

مطالعه عددی تاثیر نرخ بارگذاری بر الگوی گسیختگی نمونه‌های سنگی ترک‌دار

امین خدایار^۱، حمیدرضا نجاتی^{۲*}

^۱ دانش آموخته گروه مهندسی مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس؛ aminkhodayar70@gmail.com

^۲ گروه مهندسی مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس؛ h.nejati@modares.ac.ir

چکیده:

شرایط بارگذاری علاوه بر اینکه روی مقاومت و ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌های سنگی تأثیرگذار است، فرآیند ایجاد و گسترش ترک در نمونه‌ها را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این تحقیق فرآیند رشد و انتشار ترک در نمونه‌های گرانیتی حاوی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۳۶ پیش‌ترک، تحت نرخ‌های بارگذاری مختلف و با استفاده از نرم‌افزار RFPA مورد مطالعه قرار گرفته است. برای اعمال نرخ‌های بارگذاری مختلف، از تغییرات میزان جابه‌جایی صفحه بارگذاری در مراحل مختلف استفاده شده است. نرخ‌های بارگذاری مورد مطالعه در این تحقیق ۰/۰۰۲، ۰/۰۲ و ۰/۲ میلی‌متر در هر مرحله بارگذاری است. در این تحقیق تأثیر هم‌زمان چگالی پیش‌ترک و نرخ بارگذاری بر نحوه شروع و انتشار ترک و الگوی شکست نهایی نمونه‌ها بررسی شده است. در مراحل اولیه بارگذاری ابتدا ترک باله‌ای از انتهای ترک‌های موجود رشد کرده و با ادامه روند بارگذاری روی نمونه، ترک‌های برشی ثانویه شامل ترک‌های مورب و شبه صفحه‌ای تشکیل شده‌اند. با افزایش نرخ بارگذاری از طول ترک‌های باله‌ای کاسته شده بطوریکه که می‌توان گفت در نرخ بارگذاری ۰/۲ هیچ ترک باله‌ای ایجاد نمی‌شود بلکه در ابتدای بارگذاری ترک شبه صفحه‌ای از نوک ترک‌های موجود انتشار می‌یابد. در نمونه‌های حاوی پیش‌ترک بیشتر ترک‌های باله‌ای اغلب از نوک ترک‌های کناری انتشار می‌یابند. در نمونه‌های با تعداد پیش‌ترک کم (نمونه‌های حاوی ۱، ۳، ۶ و ۹ پیش‌ترک) و در نرخ‌های بارگذاری پایین، ترک‌های برشی مورب غالب هستند بطوریکه شکل شکست نهایی نمونه را تعیین می‌کنند. با افزایش نرخ بارگذاری انتشار ترک‌های برشی شبه صفحه‌ای نیز آغاز می‌شود به نحوی که در نرخ بارگذاری ۰/۲ تعیین‌کننده شکل شکست نهایی می‌باشند. در نمونه حاوی ۳۶ پیش‌ترک، مستقل از نرخ بارگذاری ترک‌های برشی شبه صفحه‌ای تعیین‌کننده تر هستند. با افزایش نرخ بارگذاری تا ۰/۲ در این نمونه، ابتدا قطعه‌های کوچکی از اطراف نمونه جدا می‌شود و در ادامه، شکست نهایی به صورت صفحه برشی در جهت انتشار ترک‌های شبه صفحه‌ای خواهد بود.

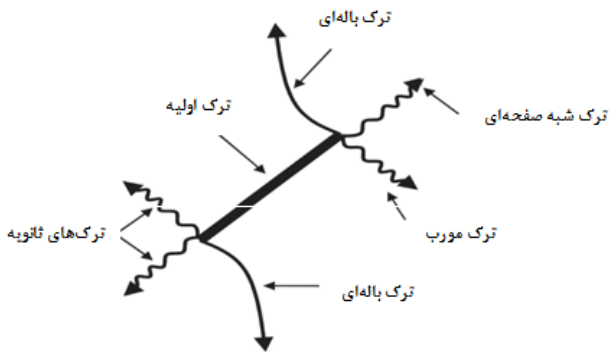
کلمات کلیدی:

نمونه‌های ترک‌دار، نرخ بارگذاری، چگالی پیش‌ترک، مطالعه عددی، گسترش ترک

۱- مقدمه

ناپیوستگی‌ها به‌عنوان جزء جدانشدنی توده‌های سنگی تأثیر به‌سزایی در رفتار مکانیکی توده سنگ داشته و باعث کاهش مقاومت در توده سنگ می‌شوند؛ بنابراین لزوم شناخت و بررسی رفتار ناپیوستگی‌ها در سنگ اهمیت زیادی دارد [۱]. اولین مطالعه آزمایشگاهی روی رشد ترک، توسط گریفیث^۱ در سال ۱۹۲۱ انجام شد. وی برای اولین بار، تئوری خود را با انجام آزمایش کشش بر روی پلاکی از شیشه که دارای ترکی به طول مشخص بود، ارائه داد. بر این اساس، زمانی که ماده تحت کشش قرار می‌گیرد، در نوک ترک تمرکز تنش کششی ایجاد می‌شود. زمانی که این تنش به یک حد بحرانی برسد، ترک شروع به پیشروی کرده و نهایتاً شکست اتفاق می‌افتد. طبق این معیار، تنش لازم برای ایجاد شکست، با طول ترک اولیه نسبت عکس دارد، یعنی هرچه طول ترک اولیه کوتاه‌تر باشد، تنش لازم برای رشد ترک بیشتر خواهد بود. وی در ادامه، تئوری خود را برای حالت فشاری بسط داده و دریافت که اگر $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} < \frac{1}{3}$ ، آنگاه شکست هنگامی رخ می‌دهد که $\sigma_3 = -\sigma_t$ باشد. همچنین اگر $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} > \frac{1}{3}$ ، آنگاه شکست زمانی اتفاق می‌افتد که $8\sigma_t = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 + \sigma_3)}$ در روابط ارائه‌شده، σ_1 و σ_3 به ترتیب تنش‌های اصلی و جانبی وارد بر نمونه حاوی درزه و σ_t مقاومت کششی ماده بکر می‌باشد. از آنجاکه گریفیث در مطالعات خود از اثر اصطکاکی سطح درزه‌ها چشم‌پوشی کرده بود، لذا مک کلینتاک و وش^۲ ۱۹۶۷ با در نظر گرفتن اثر اصطکاکی سطوح درزه‌ها، معیار گریفیث را اصلاح نمودند [۲].

هوک و بینیاوسکی^۳ ۱۹۸۴، هری و نعمت ناصر^۴ ۱۹۸۵ و بوبت^۵ ۲۰۰۵، با انجام آزمایش تک‌محوره در نمونه‌های شبه سنگی حاوی یک درزه، مکانیسم ایجاد ترک و نحوه پیشروی آن را تحت بررسی قرار دادند [۲]. بر این اساس، زمانی که یک نمونه شبه سنگی حاوی پیش‌ترک مورب تحت تنش فشاری قرار می‌گیرد، الگوی ترک‌های ایجادشده در آن، مطابق شکل ۱ می‌باشد:



شکل ۱- الگوی ترک‌های ایجادشده در نمونه شبه سنگی حاوی پیش‌ترک، تحت فشار تک‌محوره [۳].

۱- ترک‌های کششی که به Wing crack معروف‌اند. این ترک‌ها اغلب تحت زاویه‌ای نسبت به نوک پیش‌ترک شروع شده و به سمت تنش ماکزیمم پیشروی می‌کنند.

۲- ترک‌های برشی که به Secondary Crack مشهورند، اغلب از نوک درزه‌ها آغاز می‌گردند خود به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند.

۱- ترک‌های شبه صفحه‌ای که به Quasi-Coplanar Crack معروف بوده و در امتداد درزه پیشروی می‌کنند. ۲- ترک‌های مورب که به Oblique Crack مشهور بوده و در امتداد ترک‌های اولیه ولی در جهت مخالف شکل می‌گیرند [۴].

جهت بررسی جزئی‌تر مراحل رشد ترک در سنگ‌ها، یک سری آزمایش‌های فشاری تک‌محوری بر روی نمونه‌های مصنوعی ساخته شده از گچ حاوی پیش‌ترک با هندسه‌ها و امتدادهای بارگذاری مختلف ترک، توسط لاجتای^۶ انجام گرفت. بر اساس این مطالعه مطابق شکل ۲ مراحل مختلف رشد ترک به‌صورت زیر است [۵].

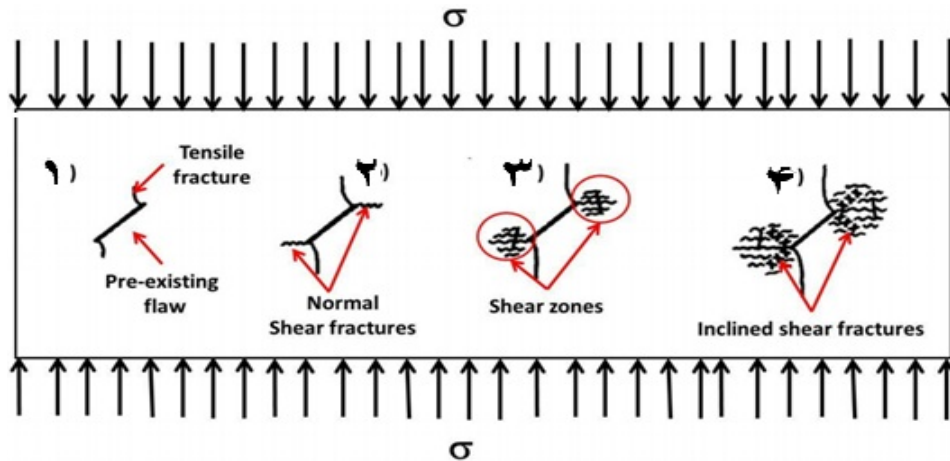
۱- شکست کششی: در ابتدای بارگذاری و در یک مسیر پایدار و منحنی‌وار رشد کرده و در نهایت موازی امتداد بارگذاری گسترش می‌یابند.

۲- شکست برشی نرمال: میکرو ترک‌ها از نوک پیش‌ترک اولیه و از یک ناحیه تحت تنش فشاری شروع شده و در جهت عمود بر امتداد بارگذاری گسترش می‌یابند.

۳- توسعه شکست کششی و برشی نرمال: با افزایش

1- Griffith
2- McClintock and Walsh
3- Hoek and Bieniawski
4- Horii and Nemat-Nasser
5- Bobet

بارگذاری، یک زون برشی در اطراف نوک پیش ترک تولید می‌شود. ۴- توسعه زون برشی در امتداد ترک: در اثر کاهش مقاومت چسبندگی در ماده، یک زون شکست برشی شیب‌دار در زون برشی اولیه تشکیل می‌شود.



شکل ۲- الگوی شکست مشاهده شده در نمونه‌های حاوی پیش ترک مصنوعی باز [۵].

