

بررسی رفتار مکانیکی نمونه‌های بازالت دارای ترک‌های با تعداد و زوایای متفاوت در تنش فشاری تک‌محوره

محمدفاروق حسینی^۱؛ حسن قاسم زاده^{۲*}

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد استخراج، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰

دریافت: ۱۳۹۳/۱۲

چکیده

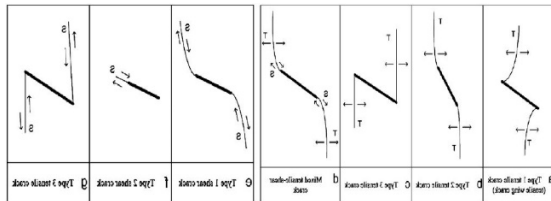
در این مطالعه آزمایش‌های فشاری تک‌محوره بر روی نمونه‌های بازالت دارای ترک‌های مصنوعی با تعداد و زوایای متفاوت بوسیله دستگاه بارگذاری هوشمند و نیز از طریق مدلسازی عددی انجام شد. نتایج نشان می‌دهند که مقدار مقاومت فشاری تک‌محوره، مدول یانگ و کرنش محوری در نمونه‌های با ترک‌های مصنوعی کمتر از نمونه بکر بوده و میزان این کاهش به هندسه ترک مصنوعی وابسته است. نحوه بهم وصل شدن ترک‌ها نیز در نمونه‌ها مطالعه و انواع ترک‌های گسترش یافته از نوک ترک‌های مصنوعی در نمونه‌ها توصیف شدند. ایجاد انواع ترک‌های کششی، برشی و ترکیب کششی-برشی و نحوه بهم وصل شدن ترک‌های مصنوعی بستگی به هندسه ترک مصنوعی دارد و با استفاده از آن، مد شکست و فرآیند ایجاد ترک در این نمونه‌ها مطالعه می‌شود. همچنین تأثیر بهم وصل شدن ترک‌ها بر مقاومت و رفتار شکست نمونه‌های بازالت تحت فشار تک‌محوره مورد بررسی قرار می‌گیرد. این بررسی رفتار مکانیکی ترک‌های با تعداد و زوایای متفاوت، درک بیشتری از مفاهیم شکست سنگ تحت فشار تک‌محوره را فراهم می‌نماید.

زاویه ترک، تعداد ترک، بهم وصل شدن ترک، مقاومت فشاری تک‌محوره، رفتار تغییر شکل

کلمات کلیدی

۱- مقدمه

مکانیزم بهم وصل شدن ترک‌های دو بعدی به نحوه قرار گرفتن و ضریب اصطکاک ترک مصنوعی وابسته است. وانگ و انیشتین [۱۲] رفتار ایجاد ترک در نمونه‌های گچ و مرمر (با ابعاد $152 \text{ mm} \times 76 \text{ mm} \times 32 \text{ mm}$) دارای یک ترک مصنوعی باز را تحت فشار تک محوره بررسی کردند. هفت نوع ترک متفاوت براساس هندسه و مکانیزم گسترش ترک (کششی یا برشی) بوسیله دوربین‌های با سرعت بالا مشاهده شد (شکل ۱).

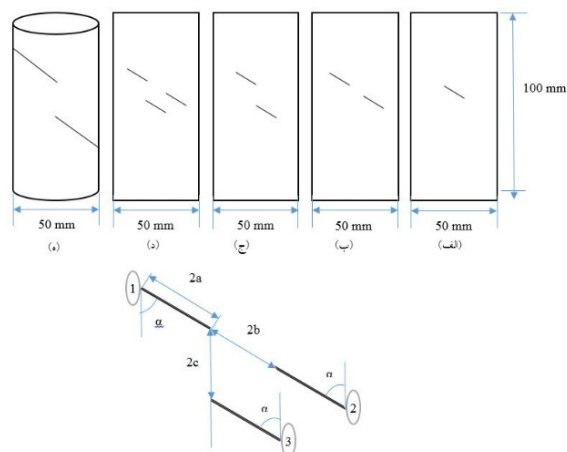


شکل ۱: انواع ترک مختلف شروع شده از ترک مصنوعی [۱۲]

