

## ارائه یک مدل خرابی ریز مکانیکی با لحاظ سازوکارهای ترک باله‌ای و ترک ثانویه به صورت توأمان تحت بارگذاری دینامیکی

محمدحسین احمدی<sup>۱\*</sup>؛ حامد ملاداودی<sup>۲</sup>؛ محمدرضا عزیزی<sup>۳</sup>

۱- پسادکتری مهندس معدن دانشگاه صنعتی امیرکبیر و امور تحقیق و توسعه مجتمع مس سونگون

۲- استادیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر- دانشکده مهندسی معدن

۳- کارشناس ارشد مهندسی معدن- دانشگاه ارومیه

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۱؛ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۱

### چکیده

مدل‌های خرابی ریز مکانیکی به‌عنوان روش‌های نوین برای در نظر گرفتن فیزیک واقعی مساله در خصوص رشد و انتشار ریزترک‌ها (جوانه‌زنی ترک‌های باله‌ای) هستند. با توجه به این‌که مواد سنگی توزیع مختلفی از ریزترک‌های اولیه از نظر اندازه و جهت‌دارند، لذا تحت بارگذاری دینامیکی اکثر ریزترک‌های ذاتی موجود در مواد سنگی فعال شده و رشد می‌کنند. مدل‌های خرابی ریز مکانیکی که تاکنون ارائه شده‌اند، خرابی ناشی از سازوکار ترک باله‌ای را در فرمول‌بندی خود در نظر گرفته‌اند. مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط محققین مختلف رشد ترک‌های ثانویه در امتداد ریزترک‌های اولیه را به اثبات رسانده است. لذا در این تحقیق سازوکار ترک ثانویه (خرابی حاصل از رشد ترک ثانویه و کرنش‌های غیر الاستیک ناشی از لغزش نامتقارن سطوح ترک ثانویه برشی) به همراه سازوکار ترک باله‌ای (خرابی حاصل از رشد ترک باله‌ای و کرنش‌های غیر الاستیک ناشی از پدیده گوه‌ای شدن) مطالعه شده است. روش همگن‌سازی خودسازگار برای لحاظ اندرکنش بین ریزترک‌ها استفاده شده است. برای اعتبارسنجی نتایج مدل خرابی ریز مکانیکی آزمایش فشاری هاپکینسون بر روی نمونه‌های سنگی سونگون پورفیری به ازای نرخ‌های کرنش دینامیکی انجام شده است. با توجه به قابلیت نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC در شبیه‌سازی بارگذاری‌های دینامیکی، فرمول‌بندی مدل خرابی ریز مکانیکی در قالب دستورات فیش در محیط این نرم‌افزار کد نویسی شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی تطابق خوبی با نتایج مطالعات آزمایش فشاری هاپکینسون بر روی نمونه‌های سنگی سونگون پورفیری دارد. لذا می‌توان استنتاج کرد که مدل خرابی ریز مکانیکی توسعه داده شده قابلیت خوبی در شبیه‌سازی فیزیک واقعی مساله تحت بارگذاری‌های دینامیکی دارد.

### واژگان کلیدی

مدل خرابی ریز مکانیکی، کرنش‌های غیرالاستیک، ترک ثانویه، آزمایش هاپکینسون، مس سونگون

### ۱- مقدمه

عوامل زیادی در پیچیدگی آن دخیل هستند. در حالت کلی دو نوع از مدل‌های خرابی برای توصیف زوال پارامترهای مکانیکی ماده، نرم شوندگی و پارامتر خرابی توسط محققان به کار گرفته می‌شوند. نوع اول مدل خرابی پدیدار شناختی

رفتار سنگ‌ها تحت بارگذاری دینامیکی یکی از موضوعات پیچیده است و تا حدودی دانش فنی در مورد آن کم بوده و

منحنی‌های تنش-کرنش شبیه‌سازی شده بر اساس مدل ارائه شده توسط پالیوال و رامش (۲۰۰۸) با منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از مدل پیشنهاد شده در این تحقیق با یکدیگر به ازای نرخ کرنش اعمالی یکسان مقایسه شده‌اند.

## ۲- مطالعات آزمایشگاهی برای تعیین پارامترهای توده سنگ

به منظور تعیین پارامترهای ورودی مدل خرابی ریز مکانیکی توسعه داده شده و همچنین اعتبارسنجی خروجی شبیه سازی‌های عددی، نمونه‌های سنگی از مجتمع معدن مس سونگون تهیه شده است. نمونه‌های سنگی از زون‌های سونگون پورفیری (SP) از مقطع شمال پیت معدن مس سونگون نمونه برداری شده‌اند. معدن مس سونگون یکی از معادن بزرگ روباز در سطح بین‌المللی است و عملیات استخراج در این معدن با استفاده از روش چال زنی و انفجار صورت می‌گیرد. در حالت کلی پارامترهای ورودی مدل رفتاری خرابی ریز مکانیکی توسعه داده شده به سه دسته کلی به شرح ذیل تقسیم بندی می‌شوند:

- پارامترهای مکانیکی (مدول یانگ و نسبت پواسون).
- پارامترهای مربوط به مکانیک شکست (چقرمگی شکست ماده تحت کشش ( $K_{IC}$ ) و برش ( $K_{IIC}$ )).
- پارامترهای ریز مکانیکی (چگالی ریز ترک، اندازه طول اولیه ریز ترک، تابع توزیع اندازه ریز ترک).