باشد. صفحه شکست ترک‌های برشی نیز زبر و ناصاف می‌باشد [۶]. بررسی‌های صورت گرفته در این آزمایش توسط بوبت و پارک به این نتیجه‌گیری مهم ختم می‌شود که در نمونه‌های شکننده، مکانیسم شکست و رشد ترک بر اثر درگیر شدن ترک‌های کششی صورت می‌پذیرد، حال اگر ترک‌های کشش به نحوی متوقف شوند (برای مثال بر اثر فشار محصورکننده) گسترش و همرسی ترک‌های برشی سبب شکست خواهند شد که این امر نیز به نسبت حالت قبلی نیازمند تنش بالاتری می‌باشد [۶].

عموماً رفتار مکانیکی سنگ‌ها تحت بارگذاری شبه استاتیک و دینامیک متفاوت است. بسیاری از مطالعات گذشته نشان می‌دهد که مقاومت فشارشی و کششی بسیاری از مواد شکننده از جمله سنگ به نرخ کرنش وابسته است [۷]. سه مود مربوط به چقرمگی شکست که توانایی مواد ترک‌دار در مقابل شکست را نشان می‌دهد نیز به نرخ کرنش یا نرخ بارگذاری وابسته هستند [۸]. بنابراین نرخ کرنش یا نرخ بارگذاری بر ویژگی‌های مکانیکی از قبیل مقاومت، چقرمگی شکست یا نحوه شروع و گسترش ترک تأثیرگذار است [۹]. فرآیند ایجاد ترک در سنگ یا مواد شبه سنگی تحت نرخ‌های کرنش پایین به‌طور گسترده و به‌صورت آزمایشگاهی

در این بررسی مشاهده شد که ترک‌های ثانویه در یک فاصله کمی از نوک پیش ترک اولیه شروع به رشد کرده و به طرفین حرکت کرده‌اند و از همان ابتدا از محل نوک پیش ترک شروع به رشد نکرده‌اند [۵].

مسئله مهم در پایداری و یا ناپایداری نمونه دارای پیش ترک تحت بار، نوع همرسی^۱ این ترک‌هاست. به‌گونه‌ای که اگر همرسی، بین ترک‌های باله‌ای و یا ترکیبی از ترک‌های باله‌ای و ترک‌های ثانویه اتفاق بیافتد، سیستم پایدار می‌باشد؛ اما اگر همرسی میان ترک‌های ثانویه باشد سیستم ناپایدار خواهد شد که البته این نوع همرسی نیازمند سطح بالایی از تنش می‌باشد [۷]. این نتیجه‌ای است که بوبت^۲ و پارک^۳ از آزمایش بر روی نمونه‌های مکعبی ساخته شده از گچ حاوی یک، دو و شانزده پیش ترک مصنوعی به دست آوردند.

ایشان همچنین بیان کردند که همرسی ترک‌های برشی نسبت به حالت ترکیبی در تنش‌های نسبتاً بالایی صورت می‌گیرد. به‌عبارت‌دیگر در مراحل اول بارگذاری تمایل سیستم این است که یک ترک بالی با یک ترک برشی اتصال داشته

1- Coalescence
2- Bobet
3- Park

بررسی شده است [۱۰]. از طرف دیگر نمونه‌های بکر و نمونه‌های دارای ترک مصنوعی تحت بارگذاری فشارشی و در شرایط شبه استاتیک به خوبی از نظر شروع و گسترش ترک مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۱۱]. تحت بارگذاری دینامیکی تئوری مکانیک شکست برای حالت بارگذاری شبه‌استاتیک، کاربرد ندارد. با این وجود تحقیقات کمی روی فرآیند ایجاد ترک تحت نرخ‌های کرنش مختلف انجام شده است [۱۲].

در بیشتر مطالعاتی که در این باره انجام شده است غالباً روی نمونه‌های بکر یا توده سنگ‌هایی در مقیاس بزرگ متمرکز شده‌اند. درحالی‌که بیشتر سنگ‌ها شامل نقص‌های ذاتی یا ریزترک‌ها هستند. مطالعه رشد ترک دینامیکی در نمونه‌های ترک‌دار اهمیت زیادی در مطالعات انفجار یا آتشباری در سنگ‌ها دارد. در این تحقیق فرآیند دینامیکی گسترش ترک در نمونه‌های گرانیب با چگالی ترک‌های مختلف به صورت عددی بررسی شده است.

۲- مدل‌سازی عددی رشد ترک

در سال‌های اخیر شاهد افزایش علاقه محققین به مدل‌سازی عددی شکست و گسیختگی سنگ هستیم. تلاش‌ها در این زمینه جهت آگاهی از مکانیسم شکست، بهبود امکانات آنالیز و توسعه روش‌های عددی برای مهندسی، بسیار ضروری است. مشاهده ساختارهای داخلی و خارجی سنگ، یک فهم بسیار خوب از رفتار شکست آن فراهم می‌کند [۱۳]. به‌طور عمومی پذیرفته شده است که تغییر شکل سنگ شامل پدیده‌های بسیار پیچیده‌ای با عنوان شروع، گسترش و هم‌رسی ریزترک‌ها است [۱۴]. روش‌های عددی بسیاری مانند المان محدود، المان مجزا و المان مرزی جهت مدل‌سازی تغییر شکل‌پذیری و شکست سنگ استفاده شده است ولی برخی از این روش‌ها برای بررسی تاثیر ناهمگنی^۱ در سنگ‌ها محدودیت‌هایی را دارند. [۱۵، ۱۶]. مکانیک شکست الاستیک خطی امروزه ابزار اصلی جهت آنالیز مسائل گسترش ترک در جامدات می‌باشد. اما این روش فقط برای مواد همگن با یک ترک یا چند ترک منظم

قابل استفاده است نه برای مواد ناهمگن با رفتار شبه‌شکننده مانند سنگ، بتن و سرامیک [۱۴]. بنابراین جهت مدل‌سازی مکانیسم شکست این قبیل مواد، برنامه‌ای با قابلیت در نظر گرفتن ناهمگنی نمونه‌ها مورد نیاز است. از این‌رو در سال‌های اخیر محققین جهت مطالعه تاثیر ناهمگنی سنگ‌ها بر تغییر شکل‌پذیری و فرایند شکست آنها مدل‌های میکرومکانیکی را ارائه کرده‌اند. در این مدل‌ها با فرض توزیع مشخص (مثلاً توزیع ویبول^۲) برای ویژگی‌های مختلف سنگ مانند مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و چگالی، تغییرات خواص بافت سنگ‌ها و میزان ناهمگنی آنها شبیه سازی می‌شود. از جمله نرم افزارهایی که بر این اساس توسعه یافته‌اند، نرم افزار عددی تحلیل فرایند شکست سنگ^۳ (RFPA) می‌باشد که توسط تانگ و هادسون توسعه داده شده است. همان‌گونه که اشاره شد در این نرم‌افزار از تابع چگالی احتمال ویبول (رابطه ۱) جهت بیان تغییرات خواص مکانیکی نمونه‌های ناهمگن استفاده می‌شود [۱۷].

$$f(u) = \frac{m}{u_0} \left(\frac{u}{u_0} \right)^{m-1} \exp \left(- \frac{u}{u_0} \right)^m \quad (1)$$

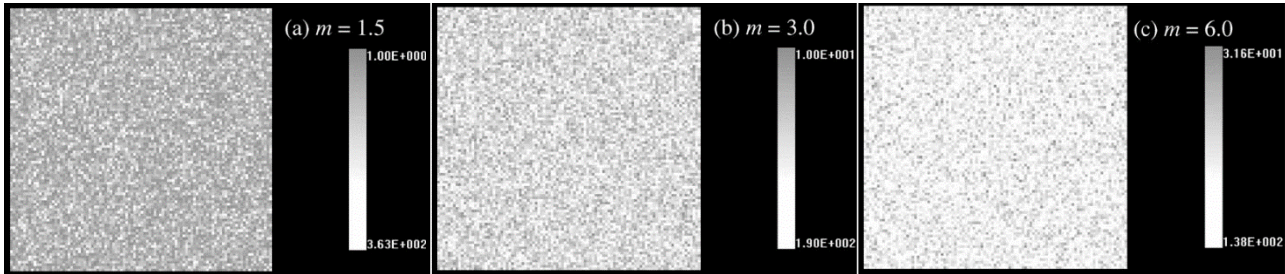
که در آن u پارامتر تخصیص داده شده به المان‌ها همچون مقاومت یا مدول الاستیسیته، u_0 مقدار اولیه پارامتر m به‌عنوان فاکتور همگنی ماده تعریف می‌شود. شکل ۳ سه نمونه موجود در کتابخانه نرم‌افزار RFPA متشکل از ۱۰۰۰۰ المان با سه درجه ناهمگنی متفاوت می‌باشد. تغییرات رنگ خاکستری مربوط به تغییرات در مقاومت تخصیص داده شده به المان‌ها به دلیل تفاوت در درجه همگنی نمونه‌ها می‌باشد.

نمودار شکل ۴ توزیع مقاومت را برای این سه نمونه نشان می‌دهد. مطابق شکل با افزایش مقدار m ، توزیع پارامتر تخصیص داده شده به المان‌ها به‌صورت همگن و متقارن در سراسر المان‌ها توزیع می‌شود. در نتیجه با افزایش m تعداد المان‌های بیشتری دارای مقاومت نزدیک به مقدار تعریف شده (u_0) می‌باشند.

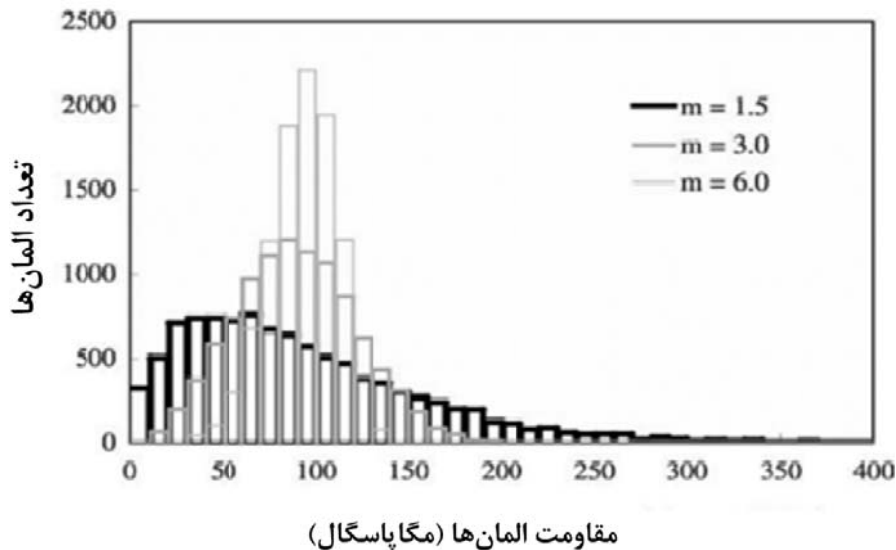
2- Weibull distribution

3- Rock Fracture Process Analysis (RFPA)

1- Heterogeneity



شکل ۳- توزیع مقاومت نمونه‌ها با سه شاخص همگنی متفاوت [۱۷].



شکل ۴- نمودار مقاومت المان‌ها در نمونه‌های عددی با شاخص‌های همگنی متفاوت (پارامتر ویبال برابر ۱۰۰ می‌باشد) [۱۷].

