences, Niagara Falls, Ontario, 20-30.
- [23] Kwon, T, H., Hong, E, S., Cho, G, C; 2009; "Shear behavior of rectangular-shaped asperities in rock joints"; KSCE Journal of Civil Engineering, 14:323-332.
- [24] Tse, R., Cruden, D; 1979; "Estimating joint roughness coefficients"; International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomech Abstr, 16:303-7.
- [25] Barton, N., Choubey, V; 1977; "The shear strength of rock joints in theory and practice"; Rock Mech, 10:1-54.
- [26] BPB Formula company; 2000; "products catalog (Crystacal D)"; www.bpbformula.com.
- constant normal stiffness direct shear*"; International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 39:539-553.
- [5] Bandis, S, C; 1980; "Experimental studies of scale effects on shear strength and deformation of rock joints"; Ph.D. thesis, University of Leeds.
- [6] Zhao, J; 1997; "Joint surface matching and shear strength Part B: JRC-JMC shear strength criterion"; International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 34:179-85.
- [7] Zhao, J; 1997; "Joint surface matching and shear strength part A: Joint matching coefficient (JMC)"; International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 34:173-178.
- [8] Crawford, A, M., Curran, J, H; 1981; "The influence of shear velocity on frictional resistance of rock discontinuities"; International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomech. Abstr, 18: 505-15.
- [9] Indraratna, B., Haque, A; 2000; "Shear behaviour of rock joints"; Rotterdam: Balkema.
- [10] Babanouri, N., Karimi Nasab, S., Baghbanan, A., Mohamadi, H. R; 2011; "Over-consolidation effect on shear behavior of rock joints"; International Journal of Rock Mechanics & Mining sciences, 48:1283-1291.
- [11] Sri-in, T; 2007; "Effect of weathering on joint shear strength of some weak Rocks"; Ph.D. thesis, University of Technology Academic.
- [12] Patton, F, D; 1966; "Multiple modes of shear failure in rock"; Proc 1st Cong International Society for Rock Mechanics Lisbon, 1:509-513.
- [13] Itasca Consulting Group Inc; 2004; "UDEC user's guide"; version 4.0. Minneapolis.
- [14] Ladanyi, B., & Archambault, G; 1970; "Simulation of the shear behaviour of a jointed rock mass"; In Proceedings of the 11th Symposium on Rock Mechanics: Theory and Practice, Berkeley, CA, 105-125.
- [15] Gentier, S., Riss, J., Archambault, R., Flamand, R., Hopkins, D; 2000; "Influence of fracture geometry on the shear behavior"; Int J Rock Mech. Min Sci, 37:74-161.
- [16] Grasselli, G; 2001; "Shear strength of rock joints based on quantified surface description"; Doctoral Thesis, EPFL, Lausanne.
- [17] Grasselli, G., Egger, P; 2003; "Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters"; International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 40:25-40.
- [18] Grasselli, G., Wirth, J., Egger, P; 2002; "Quantitative three-dimensional description of

<sup>1</sup> Constant Normal Load

<sup>2</sup> Constant Normal stiffness

<sup>3</sup> Patton

<sup>4</sup> Ladanyi and Archambault

<sup>5</sup> Gentier

<sup>6</sup> Grasselli

<sup>7</sup> Morphology

<sup>8</sup> Porfilometer

<sup>9</sup> Tae-Hyuk Kwon

<sup>10</sup> Joint replicas

<sup>11</sup> Tilt test

<sup>11</sup> Hardner

<sup>13</sup> Hydraulic actuator

<sup>14</sup> Pressure adjustment valves

<sup>15</sup> Relief valve

<sup>16</sup> Linear Variable Differential Transformer

<sup>17</sup> Threshold