روش آزمایش دیسک برزیلی با ترک مرکزی تحت فشار قطری (CSTBD) برای تعیین چقرمگی شکست مدهای اول و دوم به دلیل آماده سازی سریع نمونه استوانه‌ای شکل از مغزه‌های تهیه شده، مناسب تر است.

یکی از چالش‌های مهم در آماده سازی نمونه مطابق با روش آزمایش (CSTBD) ایجاد ترک مرکزی در راستای ضخامت نمونه به طول  $2a$  است. با توجه به این که جنس سنگ‌ها نسبتاً سخت و با قدرت سایش بالا می‌باشند، لذا روش‌های معمول از جمله استفاده از اره مویی قابل استفاده برای ایجاد ترک مرکزی در نمونه نمی‌باشند. از این رو ابتدا با سرمته‌های الماس سوراخ‌هایی به قطر ۳ میلی‌متر با فواصل مناسب در نمونه ایجاد شد و سپس با اتصال این سوراخ‌ها به یکدیگر به کمک میز دریل رادیال و میز صلیبی، ترک مرکزی صاف در نمونه‌های تیپ سنگی مطابق با شکل ۱ ایجاد شد.

است و نوع دیگر مدل‌های خرابی بر اساس تئوری‌های ریز مکانیکی<sup>۱</sup> است. مدل‌های خرابی ریز مکانیکی مکانیسم-های فیزیکی با استفاده از پارامترهای همگن شده ماده از ریزمقیاس به بزرگ مقیاس تعمیم داده می‌شوند. مدل‌های خرابی ریز مکانیکی اولیه در حالت کلی محدود به توزیع رقیق ریز ترک‌ها بودند و از این رو توانایی لحاظ اندرکنش بین ریز ترک‌ها را نداشتند [۱، ۲، ۳]. برای غلبه بر کاستی‌های روش همگن سازی رقیق، روش‌های همگن سازی مبتنی بر اصول اشلیبی از جمله موری تاناکا (۱۹۷۳)، پونته کاستاندا و ویلیس (۱۹۹۵) و طرح خودسازگاری ابداع شده‌اند [۴، ۵، ۶].

پالیوال و رامش (۲۰۰۸) بر اساس اصول همگن سازی خودسازگاری، مدل خرابی ریز مکانیکی برای مواد شکننده حاوی ریز ترک‌های صفحه‌ای شکل تحت میدان بارگذاری فشاری دینامیکی دومحوره توسعه دادند. این مدل توانایی لحاظ توزیع آماری ریز ترک‌های موجود و همچنین پاسخ مواد سنگی نسبت به نرخ کرنش اعمالی را دارد [۷]. کاتف و گراهام بردی (۲۰۱۴) مدل ارائه شده توسط پالیوال و رامش (۲۰۰۸) را به منظور مطالعه شکست مواد شکننده حاوی ترک‌های دایره‌ای شکل تحت بارگذاری دینامیکی توسعه دادند [۸]. ایگری و همکاران (۲۰۱۸) مدل آنیزوتروپیک در فضای سه بعدی برای مطالعه جامدهای شکننده حاوی ریز ترک‌های صفحه‌ای شکل تحت بارگذاری فشاری دینامیکی ارائه دادند [۹]. نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط محققین مختلف روی نمونه‌های ترک دار تهیه شده از مواد شکننده اثبات می‌کند که گسیختگی ماده تحت بارگذاری فشاری به صورت ترکیبی از مدهای اول و دوم شکست است [۱۰]. هدف از این تحقیق توسعه مدل خرابی ریز مکانیکی بر اساس مدل خرابی توسعه داده شده توسط پالیوال و رامش (۲۰۰۸) با لحاظ جفت-شدگی بین لغزش اصطکاکی سطوح ریز ترک و خرابی ناشی از رشد ترک‌های بال و ترک‌های ثانویه تحت بارگذاری فشاری دینامیکی است. روش پیشنهاد شده برای جفت‌شدگی بین لغزش اصطکاکی سطوح ریز ترک و رشد خرابی در قالب مدل ریز مکانیکی بر اساس روش همگن سازی خودسازگاری در محیطی یکی از نرم افزارهای تجاری (FLAC) کد نویسی شده است. مدل پیشنهاد شده برای شبیه سازی یک نوع سنگ شکننده تحت بارگذاری دینامیکی به کار گرفته شده است. برای مطالعه تأثیر کرنش‌های پلاستیک بر رفتار ماده،

<sup>1</sup> Phenomenological models

2 Micro-mechanical approaches

بارگذاری قرار گرفت.

نتایج مطالعات آزمایشگاهی برای تعیین پارامترهای مکانیکی و چقرمگی شکست تیپ سنگی SP در جدول ۱ خلاصه شده است.

جدول ۱- پارامترهای مکانیکی و چقرمگی شکست تیپ سنگی SP.