آورده شده است. جهت بررسی عددی رفتار نمونه‌های سنگی، مدل‌هایی با ابعاد ۵۴ میلی‌متر در ۱۱۰ میلی‌متر و در حدود ۲۳۷۶۰ المان تولید شده است. صفحه‌های بارگذاری نیز با مدول یانگ ۲۱۰ گیگا پاسکال و مقاومت فشاری ۸۰۰ مگا پاسکال به صورت همگن مدل‌سازی شده‌اند (شکل ۶). طول ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌های حاوی پیش‌ترک ۵ میلی‌متر و شیب آن‌ها ۴۵ در نظر گرفته شده است (شکل‌های ۷ تا ۲۱).

جدول ۱- پارامترهای مربوط به مدل‌سازی عددی برای نمونه‌ها

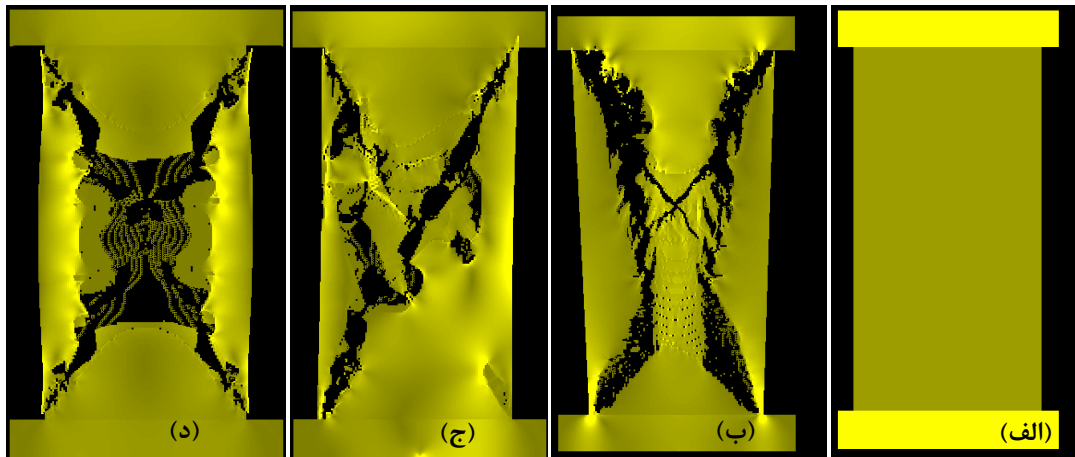
نسبت مقاومت فشاری به کششی	پارامتر m	نسبت بواسون	مقاومت (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
۱۷/۲	۵۰	۰/۲۵	۱۸۲/۵	۴۶

از دیگر قابلیت‌های این نرم‌افزار، مدل‌سازی فرایندهای صوتی در طول آزمایش برای نمونه‌های مدل شده می‌باشد. به گونه‌ای که محل، تعداد و انرژی معادل برای هر رویداد را در طول بارگذاری مشخص می‌نماید. شعاع هر دایره معرف بزرگی رخداد و انرژی بالای آن نسبت به سایر رخدادها است.

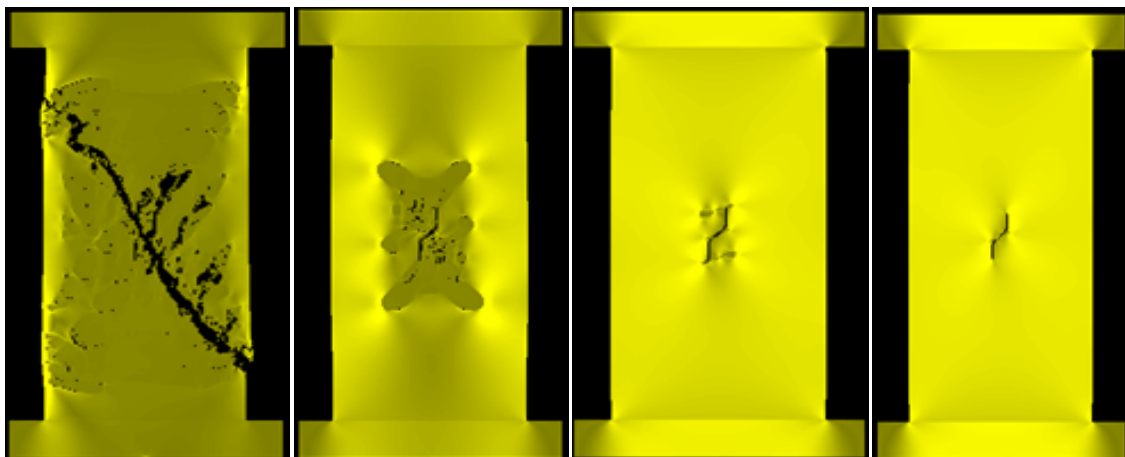
برای بررسی نحوه انتشار ترک و الگوی شکست نهایی نمونه‌هایی با چگالی ترک مختلف (نمونه‌های حاوی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۳۶ پیش‌ترک) و تحت نرخ بارگذاری متفاوت (۰/۰۲، ۰/۰۲، ۰/۲ و ۰/۲ میلی‌متر در هر مرحله بارگذاری) مدل‌هایی در نرم‌افزار RFPA ساخته شده است. مقدار پارامترهای مربوط به مدل‌سازی از انجام آزمون‌های فشاری تک‌محوره روی نمونه‌های استوانه‌ای گرانیب مطابق شکل ۵ به دست آمده و در جدول ۱



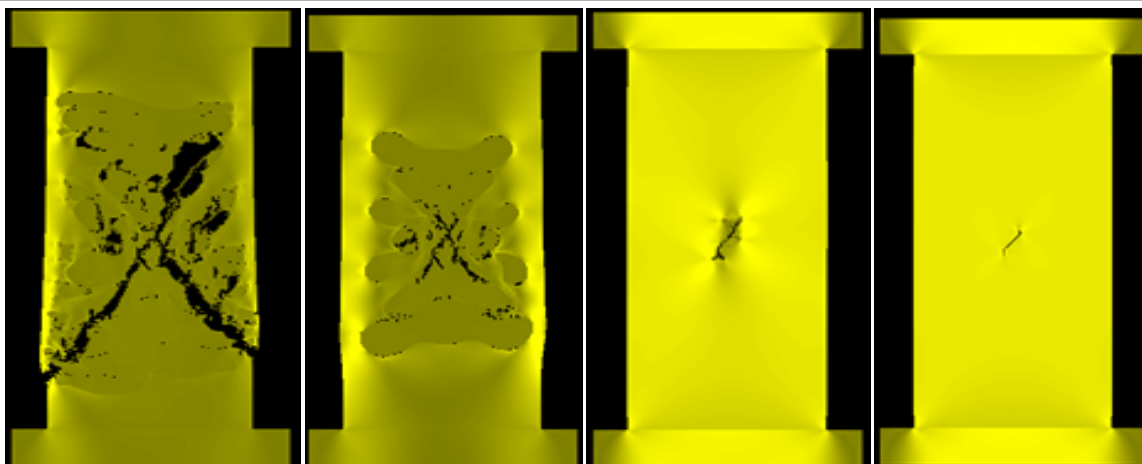
شکل ۵- اندازه‌گیری پارامترهای مربوط به مدل‌سازی آزمون فشاری تک‌محوره در آزمایشگاه



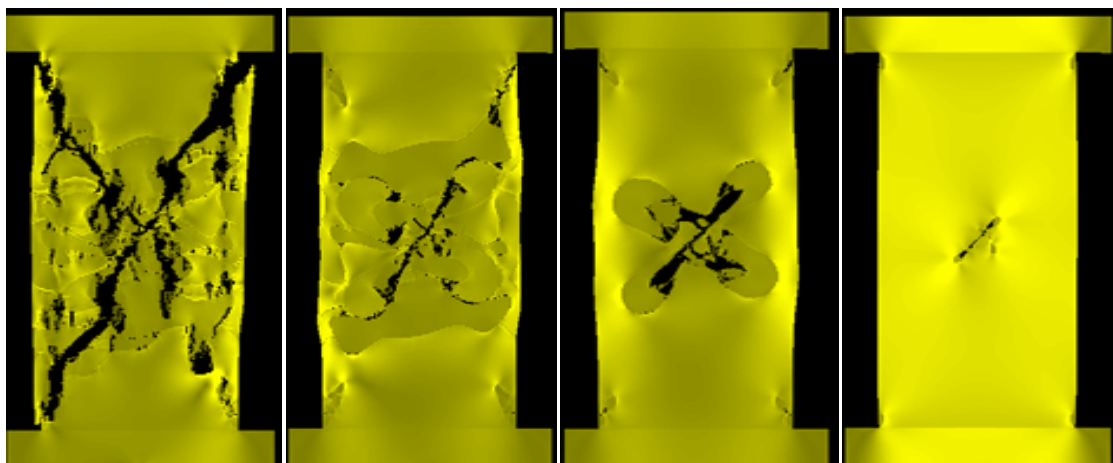
شکل ۶- الگوی شکست نمونه بکر (الف) هندسه اولیه (ب) نرخ $0/002$ (ج) نرخ $0/02$ (د) نرخ $0/2$ میلی‌متر در هر مرحله بارگذاری



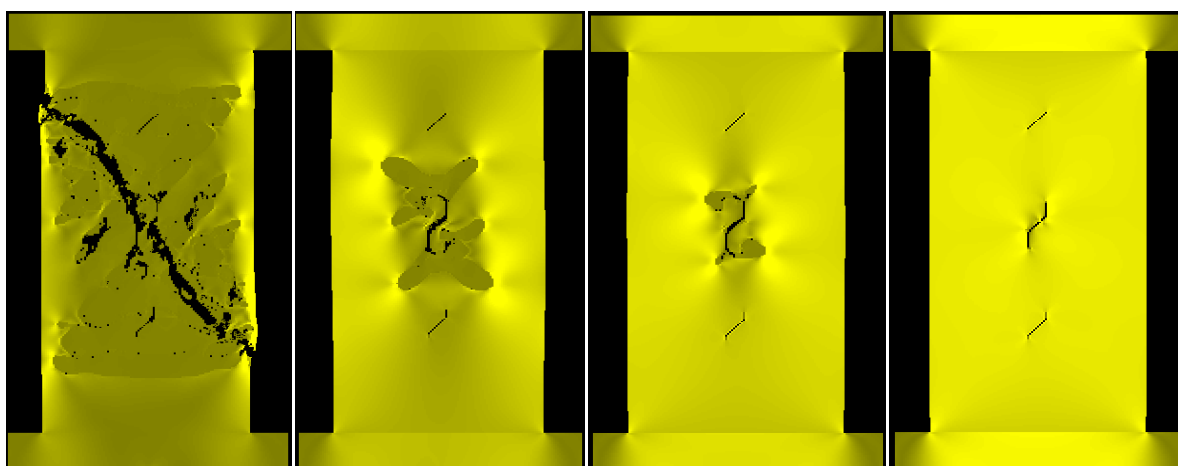
شکل ۷- نمونه حاوی یک پیش‌ترک با نرخ بارگذاری $0/002$ در مراحل مختلف بارگذاری