یانگ و همکاران [۷] آزمایش فشاری سه محوره بر روی نمونه‌های استوانه‌ای مرمر با دو ترک مصنوعی بسته در شرایط هندسه ترک غیر همپوشان و ثابت در نظر گرفتن طول ترک مصنوعی و طول وتر بین دو ترک مصنوعی را بررسی کردند. بر اساس نتایج آزمایش تعدادی آزمایش‌های فشاری سه محوره، تأثیر بهم وصل شدن ترک روی خواص تغییر شکل با فشارهای جانبی متفاوت بررسی شد. نتایج نشان داد که نمونه‌های بکر و نمونه‌های با ترک مصنوعی بعد از تنش حداکثر ویژگی‌های تغییر شکل متفاوتی دارند که با افزایش فشار جانبی از شکننده به شکل‌پذیر تغییر می‌کند. مقاومت نهایی و مد شکست نه تنها به هندسه ترک مصنوعی بلکه به فشار جانبی هم وابسته است. ژانگ و وانگ [۱۳] آزمایش فشاری تک محوره را روی مواد شبه سنگی دارای یک ترک با شیب‌های صفر تا ۷۵ درجه نسبت به افق با مدل ذرات مجزا شبیه‌سازی انجام داده و بر اساس نتایج، تأثیر شیب ترک روی شروع و الگوی گسترش ترک را تحلیل کرد. همچنین ژانگ و وانگ [۱۴] آزمایش فشاری تک محوره را روی مواد شبه سنگی دارای دو ترک با مدل ذرات مجزا شبیه‌سازی کرده و نحوه ایجاد و بهم وصل شدن ترک‌ها را بررسی کرده‌اند. از آنچه گفته شد این نتیجه حاصل می‌شود که تامل صحیح در رفتار مکانیکی سنگ واقعی در شرایط سه بعدی به شدت مورد نیاز است. بدین منظور در این پژوهش آزمایش‌های فشاری تک محوره بر روی نمونه‌های بازالت دارای دو ترک مصنوعی متفاوت بوسیله دستگاه هوشمند و در

برای درک صحیح و پی بردن به فرآیند شکست و مکانیزم متفاوت ساختار توده‌سنگ در مهندسی سنگ محققان روی نمونه‌های دارای ترک مصنوعی بررسی‌های آزمایشگاهی تحت فشار تک محوره انجام داده‌اند. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهند که هندسه ترک مصنوعی، نقش کلیدی در رفتار مکانیکی سنگ دارد. بیشتر این بررسی‌ها روی مواد شبه سنگی تمرکز کرده‌اند که دلیل آن سادگی ساخت این مواد است. در این پژوهش‌ها رفتار شروع، گسترش و نحوه بهم وصل شدن ترک‌ها در مواد شبه سنگی تحت شرایط دو بعدی بررسی شده‌اند [۱-۷]. آزمایش‌های کمتری روی رفتار نمونه‌های سنگ واقعی دارای ترک مصنوعی انجام شده است. تعدادی از نتایج روی مواد شبه سنگی و سنگ واقعی با ترک مصنوعی تحت فشار تک محوره در زیر خلاصه شده است.

هری و نعمت [۱] مکانیزم شکست ترک‌های صفحه‌ای را روی مواد شبه سنگی بررسی و مشخص کردند که طول ترک مصنوعی پارامتری کنترلی برای مد شکست نمونه است. وانگ و شرایو [۸] انواع مدل‌ها و معیارهای شکست مصنوعی را بازمینی و خلاصه کردند و یک مدل شکست صدادار را از مشاهده رفتار شکست و براساس معیار تنش و انرژی ساختند. بابت [۵]، بابت و انیشتین [۹]، زو و همکاران [۴]، وانگ و چائو [۱۰]، واسارلی و بابت [۱۱] گسترش و بهم وصل شدن ترک‌های مصنوعی دو بعدی را روی مواد شبه سنگی دارای ترک مصنوعی شیب‌دار باز یا بسته بررسی کردند. وانگ و چائو سه نوع اصلی بهم وصل شدن ترک دو بعدی (ترک کششی، ترک برشی و ترک‌های ترکیبی) در نمونه‌های با دو ترک مصنوعی تحت فشار تک محوره را بررسی کردند. در شرایط تک محوره و دو محوره، مطالعه آزمایشگاهی بهم وصل شدن دو ترک مصنوعی غیر همپوشان به درستی رفتار ایجاد شده را تایید نمود. آن‌ها همچنین مشخص کردند که پدیده‌های فیزیکی جدید اهمیت زیادی دارند. ترک‌های باله‌ای به خوبی آشکار و در نوک ترک مصنوعی به وجود می‌آیند. اما این ترک‌های باله‌ای با افزایش زاویه ترک به مرکز ترک مصنوعی منتقل می‌شوند و افزایش تنش جانبی باعث توقف این ترک‌ها می‌شود [۱۰]. وانگ و همکاران [۶] بهم وصل شدن ترک و مقاومت نهایی مواد شبه سنگی دارای سه ترک را بررسی کردند. نتایج نشان داد که



شکل ۲: هندسه ترک مصنوعی در نمونه‌های بازالت. ۲a طول ترک مصنوعی، ۲b طول پل سنگ، ۲c طول پله‌ای، α زاویه ترک مصنوعی. (الف) تا (د) نمونه‌های مدلسازی شده، (ه) نمونه‌های آزمایشگاهی