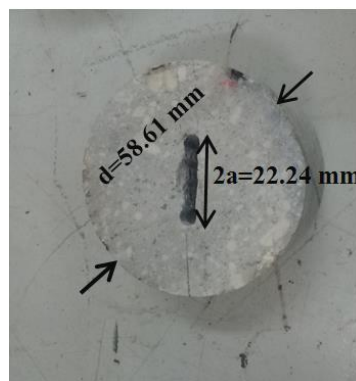
پارامتر	مقدار
$\sigma_c$ (MPa)	۳۷
$E$ (GPa)	۹/۵
$\nu$	۰/۲۳
$K_{IC}$ (MPa $\sqrt{m}$ )	۰/۷۷
$K_{IIC}$ (MPa $\sqrt{m}$ )	۱/۴

برای اجرای آزمایش هایپکینسون ( Split Hopkinson pressure bar ) بر روی تیپ سنگی SP نمونه های مکعبی شکل با ابعاد تقریباً ۲۵ میلی متری آماده سازی شدند. به طور کلی حدود ۱۵ آزمایش میله فشاری هایپکینسون بر روی نمونه های تیپ سنگی SP انجام شد. آزمایش هایپکینسون بر روی نمونه های تیپ سنگی SP در آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشگاه همدان اجرا شد [۱۱]. شکل ۲ نمایی از سیستم دستگاه هایپکینسون به کار گرفته شده را نشان می دهد.



شکل ۲- دستگاه آزمایش هایپکینسون

شبیه سازی مسائل دینامیکی دارد، لذا فرمول بندی مدل خرابی ریزمکانیکی توسعه داده شده در محیط نرم افزار FLAC با استفاده از دستورات فیش کد نویسی شده است. در تحقیق پیش رو اعمال بار به مرز بالایی هندسه به صورت سرعت برای شبیه سازی آزمایش فشاری هایپکینسون استفاده شده است. سرعت اعمالی از مرز بالایی به مدل اعمال



شکل ۱- نمونه آماده شده حاوی ترک مرکزی برای اجرای آزمایش تعیین چقرمگی شکست

برای تعیین چقرمگی شکست مد اول ( $K_{IC}$ ) نمونه آماده شده در دستگاه آزمایش به صورتی بین فک های بارگذاری قرار داده می شود که ترک ایجاد شده در نمونه هم راستا با محور بارگذاری قرار بگیرد. همچنین برای تعیین چقرمگی شکست مد دوم ( $K_{IIC}$ ) نمونه آماده شده در دستگاه آزمایش به صورتی بین فک های بارگذاری قرار داده می شود که ترک مرکزی ایجاد شده در نمونه با زاویه نسبت به محور بارگذاری قرار بگیرد. برای تعیین چقرمگی شکست مد دوم ( $K_{IIC}$ ) نمونه آماده شده در دستگاه آزمایش SANTAM آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه تربیت مدرس به صورتی بین فک های بارگذاری قرار داده شد که ترک مرکزی ایجاد شده در نمونه با زاویه ( $\alpha = 26.8^\circ$ ) نسبت به محور

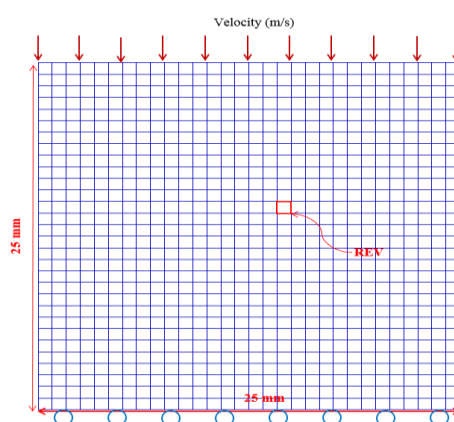
### ۳- شبیه سازی عددی

با توجه به این که در بین نرم افزارهای مورد استفاده در مهندسی سنگ، نرم افزار دوبعدی FLAC قابلیت خوبی در

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی عددی

برای شبیه‌سازی عددی مسائل مهندسی لازم است که فرمول‌بندی و الگوریتم محاسباتی توسعه داده شده در محیط یک نرم‌افزار عددی کد نویسی شود. الگوریتم مدل خرابی ریز مکانیکی توسعه داده شده در این تحقیق به صورت سه-بعدی فرمول‌بندی شده است. وجود برخی محدودیت‌های عملی در تعیین پارامترهای ریز مکانیکی به صورت سه‌بعدی از جمله پارامتر چگالی ریزترک‌ها ( $\eta$ ) به‌ناچار شبیه‌سازی از شرایط سه‌بعدی به دوبعدی تقلیل یافته است. شایان‌ذکر است در حال حاضر امکانات و تجهیزات آزمایشگاهی قادر به اندازه‌گیری پارامتر چگالی ریزترک ( $\eta$ ) به صورت حجمی (سه‌بعدی) نیست. دستگاه *SEM* برای اندازه‌گیری توزیع و چگالی ریزترک‌ها تنها قابلیت تهیه تصویر سطحی از نمونه‌ها را دارد. با توجه به این‌که در بین نرم‌افزارهای مورد استفاده در مهندسی سنگ، نرم‌افزار دوبعدی *FLAC* قابلیت خوبی در شبیه‌سازی مسائل دینامیکی دارد، لذا فرمول‌بندی مدل خرابی ریز مکانیکی توسعه داده شده در محیط نرم‌افزار *FLAC* با استفاده از دستورات فیش کد نویسی شده است. برای بازتولید رفتار کلی سنگ‌های مورد مطالعه و رفتار نگاری پارامترهای ریز مکانیکی در محدوده نرخ‌های کرنش دینامیکی در مجموع حدود ۱۰۰۰ خط با دستورات فیش کد نویسی شده است. چارچوب اصلی کد از چهار کیس<sup>۱</sup> تشکیل شده است. در کیس اول پارامترهایی محاسبه می‌شوند که در طول کل فرآیند اجرای الگوریتم و برای همه المان‌ها ثابت هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به نسبت پواسون و سرعت موج رابلی اشاره نمود. بخش اجرایی و اصلی الگوریتم در کیس دوم کد نویسی می‌شود. در این کیس تانسور تنش آزمون با فرض رفتار الاستیک به ازای نرخ کرنش اعمالی محاسبه می‌شود و بعد از محاسبه فاکتور شدت تنش در مد اول ( $K_I$ ) و مد دوم ( $K_{II}$ ) بر اساس لغزش اصطکاکی و جوانه‌زنی ترک بال و یا شروع ترک ثانویه ویرایش و به‌روزرسانی می‌شود. اثرات تمامی پارامترهای ریز مکانیکی در مدل رفتاری در قالب گیس دوم کد نویسی شده است. لذا مقادیر پارامترهای ریز مکانیکی در هر گام زمانی، مقادیر متفاوتی را تجربه می‌کنند و در هر گام زمانی برای هر المان توسط نرم‌افزار عددی مقادیر پارامترهای متغیر به‌روزرسانی می‌شود که از جمله آن‌ها می‌توان به پارامتر خرابی، طول ترک بال، طول ترک ثانویه و کرنش‌های غیر الاستیک اشاره نمود. کیس سوم در بدنه کد نویسی