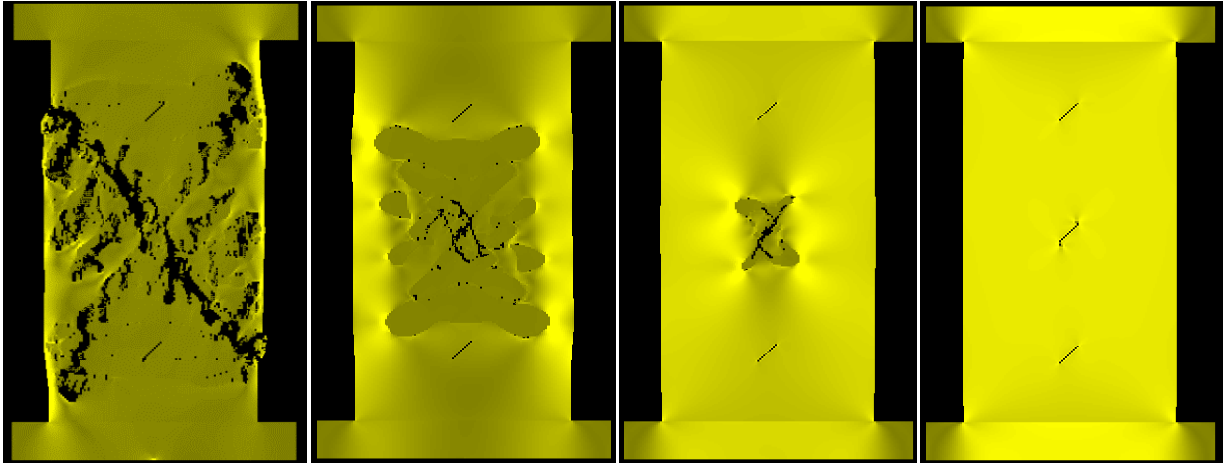
شکل ۸- نمونه حاوی یک پیش ترک با نرخ بارگذاری ۰/۰۲ در مراحل مختلف بارگذاری



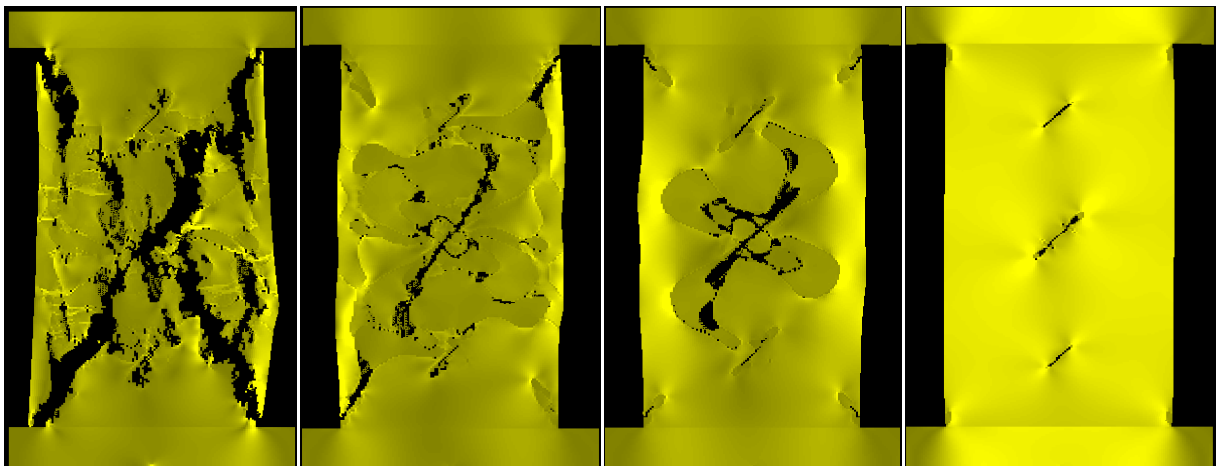
شکل ۹- نمونه حاوی یک پیش ترک با نرخ بارگذاری ۰/۰۲ در مراحل مختلف بارگذاری



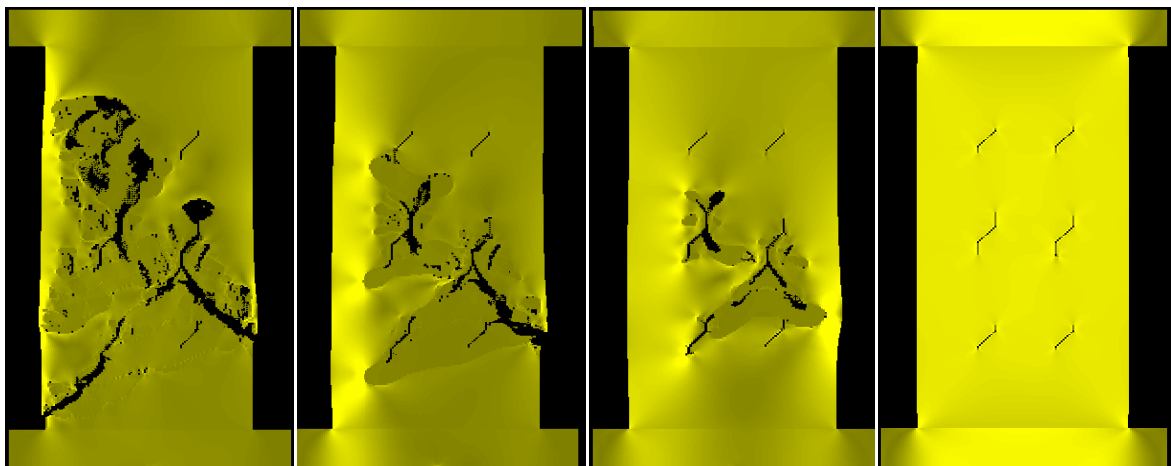
شکل ۱۰- نمونه حاوی سه پیش ترک با نرخ بارگذاری ۰/۰۰۲ در مراحل مختلف بارگذاری



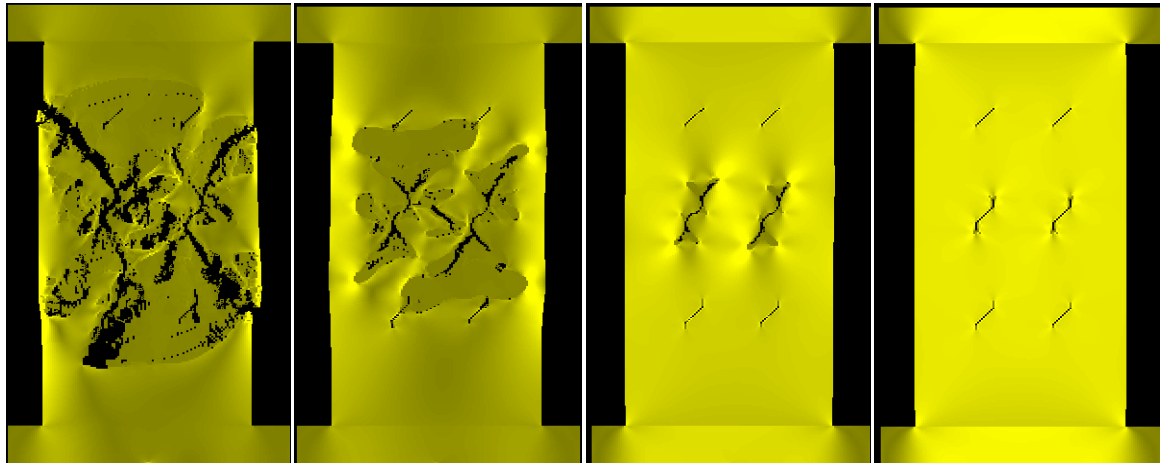
شکل ۱۱- نمونه حاوی سه پیش ترک با نرخ بارگذاری ۰/۰۲ در مراحل مختلف بارگذاری



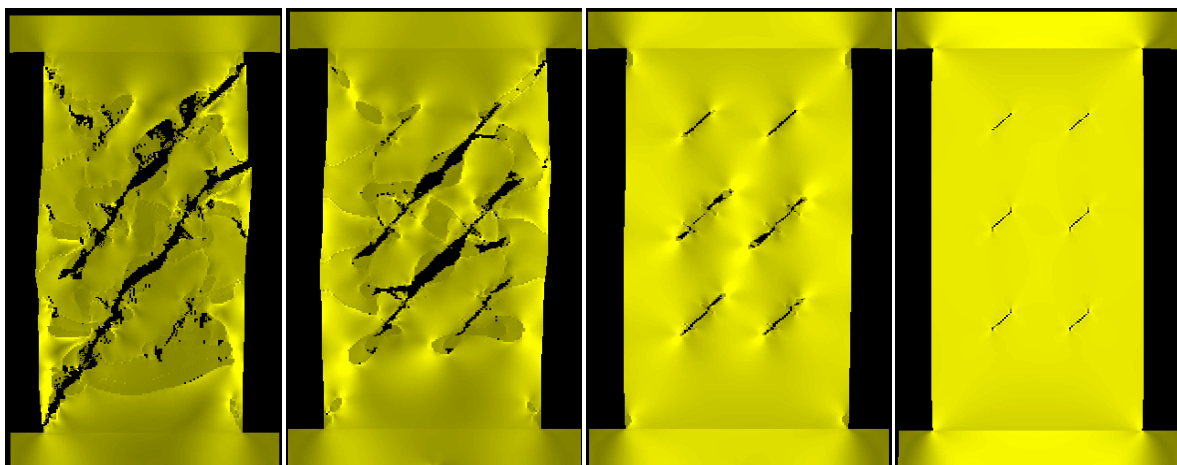
شکل ۱۲- نمونه حاوی سه پیش ترک با نرخ بارگذاری ۰/۰۲ در مراحل مختلف بارگذاری



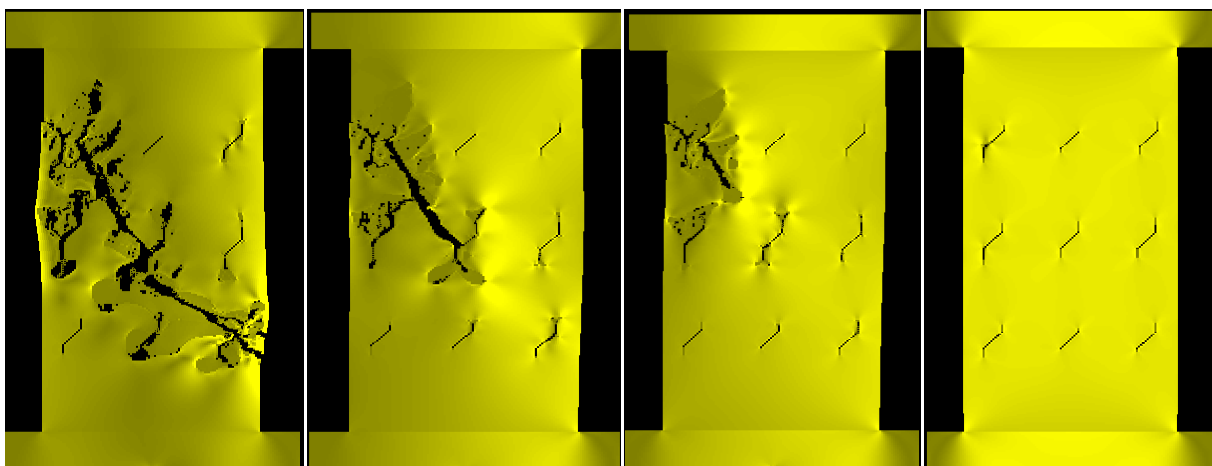
شکل ۱۳- نمونه حاوی شش پیش ترک با نرخ بارگذاری ۰/۰۰۲ در مراحل مختلف بارگذاری