می‌شود و کف مدل در راستای قائم و افق ثابت شده است. برای دستیابی به نتایج معقول و هم‌چنین تفسیر روند توزیع خرابی در مدل شبیه‌سازی شده تعداد مش در راستای  $x$  و  $y$  به تعداد کافی و برابر ۳۰ انتخاب شده است. شکل ۳ هندسه شبیه‌سازی شده و شرایط مرزی حاکم بر مساله را نشان می‌دهد. برای صحت‌سنجی مدل خرابی توسعه داده شده در پیش‌بینی رفتار دینامیکی سنگ پارامترهای واقعی ریز مکانیکی برای تیپ سنگی *SP* با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی تعیین و به‌عنوان پارامترهای ورودی در شبیه‌سازی عددی استفاده شدند. پارامترهای ورودی ریز مکانیکی برای تیپ‌های سنگی *SP* در جدول ۲ خلاصه شده است.



شکل ۳- هندسه شبیه‌سازی شده نمونه برای مطالعه عددی.

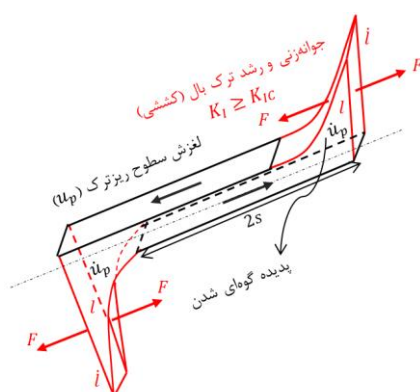
جدول ۲- پارامترهای ارزیابی شده تیپ سنگی *SP* به‌عنوان ورودی مدل رفتاری.

پارامتر	مقدار
$E$ (GPa)	۹/۵
$\mu$	۰/۴
$\nu$	۰/۲۲
$K_{IC}$ (MPa $\sqrt{m}$ )	۰/۷۷
$K_{IIC}$ (MPa $\sqrt{m}$ )	۱/۴
$2s_0$ ( $\mu m$ )	۹۶/۵
$\eta$ ( $m^{-2}$ )	$۵/۴۶ \times 10^4$
$\phi$	$۵۰/۷^\circ$

پیرامون ریزترک منفرد ایجاد می‌شود. افزایش تنش برشی بسیج شده ( $T_S^{eff}$ ) در سطوح ریزترک اولیه موجود در سنگ منجر به لغزش اصطکاکی سطوح ریزترک و جوانه‌زنی و رشد ترک‌های بال (ترک‌های کششی) از نوک ریزترک‌های اولیه می‌شود. مطابق با شکل ۴، وقوع لغزش در سطوح ریزترک و در ادامه جوانه‌زنی ترک‌های بال از نوک ریزترک منجر به ایجاد شکاف در دو انتهای ریزترک اولیه می‌گردد که به اصطلاح پدیده گوه‌ای شدن نامیده می‌شود.

بیان‌گر بیش‌ترین حد برای پارامترهای مکانیکی (مدول صلبیت و مدول برشی) است. در نهایت کیس چهارم می‌تواند تنش‌های گرمایی را در کد لحاظ نماید که در مدل توسعه داده‌شده استفاده نمی‌شود. بعد از اتمام کد نویسی در قالب کیس‌ها و دیکته کردن فرمول‌بندی مدل رفتاری توسعه داده‌شده به نرم‌افزار شبیه‌ساز، تعریف هندسه مدل، شرایط مرزی، نقاط رفتار نگاری صورت می‌پذیرد.

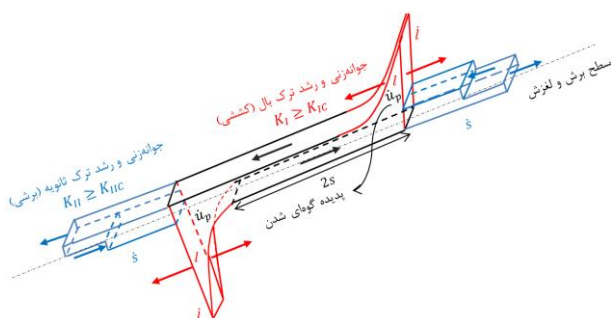
در فرمول‌بندی مدل رفتاری توسعه داده‌شده، تحت بارگذاری دینامیکی میدان دور ( $\sigma_{ij}$ ) میدان تنش محلی ( $\sigma_{ij}^e$ ) در



شکل ۴- پدیده گوه‌ای شدن در جریان لغزش اصطکاکی سطوح ریزترک و رشد ترک بال.

از نوک ریزترک اولیه بعد از اتمام فرآیند جوانه‌زنی و رشد ترک بال (ترک اولیه) صورت می‌گیرد و به همین دلیل ترک‌های برشی را ترک ثانویه نیز می‌نامند. وقوع ترک‌های ثانویه همراه با ایجاد خرابی و کرنش غیر الاستیک به صورت توأمان است. ضمن این‌که رشد ترک ثانویه باعث افزایش طول ریزترک اولیه می‌گردد. مطابق با شکل ۵، در ادامه روند توسعه مدل‌های خرابی ریزمکانیکی در مطالعه پیش‌رو سعی شده تا رشد ترک‌های ثانویه در امتداد ریزترک اولیه به همراه کرنش‌های غیر الاستیک ناشی از رشد ترک ثانویه در مدل خرابی ریزمکانیکی لحاظ شود.

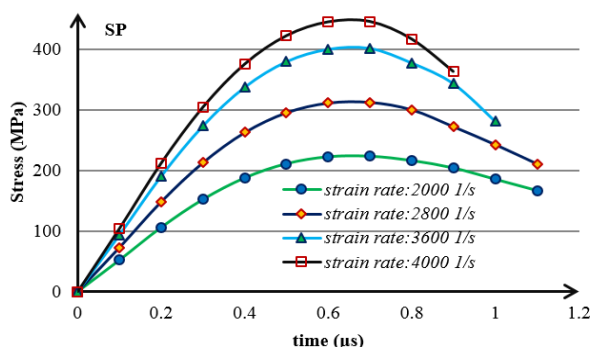
یکی از جنبه‌های نوآوری تحقیق پیش‌رو لحاظ رشد ترک‌های ثانویه در کنار سازوکار ترک بال است. در این خصوص لازم است معیار مناسبی که بتواند فرآیند جوانه‌زنی و رشد ترک‌های ثانویه در امتداد ریزترک‌های اولیه را در نظر بگیرد، توسعه داده شود. تداوم فرآیند بارگذاری منجر به افزایش تمرکز تنش پیرامون ریزترک‌ها می‌شود. با افزایش تمرکز تنش در نوک ریزترک اولیه، در یک شرایط خاصی فاکتور شدت تنش در مد دو ( $K_{II}$ ) به چقرمگی شکست ماده در مد دوم ( $K_{IIC}$ ) رسیده و باعث رشد ترک به صورت برشی از نوک ریزترک اولیه می‌گردد. البته رشد ترک برشی



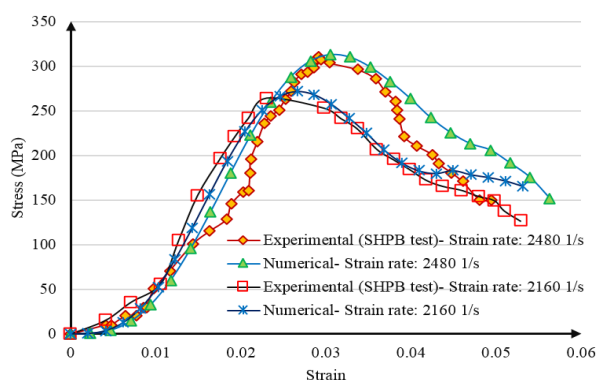
شکل ۵- رشد ترک ثانویه از امتداد ریز ترک اولیه بعد از اتمام سازوکار ترک بال.

شبیه‌سازی‌های عددی به صورت منحنی‌های تنش-زمان برای تیپ سنگی *SP* در شکل ۶ نشان داده شده است. شکل ۷، نتایج شبیه‌سازی عددی برای تیپ سنگی *SP* در المان پایش شده به همراه نتایج آزمایش فشاری هاپکینسون را به ازای نرخ‌های کرنش دینامیکی ( $\dot{\epsilon} = 2160 \frac{1}{s}$ ) و ( $\dot{\epsilon} = 2480 \frac{1}{s}$ ) نشان می‌دهند.

مقاومت فشاری ماده به ازای نرخ‌های کرنش‌های دینامیکی بیش‌تر از مقاومت فشاری ماده در محدوده نرخ-های کرنش استاتیکی است. برای مطالعه تغییرات مقاومت ماده نسبت به نرخ کرنش دینامیکی اعمالی، نمونه‌های شبیه‌سازی‌شده برای تیپ سنگی *SP* و به ازای نرخ‌های مختلف کرنش دینامیکی تحت بارگذاری قرار گرفتند. نتایج



شکل ۶- منحنی‌های تنش-کرنش به ازای نرخ‌های مختلف کرنش دینامیکی برای *SP*.

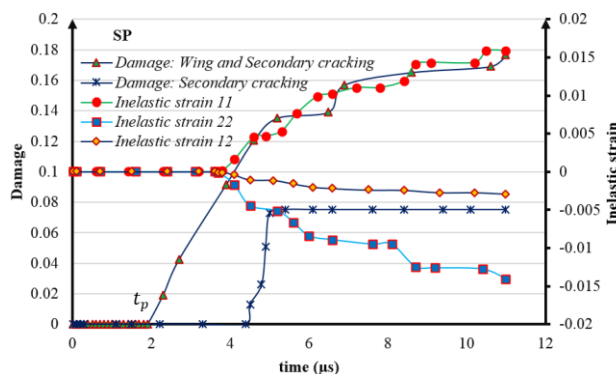


شکل ۷- نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی برای تیپ سنگی *SP*.