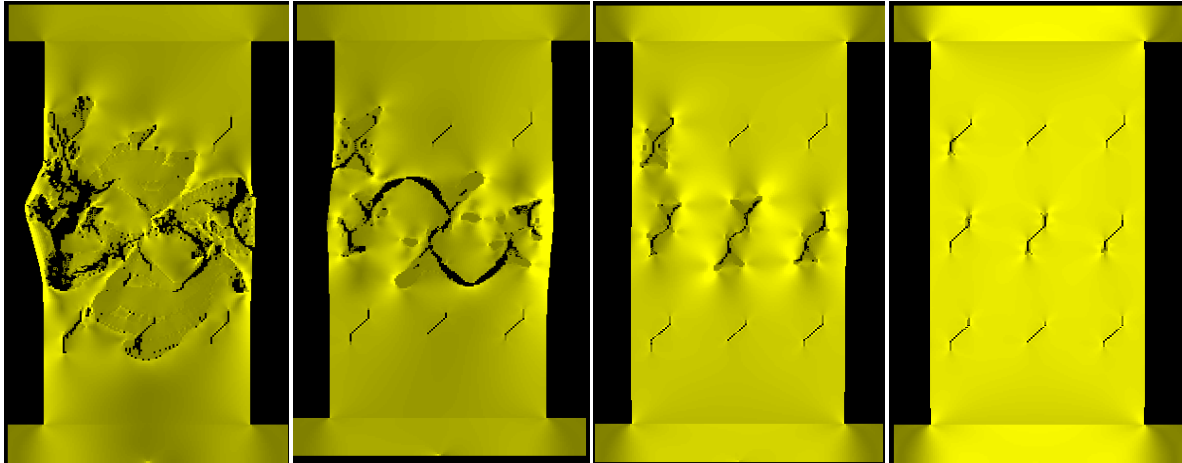
شکل ۱۴- نمونه حاوی شش پیش ترک با نرخ بارگذاری ۰/۰۲ در مراحل مختلف بارگذاری



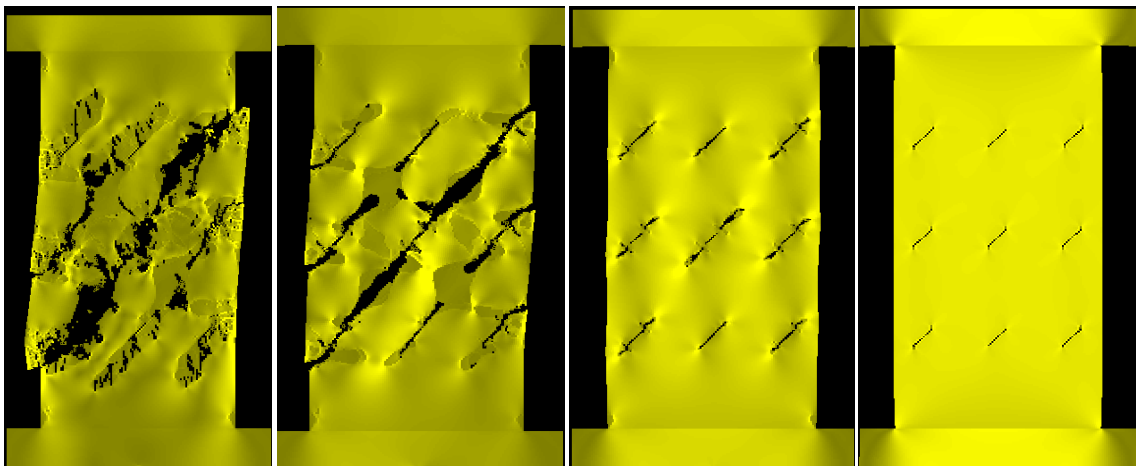
شکل ۱۵- نمونه حاوی شش پیش ترک با نرخ بارگذاری ۰/۲ در مراحل مختلف بارگذاری



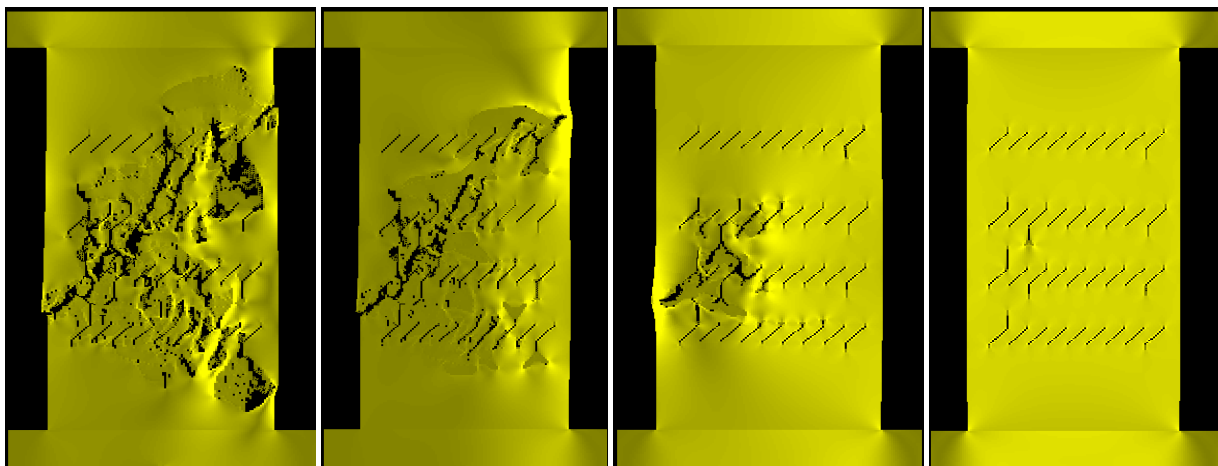
شکل ۱۶- نمونه حاوی ۹ پیش ترک با نرخ بارگذاری ۰/۰۰۲ در مراحل مختلف بارگذاری



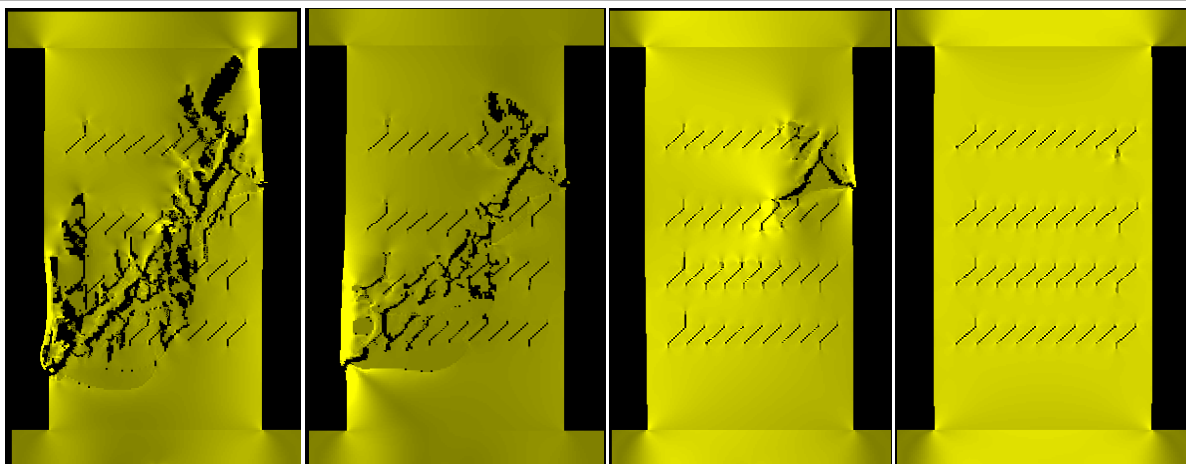
شکل ۱۷- نمونه حاوی ۹ پیش‌ترک با نرخ بارگذاری ۰/۰۲ در مراحل مختلف بارگذاری



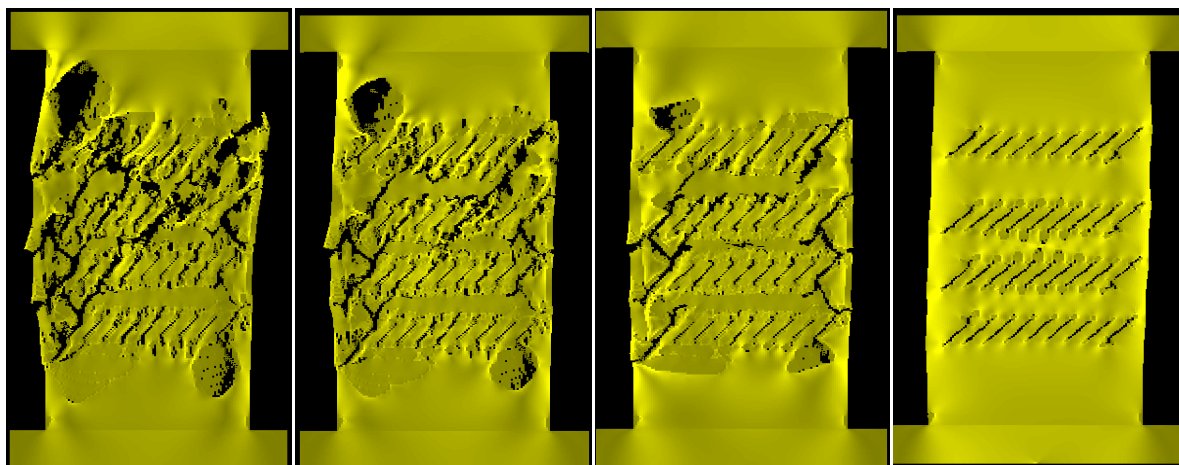
شکل ۱۸- نمونه حاوی ۹ پیش‌ترک با نرخ بارگذاری ۰/۰۲ در مراحل مختلف بارگذاری



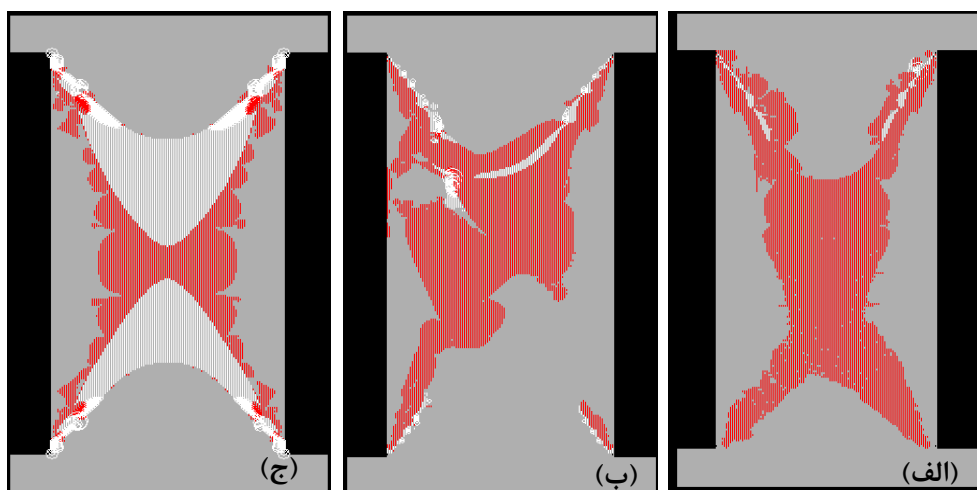
شکل ۱۹- نمونه حاوی ۳۶ پیش‌ترک با نرخ بارگذاری ۰/۰۰۲ در مراحل مختلف بارگذاری