زمانی از نوک ریزترک اولیه جوانه‌زنی می‌کند که میزان فاکتور شدت تنش برای شکست مد دوم (برش) بیش‌تر از چقرمگی ذاتی ماده برای شکست مد دوم (برش) شود. لذا تعیین چقرمگی ذاتی شکست برای مدهای اول و دوم برای تیپ‌های سنگی که جزء پارامترهای ورودی الگوریتم مدل خرابی ریزمکانیکی توسعه داده‌شده است از اهمیت خاصی برخوردار است.

مطابق با منحنی‌های تنش- کرنش شبیه‌سازی‌شده برای تیپ سنگی *SP* برای المان‌های پایشی و آزمایش *SHPB* هم‌بستگی خوبی بین منحنی‌های تنش-کرنش شبیه‌سازی‌شده عددی بر اساس مدل خرابی ریزمکانیکی توسعه داده‌شده و نتایج حاصل از آزمایش‌ها پکینسون برای تیپ سنگی *SP* وجود دارد. البته برای اثبات پیش‌بینی تقدم وقوع فرآیندهای خرابی ناشی از جوانه‌زنی و رشد ترک بال نسبت به کرنش‌های غیر الاستیک ناشی از لغزش اصطکاکی و خرابی ناشی از رشد ترک ثانویه توسط مدل خرابی توسعه- یافته، منحنی‌های خرابی ناشی از سازوکار ترک باله‌ای ( $\Omega^w$ )، خرابی ناشی از ترک ثانویه ( $\Omega^s$ ) و کرنش‌های غیر الاستیک ( $\varepsilon_{11}^{in}, \varepsilon_{22}^{in}, \varepsilon_{12}^{in}$ ) نسبت به زمان دینامی به ازای نرخ کرنش  $\dot{\varepsilon} = 3600 \frac{1}{s}$  برای تیپ سنگی *SP* در شکل ۸ رسم شده است. در منحنی‌های خروجی حاصل از شبیه- سازی‌های عددی  $t_p$  نشان‌گر زمان منطبق بر مقاومت فشاری دینامیکی می‌باشد.

با توجه به وجود شکستگی‌های ریز در مواد سنگی از قبیل ریزترک‌ها، منافذ و عدم انطباق در مرز بین دانه‌بندی، تحت بارگذاری‌های خارجی شکست مواد در ارتباط با این نوع شکستگی‌ها است. به‌عبارت‌دیگر اعمال بار به مواد سنگی منجر به افزایش تمرکز تنش در نوک شکستگی‌های ذاتی موجود در ماده شده و درنهایت با جوانه‌زنی ریزترک‌های اولیه و ثانویه از نوک ریزترک‌ها و با به هم پیوستن ریزترک- های جدید ایجادشده صفحات شکست بزرگ‌مقیاس پدید می‌آیند. در حقیقت چقرمگی شکست نشان‌گر مقاومت ماده در برابر رشد ریزترک تحت بار اعمالی است. مکانیک شکست کلاسیک سه نوع شکست در مواد تحت بارگذاری اعمالی را تعریف می‌کند: شکست مد اول به‌صورت کشش، شکست مد دوم به‌صورت برش و شکست مد سوم به‌صورت برش خارج از صفحه. البته شکست مد دوم کاربرد عملی در اکثر پروژه- های مهندسی احداث‌شده در سازه‌های سنگی دارد. برای مثال مطالعه شکست مد دوم می‌تواند در برش‌های سنگی، شکست هیدرولیکی، خردایش سنگ، تحلیل شیروانی‌های سنگی، مکانیک زلزله و خیلی مسائل عملی دیگر کاربرد داشته باشد. جوانه‌زنی ترک بال (Wing crack) از نوک ریزترک اولیه در ماده زمانی شروع می‌شود که میزان فاکتور شدت تنش در نوک ریزترک بیش‌تر از چقرمگی ذاتی ماده برای شکست مد اول (کشش) شود. هم‌چنین ترک ثانویه



شکل ۸- منحنی خرابی و کرنش‌های غیر الاستیک نسبت به زمان دینامیکی برای *SP*.

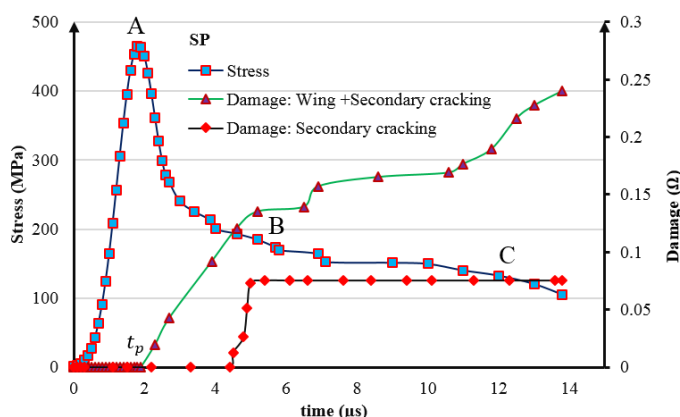
از لغزش اصطکاکی سطوح ریزترک همراه با جوانه‌زنی و رشد ترک باله‌ای اتفاق می‌افتد، لذا بعد از وقوع خرابی اولیه، کرنش‌های غیر الاستیک نیز در ماده ایجاد می‌شوند.

مطابق با شکل ۸، بعد از اقناع شرط ( $K_I = K_{IC}$ ) خرابی در ماده شروع می‌شود. در ابتدا خرابی تنها ناشی از رشد ترک باله‌ای است. از آنجایی که پدیده گوه‌ای شدن ناشی

تغییرات پارامتر خرابی و تنش نسبت به زمان دینامیکی رفتار نگاری شده است. شکل ۹ منحنی تنش، خرابی حاصل از سازوکار ترک بال و خرابی حاصل از رشد ترک ثانویه را نسبت به زمان دینامیکی برای تیپ‌های سنگی  $SP$  به ازای نرخ کرنش  $\dot{\epsilon} = 3600 \text{ 1/s}$  نشان می‌دهد.

سازوکارهای مذکور باعث افزایش تمرکز تنش و ایجاد ترک-های ثانویه می‌شوند که رشد خرابی ناشی از این فرآیند نیز به میزان خرابی ناشی از ترک باله‌ای اضافه می‌شود.

پارامتر خرابی کل در ماده تحت بارگذاری دینامیکی بر اساس مدل خرابی توسعه داده شده به صورت مجموع خرابی حاصل از رشد ترک بال از نوک ریزترک اولیه و رشد ترک ثانویه در امتداد ریزترک اولیه است. برای مطالعه روند



شکل ۹- منحنی تنش، خرابی حاصل از ترک بال و ترک ثانویه برشی برای تیپ سنگی  $SP$ .

ریزترک‌ها زودتر به مقدار چقرمگی شکست می‌رسد. البته با تداوم بارگذاری امکان دارد برخی ریزترک‌های کوچک‌تر نیز فعال شوند. برخلاف بارگذاری در محدوده نرخ‌های کرنش شبه استاتیکی ( $\frac{1}{s} \leq 10^{-1} \dot{\epsilon}$ )، تحت بارگذاری دینامیکی در مدت‌زمان خیلی کوچک (در حد میکروثانیه) تقریباً اکثر ریزترک‌های اولیه موجود در ماده فعال می‌شوند. البته بسته به نرخ کرنش اعمالی تعداد ریزترک‌های فعال شده می‌تواند متفاوت باشد. از آنجایی که اندرکنش ریزترک‌ها به دلیل ارتباط ریزترک‌های مجاور هم صورت می‌گیرد، لذا هرچه تعداد بیش‌تری از ریزترک‌ها فعال شوند میزان اندرکنش بین ریزترک‌ها نیز بیش‌تر می‌شود. در محدوده نرخ‌های کرنش پایین هریک از ریزترک‌ها فقط با ریزترک-های اطراف خود اندرکنش دارند اما با افزایش نرخ کرنش اعمالی، حوزه اندرکنش ریزترک‌ها گسترده‌تر می‌شود و ریزترک‌ها هم‌زمان می‌توانند با چندین ریزترک در اطراف خود اندرکنش داشته باشند.

برای بررسی تأثیر نرخ کرنش اعمالی بر ریزساختار ماده، افزایش طول اولیه ریزترک و طول ترک بال به ازای

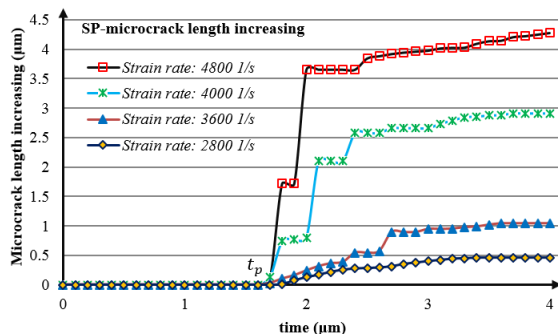
چنانچه در شکل ۹ مشاهده می‌شود، تا زمان رسیدن به مقاومت فشاری حداکثر که به ازای ( $K_I = K_{IC}$ ) رخ می‌دهد، هیچ خرابی در ماده ایجاد نمی‌شود و پارامتر خرابی کل برابر با صفر است ( $\Omega = 0$ ). به ازای تنش معادل مقاومت فشاری حداکثر خرابی در ماده آغاز می‌شود. شایان‌ذکر است خرابی ایجاد شده در ابتدا صرفاً ناشی از رشد ترک بال از نوک ریزترک اولیه است. وقوع خرابی اولیه همراه با ایجاد کرنش‌های غیر الاستیک ناشی از لغزش اصطکاکی سطوح ریزترک اولیه نیز است. بعد از اقناع شرایط ( $K_{II} = K_{IIC}$ ) رشد ترک ثانویه در امتداد ریزترک اولیه صورت می‌گیرد و از این مرحله به بعد میزان خرابی ناشی از رشد ترک ثانویه نیز به خرابی حاصل از رشد ترک بال اضافه می‌شود.