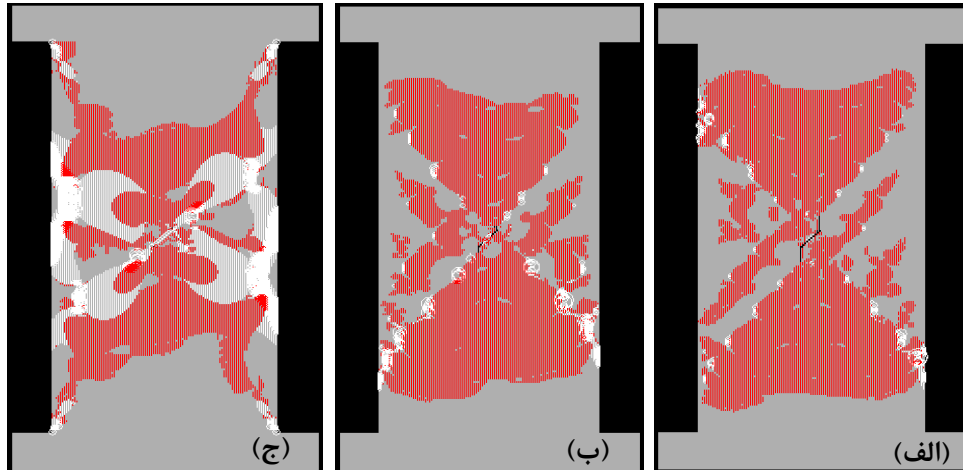
شکل ۲۰- نمونه حاوی ۳۶ پیش ترک با نرخ بارگذاری ۰/۰۲ در مراحل مختلف بارگذاری



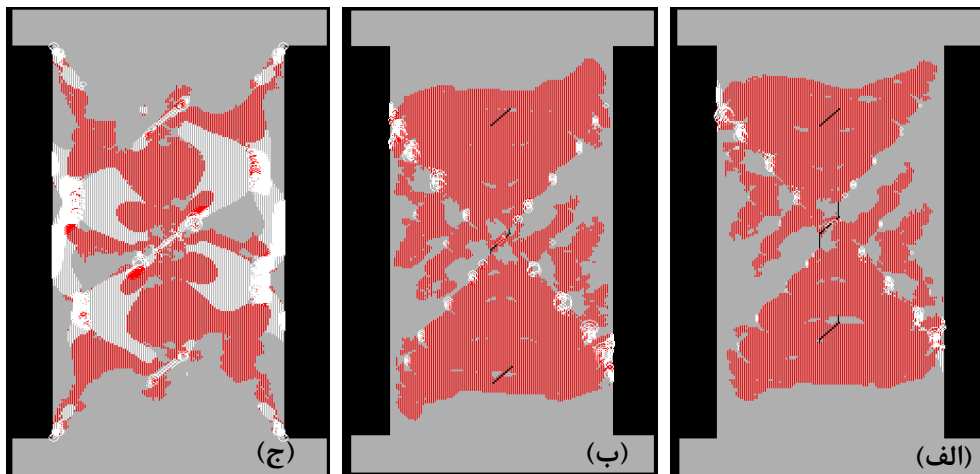
شکل ۲۱- نمونه حاوی ۳۶ پیش ترک با نرخ بارگذاری ۰/۲ در مراحل مختلف بارگذاری



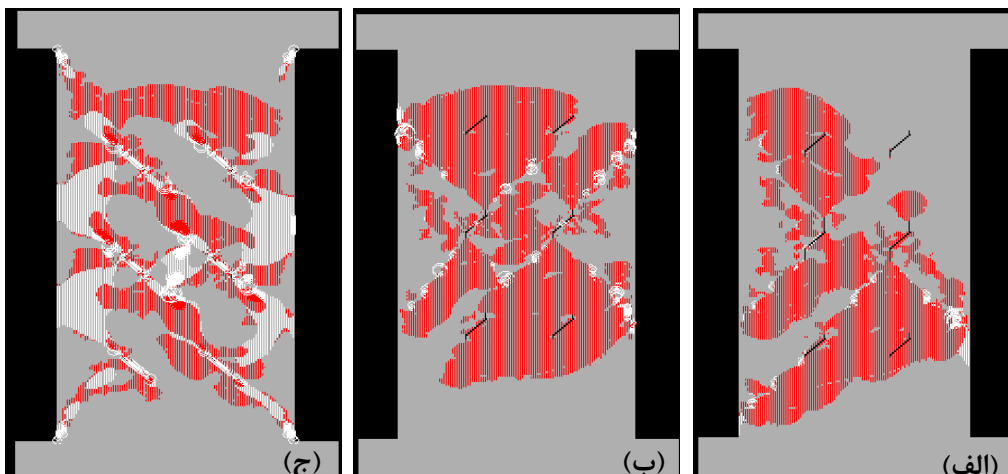
شکل ۲۲- امواج صوتی ساطع شده از نمونه‌ها مربوط به نمونه بکر با نرخ‌های (الف) ۰/۰۰۲ (ب) ۰/۰۲ (ج) ۰/۲ میلی‌متر در هر مرحله بارگذاری



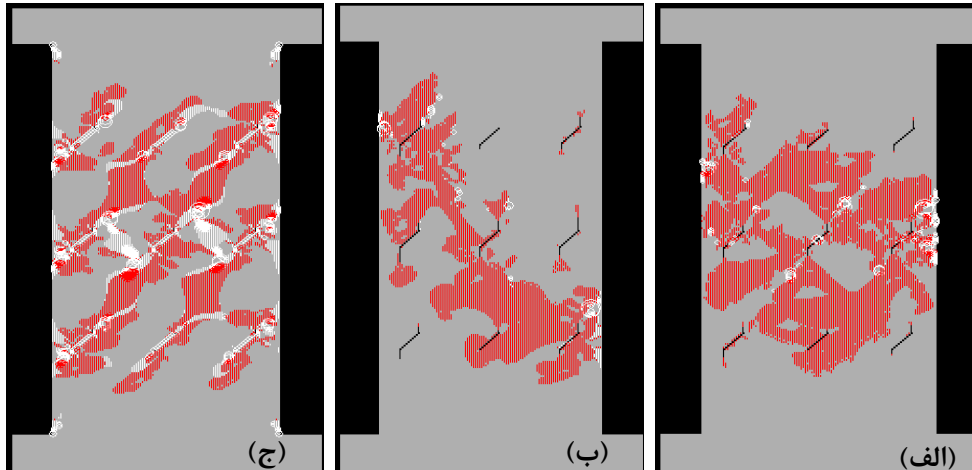
شکل ۲۳- امواج صوتی ساطع شده از نمونه‌ها مربوط به نمونه حاوی یک پیش ترک با نرخ‌های (الف) ۰/۰۰۲ (ب) ۰/۰۲ (ج) ۰/۲ میلی‌متر در هر مرحله بارگذاری



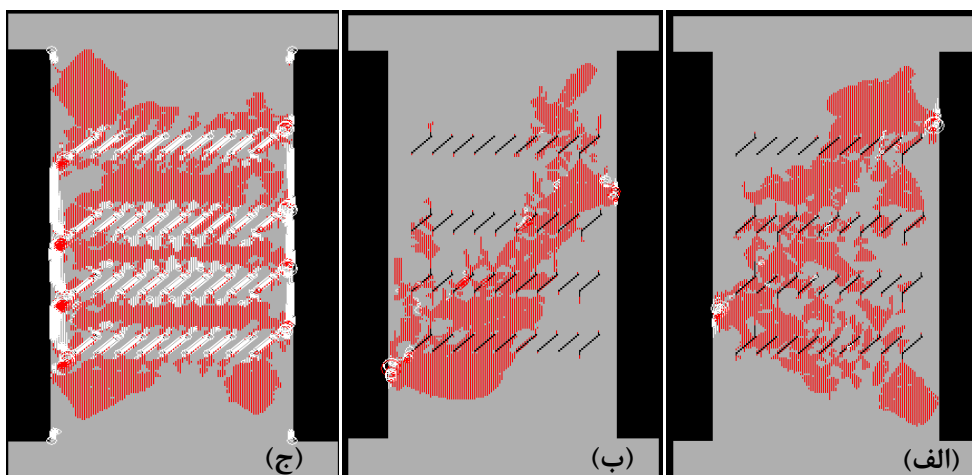
شکل ۲۴- امواج صوتی ساطع شده از نمونه‌ها مربوط به نمونه حاوی ۳ پیش ترک نرخ‌های (الف) ۰/۰۰۲ (ب) ۰/۰۲ (ج) ۰/۲ میلی‌متر در هر مرحله بارگذاری



شکل ۲۵- امواج صوتی ساطع شده از نمونه‌ها مربوط به نمونه حاوی ۶ پیش ترک نرخ‌های (الف) ۰/۰۰۲ (ب) ۰/۰۲ (ج) ۰/۲ میلی‌متر در هر مرحله بارگذاری



شکل ۲۶- امواج صوتی ساطع شده از نمونه‌ها مربوط به نمونه حاوی ۹ پیش ترک نرخ‌های (الف) ۰/۰۰۲ (ب) ۰/۰۲ (ج) ۰/۲ میلی‌متر در هر مرحله بارگذاری



شکل ۲۷- امواج صوتی ساطع شده از نمونه‌ها مربوط به نمونه حاوی ۳۶ پیش ترک نرخ‌های (الف) ۰/۰۰۲ (ب) ۰/۰۲ (ج) ۰/۲ میلی‌متر در هر مرحله بارگذاری

۳- بحث و بررسی

صفحه‌ای به صورت هم‌زمان از انتهای ترک باله‌ای رشد یافته‌اند؛ اما همان‌گونه که مشخص است زون برشی تشکیل شده اطراف ترک مورب بیشتر بوده و در نتیجه شکل شکست نهایی نمونه به صورت یک صفحه برشی بوده و توسط ترک مورب کنترل خواهد شد (شکل ۷). با افزایش نرخ بارگذاری تا ۰/۰۲ میلی‌متر در هر مرحله طول ترک‌های باله‌ای، مورب و شبه صفحه‌ای تشکیل شده در مراحل اولیه بارگذاری کاهش یافته؛ اما زون برشی تشکیل شده در اطراف ترک‌ها دارای وسعت و انشعاب بیشتری شده است. در نهایت شکل شکست نهایی نمونه ناشی از یکپارچگی ترک‌های مورب و شبه صفحه‌ای است، به گونه‌ای که می‌توان گفت دو صفحه برشی تشکیل شده که در وسط نمونه

در این تحقیق شروع و گسترش ترک در نمونه‌های ترک‌دار با چگالی مختلف بررسی شده و سه نوع ترک مشاهده شده است: ترک‌های باله‌ای، ترک‌های مورب و شبه صفحه‌ای. ترک‌های باله‌ای از نوع ترک‌های کششی و ترک‌های مورب و شبه صفحه‌ای از نوع برشی می‌باشند. در نمونه‌های حاوی یک پیش ترک در نرخ بارگذاری شبه‌استاتیکی که معمولاً مقدار آن متناسب با ۰/۰۰۲ میلی‌متر در هر مرحله بارگذاری می‌باشد، مشاهده شده که ابتدا ترک باله‌ای از انتهای پیش ترک وسطی شروع به رشد کرده است. در مرحله بعد ترک‌های مورب و شبه

ای تشکیل شده در مراحل اولیه بارگذاری نسبت به نرخ $0/002$ میلی‌متر کمتر شده است. در این حالت نیز ترک‌های برشی ثانویه از نوک ترک‌های باله‌ای تشکیل شده و زون برشی ایجاد شده در اطراف این ترک‌ها وسعت بیشتری داشته است. در نهایت هر دو نوع از ترک‌های برشی ثانویه در شکست نهایی سنگ تأثیر گذاشته‌اند؛ به نحوی که می‌توان گفت شکل شکست نهایی نمونه به صورت دو صفحه برشی متقاطع شده است (شکل ۱۴). در نرخ بارگذاری $0/2$ میلی‌متر در هر مرحله و در مراحل اولیه رشد ترک، ترک‌های باله‌ای با طول بسیار ناچیزی در نوک ترک‌های وسطی و انتهایی نمونه تشکیل شده و در مرحله بعدی ترک‌های شبه‌صفحه‌ای رشد کرده است. این حالت زون برشی در تمام نمونه وجود داشته است؛ بطوریکه که این زون‌های برشی نمونه را به قطعه‌هایی با پتانسیل خردشوندگی بالا تبدیل کرده است. اما با توجه به سرعت بالای رشد ترک‌های شبه‌صفحه‌ای اجازه خرد شدن زون برشی تشکیل شده داده نشده و شکل شکست نهایی به صورت دو صفحه موازی رخ داده است (شکل ۱۵). لازم به ذکر است که در نمونه بدون پیش‌ترک و تحت این نرخ بارگذاری شکست نمونه به صورت خردشونده اتفاق افتاده است (شکل ۶).

در نمونه دارای ۹ پیش‌ترک و در نرخ بارگذاری $0/002$ میلی‌متر در هر مرحله ابتدا ترک‌های باله‌ای تشکیل شده‌اند؛ به نحوی که رشد ترک باله‌ای از نوک پیش‌ترک‌های وسطی در ردیف‌های اول و آخر بسیار ناچیز بوده و پیش‌ترک وسطی در ردیف بالا هیچ دخالتی در انتشار ترک و شکل شکست نهایی نداشته است. در مرحله بعدی ترک‌های مورب از نوک پیش‌ترک سمت چپ در ردیف بالایی شروع شده و با ادامه بارگذاری تا انتهای پیش‌ترک سمت راست در ردیف آخر ادامه یافته‌اند. در نتیجه شکل شکست نهایی در این بارگذاری به صورت یک صفحه برشی ناشی از انتشار ترک‌های مورب مشاهده شده است (شکل ۱۶). این نکته قابل توجه است که با افزایش چگالی ترک‌ها به دلیل تأثیر متقابل ترک‌ها بر یکدیگر زون برشی مانند حالت قبل تشکیل نشده است. در حالی که نمونه‌هایی با چگالی پیش‌ترک کمتر ابتدا زون برشی اطراف ترک‌های تشکیل

به یکدیگر رسیده‌اند (شکل ۸). در نرخ بارگذاری $0/2$ میلی‌متر تقریباً می‌توان گفت هیچ نوع ترک باله‌ای تشکیل نشده است. در اولین مرحله رشد ترک، ترک شبه صفحه‌ای از نوک پیش‌ترک موجود در نمونه شروع به رشد کرده و در مرحله بعدی بارگذاری ایجاد ترک مورب و رشد ترک شبه صفحه‌ای هم‌زمان با ایجاد زون برشی در انتهای هرکدام از ترک‌های مذکور مشاهده شده است. هرچند در مرحله بعدی زون‌های برشی به صورت قطعات کوچک در داخل نمونه ایجاد شده؛ اما شکل شکست نهایی نمونه در نتیجه یکپارچگی ترک‌های مورب و شبه‌صفحه‌ای به صورت دو صفحه برشی متقاطع رخ داده است. در حالی که نمونه بکر (بدون ترک) شکست نهایی نمونه تحت نرخ‌های بارگذاری بالا به صورت انفجاری انجام شده و نمونه خرد شده است (شکل ۹).

در نمونه حاوی سه پیش‌ترک تمامی موارد ذکر شده در رابطه با نمونه حاوی یک پیش‌ترک صادق بوده؛ با این توضیح که انتشار ترک‌های اولیه و ثانویه از نوک پیش‌ترک وسطی شروع شده و ترک‌های ابتدایی و انتهایی هیچ دخالتی در فرآیند شکست نهایی نداشته‌اند؛ چراکه در محدوده زون برشی ایجاد شده اطراف پیش‌ترک وسطی قرار نگرفته‌اند (شکل‌های ۱۰ تا ۱۲).

در نمونه حاوی شش پیش‌ترک و تحت بارگذاری با نرخ $0/002$ میلی‌متر در هر مرحله ابتدا ترک‌های باله‌ای اطراف ترک‌های موجود در نمونه تشکیل شده‌اند؛ بطوریکه طول آن‌ها در ترک‌های مرکزی بیشتر است. مانند نمونه با یک پیش‌ترک، در مرحله بعدی ترک‌های مورب و شبه صفحه‌ای از انتهای ترک باله‌ای شروع به رشد کرده‌اند؛ به نحوی که سرعت انتشار ترک‌های مورب بیشتر از ترک‌های شبه‌صفحه‌ای است. توسعه زون برشی ناشی از انتشار ترک‌های مورب از نوک ترک‌های مرکزی و قرار گرفتن ترک‌های انتهایی نمونه در این زون، باعث شده تا شکل نهایی شکست نمونه به صورت دو صفحه برشی متقاطع باشد که در انتهای پیش‌ترک مرکزی سمت راست به یکدیگر رسیده‌اند (شکل ۱۳). با افزایش نرخ بارگذاری تا $0/2$ میلی‌متر در هر مرحله مانند نمونه‌های قبل طول ترک‌های باله-

حالت همه ردیف‌های پیش‌ترک در شکل‌گیری صفحه شکست نهایی نمونه تأثیر داشته‌اند (شکل ۲۰). با افزایش نرخ بارگذاری تا ۰/۲ میلی‌متر در هر مرحله، ابتدا ترک‌های شبه‌صفحه‌ای تشکیل شده و زون برشی در ناحیه بین ترک‌ها شکل گرفته است. با ادامه بارگذاری روی نمونه طول ترک‌های شبه‌صفحه‌ای افزایش یافته و ترک‌های مورب از انتهای ترک‌های شبه‌صفحه‌ای کناری رشد کرده‌اند. همین امر سبب جدا شدن تکه‌هایی از اطراف نمونه شده است^۱. در مراحل بعدی بارگذاری ترک‌های شبه‌صفحه‌ای از میان ترک‌های وسطی موجود در نمونه نیز عبور کرده و صفحه برشی مشخصی در وسط نمونه به‌وجود آورده است. هرچند در این نرخ بارگذاری خردشدگی نمونه بیشتر از حالت‌های گذشته دیده شده است (شکل ۲۱).

برای بررسی بیشتر این موضوع امواج صوتی ساطع شده از نمونه‌ها مربوط به هر کدام از شکل‌های ۶ تا ۲۱ در شکل‌های ۲۲ تا ۲۷ آورده شده است. در نمونه بدون پیش‌ترک و در نرخ‌های بارگذاری پایین، ترک‌های برشی و کششی به‌صورت هم‌زمان از زیر صفحات بارگذاری گسترش یافته‌اند. با ادامه بارگذاری روی نمونه، گسترش ترک‌های برشی متوقف شده و ترک‌های کششی به سمت مرکز نمونه گسترش پیدا کرده و یکپارچه شده‌اند. بنابراین الگوی شکست نهایی توسط ترک‌های کششی کنترل شده است (شکل ۲۲ (الف) و (ب)). با افزایش نرخ بارگذاری تا ۰/۲، باز هم ترک‌های برشی و کششی از زیر صفحات بارگذاری منتشر شده‌اند؛ با این تفاوت که میزان ترک‌های برشی ایجاد شده در مراحل اولیه بارگذاری بیشتر بوده و با ادامه بارگذاری روی نمونه ترک‌های برشی به‌صورت ناگهانی به سمت مرکز نمونه گسترش پیدا کرده و در نهایت توسط ترک‌های کششی یکپارچه شده‌اند (شکل ۲۲ (ج)). با توجه به انرژی بالای کانت‌های برشی و گسترش آن‌ها در نمونه (به دلیل عدم وجود پیش‌ترک)، خردشدگی نمونه در لحظه شکست نهایی افزایش یافته است.

امواج صوتی ساطع شده از نمونه‌ها مربوط به نمونه‌های با چگالی مختلف پیش‌ترک در شکل‌های ۲۲ تا ۲۷ را نشان داده

شده و سپس ترک مربوطه گسترش یافته است. در نرخ بارگذاری ۰/۰۲ و در مراحل ابتدایی بارگذاری ترک‌های باله‌ای تشکیل شده‌اند؛ به‌نحوی که طول آن‌ها نسبت به مرحله قبل به‌صورت ناچیزی کاهش یافته است. در مرحله بعدی از انتهای ترک‌های باله‌ای ترک برشی شبه‌صفحه‌ای و هم‌زمان زون برشی مربوط به ترک‌های مورب اطراف ترک‌های ردیف وسط تشکیل شده است. با ادامه بارگذاری روی نمونه و در نتیجه اندرکنش ترک برشی و زون برشی مربوط به ترک‌های مورب، ترک شبه‌صفحه‌ای تشکیل شده در نوک ترک سمت چپ و انتشار ترک مورب مربوط به آن باعث یکپارچگی آنها شده است. در نتیجه شکل شکست نهایی نمونه به‌صورت دو صفحه برشی متقاطع بوده که از نوک پایینی پیش‌ترک‌های کناری در ردیف وسط شروع شده و در نوک بالایی پیش‌ترک وسطی یکپارچه شده‌اند (شکل ۱۷). با افزایش نرخ بارگذاری تا ۰/۲ میلی‌متر در هر مرحله نیز ابتدا ترک‌های باله‌ای با طول ناچیزی تشکیل شده، سپس ترک‌های شبه‌صفحه‌ای از انتهای ترک‌های باله‌ای شروع به رشد کرده‌اند. با ادامه بارگذاری روی نمونه ترک‌های شبه‌صفحه‌ای یکپارچه شده و باعث تشکیل سه صفحه برشی شده که شکست نهایی نمونه را در پی داشته است (شکل ۱۸).