مواد شکننده ذاتاً دارای ریزترک‌های اولیه هستند که اندرکنش ریزترک‌ها تحت بارگذاری با نرخ‌های کرنش مختلف رفتار کلی ماده را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در بارگذاری‌های استاتیکی فقط ریزترک‌هایی فعال می‌شوند که اندازه بزرگ‌تری دارند و ضریب شدت تنش در نوک

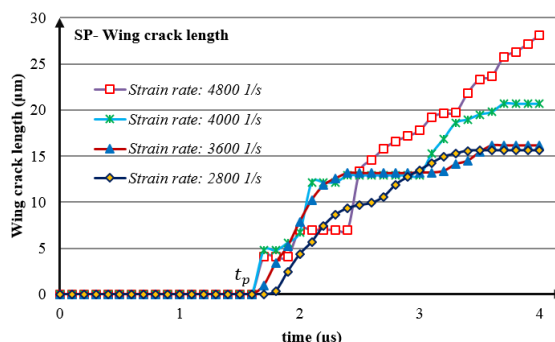


عددی برای تیپ سنگی SP در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

نرخ‌های کرنش  $\dot{\epsilon} = (2800, 3600, 4000, 4800) \frac{1}{s}$  برای تیپ سنگی SP مطالعه شده است. نتایج شبیه‌سازی



(الف)



(ب)

شکل ۱۰- منحنی تأثیر افزایش نرخ کرنش اعمالی بر روی طول ریزترک اولیه و طول ترک بال در نمونه SP.

تطابق خوبی با یکدیگر مخصوصاً در مرحله بعد از مقاومت فشاری دینامیکی دارند. لذا می‌توان ادعا نمود که مدل خرابی ریزمکانیکی توسعه داده شده توانمندی بالایی در جهت شبیه‌سازی فیزیک واقعی مسائل مهندسی سنگ تحت بارگذاری‌های دینامیکی دارد. به ازای تنش معادل مقاومت فشاری حداکثر، خرابی در ماده آغاز می‌شود. شایان ذکر است خرابی ایجاد شده در ابتدا صرفاً ناشی از رشد ترک بال از نوک ریزترک اولیه است. وقوع خرابی اولیه همراه با ایجاد کرنش‌های غیر الاستیک ناشی از لغزش اصطکاکی سطوح ریزترک اولیه نیز است. بعد از اقناع شرایط ( $K_{II} = K_{III}$ ) رشد ترک ثانویه در امتداد ریزترک اولیه صورت می‌گیرد و از این مرحله به بعد میزان خرابی ناشی از رشد ترک ثانویه نیز به خرابی حاصل از رشد ترک بال اضافه می‌شود.

مطابق با شکل ۱۰، با افزایش نرخ کرنش دینامیکی میزان افزایش طول ریزترک اولیه طی فرآیندهای افزایش سطوح ریزترک و گوه‌ای شدن ناشی از لغزش بیشتر می‌شود. البته این افزایش طول به صورت تصاعدی است و افزایش اندک در میزان نرخ کرنش منجر به افزایش چشم‌گیر در طول ریزترک اولیه می‌شود. شایان ذکر است طول ترک بال نیز با افزایش نرخ کرنش اعمالی افزایش می‌یابد. افزایش طول اولیه ریزترک و طول ترک‌های بال با افزایش نرخ کرنش اعمالی موجب افزایش اندرکنش و اتصال بین ریزترک‌ها می‌شود و ترکیب‌های مختلفی از اندرکنش و اتصال بین ریزترک‌ها شکل می‌گیرد.

## ۵- نتیجه‌گیری

بررسی منحنی‌های تنش-کرنش نشان می‌دهد که منحنی‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های پکینسون

[10] Bobet, A., Einstein, H.H. Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 1998: 35, 863-888.

[11] Ahmadi, M.H., Molladavoodi, H. An inelastic-damage micromechanical model based on the wing- and secondary-cracking mechanisms under dynamic loading. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 108 (2020) 102618.

## ۶- تشکر و قدردانی

در پایان تحقیق جا دارد از همکاری‌های واحد تحقیق و توسعه مجتمع مس سرچشمه (مهندس حسینی) و مجتمع مس سونگون (مهندس میرزاپور، مهندس عزیز افشاری، مهندس عبدلی) تقدیر و تشکر کنیم.

## ۷- منابع

[1] Zhu Q.Z., Shao J.F., Kondo D. A micromechanics-based thermodynamic formulation of isotropic damage with unilateral and friction effects. *Euro. J. Mech. Solids*. 2011: 30, 316-325.

[2] Molladavoodi H., Sliding and damage criteria investigation of a micromechanical damage

[3] Horri, H., Nemat-Nasser, S. Brittle failure in compression: splitting, faulting and brittle-ductile transition. *J. Phil. Trans. R. Soc. A*. 1986. 337-374.

[4] Xie N., Zhu Q.Z., Xu L.H., Shao J.F., A micromechanics-based elastoplastic damage model for quasi-brittle rocks. *Computers and Geotechnics* 2011: 38, 970-977.

[5] Hu, G., Liu, J., Graham-Brady, L., Ramesh, K.T. A 3D mechanistic model for brittle materials containing evolving flaw distributions under dynamic multiaxial loading. *J. Mech. Phys. Solids*. 2015:78, 269-297.

[۶] احمدی، محمدحسین، ملاداوودی، حامد، "ارائه یک

مدل خرابی ریز مکانیکی برای مواد شکننده تحت بارگذاری

فشاری تک‌محوره با نرخ کرنش بالا": نشریه علمی-

پژوهشی منابع مهندسی، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۷

[7] Paliwal, B., Ramesh, K. An interacting micro-crack damage model for failure of brittle materials under compression. *J. Mech. Phys. Solids*. 2008: 56, 896-923.

[8] Katcoff, C., Graham-Brady, L. Modeling dynamic brittle behavior of materials with circular flaws or pores. *Int. J. Solids. Struct.* 2014: 51, 754-766.

[9] Ayyagari, R.S., Daphalapurkar, N.P., Ramesh, K.T. The effective compliance of spatially evolving planar wing-cracks. *J. Mech. Phys. Solids*. 2018: 111, 503-529.