در نمونه حاوی ۳۶ پیش‌ترک و در نرخ بارگذاری ۰/۰۰۲ نیز ابتدا ترک‌های باله‌ای از انتهای ترک‌های موجود و اغلب از انتهای ترک‌های کناری تشکیل شده‌اند. در مرحله بعدی بارگذاری ترک‌های مورب و اغلب شبه‌صفحه‌ای از انتهای ترک باله‌ای با طول بزرگ‌تر انتشار یافته‌اند. با ادامه بارگذاری ترک‌های شبه‌صفحه‌ای رشد کرده و در نهایت سبب تشکیل صفحه برشی نهایی شده‌اند. در این حالت انتشار ترک از سوی پیش‌ترک‌های پایینی به سمت ترک‌هایی بالایی اتفاق افتاده است؛ بطوریکه ترک‌های ردیف پایینی هیچ دخالتی در شکست نهایی نداشته‌اند (شکل ۱۹). در نرخ بارگذاری ۰/۰۲ ترک باله‌ای با طول کمتر و اغلب از نوک ترک‌های کناری تشکیل شده است. در مرحله بعد ترک‌های مورب و شبه‌صفحه‌ای از انتهای پیش‌ترک سمت راست در ردیف اول شروع شده و تا پیش‌ترک سمت چپ در ردیف آخر ادامه یافته است. در این

1- Spalling

شده است. مشاهده می‌شود که صرف‌نظر از چگالی پیش‌ترک‌ها، با افزایش نرخ بارگذاری میزان ترک‌های برشی ایجاد شده در نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این افزایش در نرخ بارگذاری ۰/۰۲ کمتر دیده شده است. با این وجود در این نرخ بارگذاری انرژی کانت‌های برشی تولید شده در اثر بارگذاری نسبت به نرخ ۰/۰۰۲ افزایش یافته است (بزرگی دایره سفید نشان‌دهنده انرژی کانت‌های برشی است). به‌طور کلی می‌توان گفت با افزایش نرخ بارگذاری نسبت ترک‌های برشی به ترک‌های کششی ایجاد شده در اثر بارگذاری به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای بیشتر شده است. علاوه بر این مشاهده شده است که با افزایش چگالی پیش‌ترک‌ها و در نرخ‌های بارگذاری بالا، ترک‌های بیشتری در فرآیند شکست نهایی نمونه دخالت داشته‌اند. این

امر شاید به این دلیل باشد که شکست نهایی در نمونه‌ها غالباً در نتیجه تشکیل صفحات برشی اتفاق می‌افتد. با توجه به اینکه با افزایش نرخ بارگذاری در نمونه‌های دارای پیش‌ترک ابتدا ترک‌های برشی در محل پیش‌ترک‌های موجود تشکیل شده‌اند، هرچه چگالی پیش‌ترک بیشتر باشد ترک‌های برشی بیشتری ایجاد خواهد شد. نکته قابل‌توجه این است که با افزایش نرخ بارگذاری در نمونه‌های با چگالی پیش‌ترک زیاد، در اثر بارگذاری روی نمونه، ترک‌های برشی نزدیک سطح خارجی نمونه القا شده بطوریکه شکست در این نمونه‌ها با جدا شدن تکه‌های کوچکی از سطح نمونه آغاز شده است. در جدول ۲ ترک‌های غالب موثر در فرآیند شکست با توجه به تعداد پیش‌ترک‌ها و نرخ بارگذاری آورده شده است.

جدول ۲- ترک‌های غالب و موثر در فرآیند شکست نمونه‌ها با توجه به نرخ بارگذاری و تعداد پیش‌ترک‌ها

نرخ بارگذاری (میلی متر در هر مرحله بارگذاری)			تعداد پیش‌ترک
۰/۲	۰/۰۲	۰/۰۰۲	
ترک‌های موثر در فرآیند شکست			
شبه صفحه‌ای	برشی مورب - شبه صفحه‌ای	برشی مورب	۱
شبه صفحه‌ای	برشی مورب - شبه صفحه‌ای	برشی مورب	۳
شبه صفحه‌ای	برشی مورب - شبه صفحه‌ای	برشی مورب - شبه صفحه‌ای	۶
شبه صفحه‌ای	برشی مورب - شبه صفحه‌ای	برشی مورب	۹
شبه صفحه‌ای	برشی مورب - شبه صفحه‌ای	شبه صفحه‌ای	۳۶

حاوی یک پیش‌ترک داشته است [۱۷].

۴- نتایج

✓ با افزایش نرخ بارگذاری از طول ترک‌های باله‌ای کاسته شده بطوریکه که می‌توان گفت در نرخ بارگذاری ۰/۲ هیچ ترک باله‌ای ایجاد نشده است بلکه در ابتدای بارگذاری ترک شبه صفحه‌ای از نوک پیش‌ترک‌های موجود گسترش پیدا کرده است. در نمونه‌های حاوی پیش‌ترک بیشتر ترک‌های باله‌ای اغلب از نوک ترک‌های کناری انتشار یافته‌اند.

✓ در نمونه‌های با چگالی پیش‌ترک کم (نمونه‌های حاوی ۱، ۳، ۶ و ۹) و در نرخ‌های بارگذاری پایین ترک‌های برشی

آزمایش‌هایی برای بررسی فرآیند ایجاد ترک و شکست در نمونه‌های سنگ مرمر تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی توسط چانگ‌ژیانگ^۱ و همکاران انجام شده است. در این آزمایش‌های از نمونه‌های بلوکی به ابعاد ۶۰*۳۰*۲۰ و دارای پیش‌ترک مرکزی به طول ۵ میلی‌متر استفاده شده است. نتایج مطالعه ایشان نشان داد که شکست نمونه‌ها تحت بارگذاری استاتیکی با یک صفحه برش همراه شده است، در حالی تحت بارگذاری دینامیکی شکل شکست نهایی توسط دو صفحه شکست متقاطع به‌وجود آمده است. این نتایج همبستگی خوبی با نتایج مدل‌سازی عددی در این تحقیق و برای نمونه‌های

- [5] Lajtai, E. Z. "Brittle fracture in compression." *International Journal of Fracture* 10, no. 4 (1974): 525-536.
- [6] Park, C. H., and A. Bobet. "Crack coalescence in specimens with open and closed flaws: a comparison." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46, no. 5 (2009): 819-829.
- [7] Grote, D. L., S. W. Park, and M1 Zhou. "Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I. experimental characterization." *International Journal of Impact Engineering* 25, no. 9 (2001): 869-886.
- [8] Kalthoff, Jörg F., and Andreas Bürgel. "Influence of loading rate on shear fracture toughness for failure mode transition." *International Journal of Impact Engineering* 30, no. 8-9 (2004): 957-971.
- [9] Anderson, Ted L. *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. CRC press, 2017.
- [10] Wong, L. N. Y., and H. H. Einstein. "Systematic evaluation of cracking behavior in specimens containing single flaws under uniaxial compression." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46, no. 2 (2009): 239-249.
- [11] Park, C. H., and A. Bobet. "Crack initiation, propagation and coalescence from frictional flaws in uniaxial compression." *Engineering Fracture Mechanics* 77, no. 14 (2010): 2727-2748.
- [12] Imani, Mehrdad, Hamid Reza Nejati, and Kamran Goshtasbi. "Dynamic response and failure mechanism of Brazilian disk specimens at high strain rate." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 100 (2017): 261-269.
- [13] Li, Qiang, Qing Yang, Jing-chao Jia, and Hongliang Liu. "Experimental research on crack propagation and failure in rock-type materials under compression." *EJGE* 13 (2008): 1-13.
- [14] Zavattieri, Pablo, F. Ochoa, A. Hedayat, and Y. Khasawhen. "Numerical Simulation of Crack Propagation in Rocks under Uniaxial Compression." CE-597 Non-Linear Fracture Mechanics Term Project—Purdue University (2011).
- مورب غالب هستند بطوریکه شکل شکست نهایی نمونه توسط آنها تعیین شده است. با افزایش نرخ بارگذاری انتشار ترک‌های برشی شبه صفحه‌ای نیز آغاز شده و به نحوی که شکل شکست نهایی در نرخ بارگذاری ۰/۲ توسط این گروه از ترک‌های ثانویه کنترل شده است.
- ✓ در نمونه حاوی ۳۶ پیش‌ترک، مستقل از نرخ بارگذاری ترک‌های برشی شبه صفحه‌ای تعیین‌کننده‌تر هستند. با افزایش نرخ بارگذاری تا ۰/۲ در این نمونه، ابتدا قطعه‌های کوچکی از اطراف نمونه جدا شده و در ادامه، شکست نهایی به صورت صفحه برشی در جهت انتشار ترک‌های شبه صفحه‌ای خواهد بود.
- ✓ با توجه به امواج صوتی ساطع شده از نمونه‌ها نمونه‌ها مشاهده شده است که صرف‌نظر از چگالی پیش‌ترک‌ها، با افزایش نرخ بارگذاری میزان ترک‌های برشی ایجاد شده در نمونه‌ها افزایش یافته است. این افزایش در نرخ بارگذاری ۰/۲ به صورت افزایش انرژی کانت برشی تولید شده تاثیر داشته است.
- ✓ با افزایش نرخ بارگذاری نسبت ترک‌های برشی به ترک‌های کششی ایجاد شده در اثر بارگذاری به صورت قابل‌ملاحظه‌ای بیشتر شده است و به همین علت در نرخ بارگذاری ۰/۲ و در نمونه‌های با چگالی پیش‌ترک بالا ترک‌های بیشتری در فرآیند شکست نهایی نمونه دخالت داشته‌اند.

۵- منابع

- [1] Ghazvinian, Abdolhadi, Hamid Reza Nejati, Vahab Sarfarazi, and Mir Raouf Hadei. "Mixed mode crack propagation in low brittle rock-like materials." *Arabian Journal of Geosciences* 6, no. 11 (2013): 4435-4444.
- [2] Lawn, Brian, and T. Rodney Wilshaw. *Fracture of brittle solids*. Cambridge university press, 1993.
- [3] Bobet, Antonio. "The initiation of secondary cracks in compression." *Engineering Fracture Mechanics* 66, no. 2 (2000): 187-219.
- [4] Sagong, M., and A. Bobet. "Coalescence of multiple flaws in a rock-model material in uniaxial compression." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 39, no. 2 (2002): 229-241.

- [15] Shah, S. P., and Ch Ouyang. "Failure of concrete: fracture mechanics approach." In *Anales de mecanica de la fractura*, vol. 9, pp. 352-375. 1992.
- [16] Sabri, Mansour, Abdolhadi Ghazvinian, and Hamid Reza Nejati. "Effect of particle size heterogeneity on fracture toughness and failure mechanism of rocks." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 81 (2016): 79-85.
- [17] Zhu, W. C., and C. A. Tang. "Micromechanical model for simulating the fracture process of rock." *Rock Mechanics and Rock Engineering* 37, no. 1 (2004): 25-56.
- [18] Zou, Chunjiang, and Louis Ngai Yuen Wong. "Experimental studies on cracking processes and failure in marble under dynamic loading." *Engineering geology* 173 (2014): 19-31.