مدلسازی مکانیزم شکست، نیازمند برنامه‌ای با قابلیت در نظر گرفتن ناهمگنی نمونه‌ها است. از این رو یک مدل میکرومکانیکی به منظور مطالعه تغییر شکل‌پذیری و فرآیند شکست سنگ بر مبنای در نظر گرفتن ناهمگنی سنگ در حد مزوسکوپی ارائه شده است. در این مدل عددی، ناهمگنی سنگ با فرض توزیع ویبال برای ویژگی‌های مختلف سنگ مانند مقاومت فشاری تک محوره، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و چگالی اعمال شده است. مکانیک شکست الاستیک به عنوان قانون اصلی برای المان‌های مزو و روش المان محدود به عنوان ابزار اصلی تحلیل تنش است. معیار تنش کششی ماکزیمم و موهر-کولمب به‌عنوان معیارهای شکست اعمال شده‌اند. بر اساس این مدل یک برنامه عددی با عنوان تحلیل فرآیند شکست سنگ توسعه داده شده است [۱۶].

همانگونه که اشاره شد در این نرم‌افزار از توزیع ویبال با تابع چگالی احتمال مطابق رابطه ۱ به منظور تولید نمونه‌های ناهمگن استفاده می‌شود.

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

که در آن:

u پارامتر تخصیص داده شده به المان‌ها، همچون مقاومت یا

مدول الاستیسیته

u_0 پارامتر مقیاس

m شاخص همگنی ماده

نمونه‌های حاوی یک، دو و سه ترک مصنوعی بوسیله مدلسازی عددی به روش المان محدود^۱ انجام گرفت. در این بررسی‌ها تاکید بر تأثیر هندسه‌های متفاوت ترک مصنوعی (زاویه و تعداد ترک مصنوعی) بر رفتار مقاومتی نمونه‌های واقعی بازالت است. همچنین نحوه بهم وصل شدن ترک‌ها در این مطالعه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- روش انجام آزمایش و مدل‌سازی

برای بررسی رفتار مکانیکی سنگ با ترک‌های مصنوعی متفاوت تحت فشار تک محوره، نمونه‌هایی از یک بلوک بازالت برای مطالعه انتخاب شد. ترکیب کانی‌شناسی این بازالت شامل کانی‌های مافیک، پلاژیوکلاز، پیروکسن (دانه ریز و تا حدود خیلی کم دانه درشت) و چگالی آن حدود 3 gr/cm^3 است.

برای ایجاد ترک مصنوعی در نمونه بکر از یک دستگاه برش برقی پرسرعت استفاده شد. بوسیله این دستگاه ترک‌هایی با هندسه‌های متفاوت و با ضخامت ۲mm در نمونه آزمایشگاهی ایجاد شد اما برای نمونه‌های مدلسازی شده با نرم‌افزار ترک‌ها با ضخامت ۱mm در نظر گرفته شدند (شکل ۲). هندسه‌های مختلفی برای ترک مصنوعی (نوع ۱ تا ۱۶) در این مطالعه انتخاب شده‌اند که جزئیات آن‌ها در جدول ۱ خلاصه شده است. در جدول ۱ نمونه شماره ۱ سنگ بکر، نمونه‌های ۲ تا ۱۳ نمونه‌های مدلسازی شده و ۱۴ تا ۱۶ مربوط به نمونه‌های با ترک مصنوعی است که در آزمایشگاه ایجاد شده‌اند. همه آزمایش‌ها تحت شرایط طبیعی و با آهنگ جابه‌جایی کنترل شده 0.002 mm/s انجام شدند. در حین آزمایش فشاری تک محوره، مقدار بار اعمالی و تغییر شکل نمونه‌های بازالت آزمایش شده به طور همزمان ذخیره شد.

هندسه ترک مصنوعی نمونه‌های آزمایشگاهی و مدلسازی شده در شکل ۲ توصیف شده است. طول ترک مصنوعی $2a$ ، زاویه ترک مصنوعی α (زاویه ترک مصنوعی با جهت تنش فشاری حداکثر) α ، طول وتر (فاصله میان دو ترک مصنوعی) $2b$ و طول وتر پله‌ای (فاصله میان دو ترک پله‌ای مصنوعی) $2c$ است. مطابق با روش پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ [۱۵]، نسبت طول به قطر نمونه آزمایش شده باید بین ۲ تا ۳ بوده و اثر اصطکاک انتهای نمونه روی نتایج آزمایش شده کمینه باشد. بنابراین همه نمونه‌های بازالت به شکل استوانه با قطر ۵۰mm و طول ۱۰۰mm یعنی با نسبت طول به قطر ۲ تهیه و آماده شده‌اند.

جدول ۱: هندسه ترک‌های مصنوعی نمونه‌های بازالت تحت فشار تک محوره

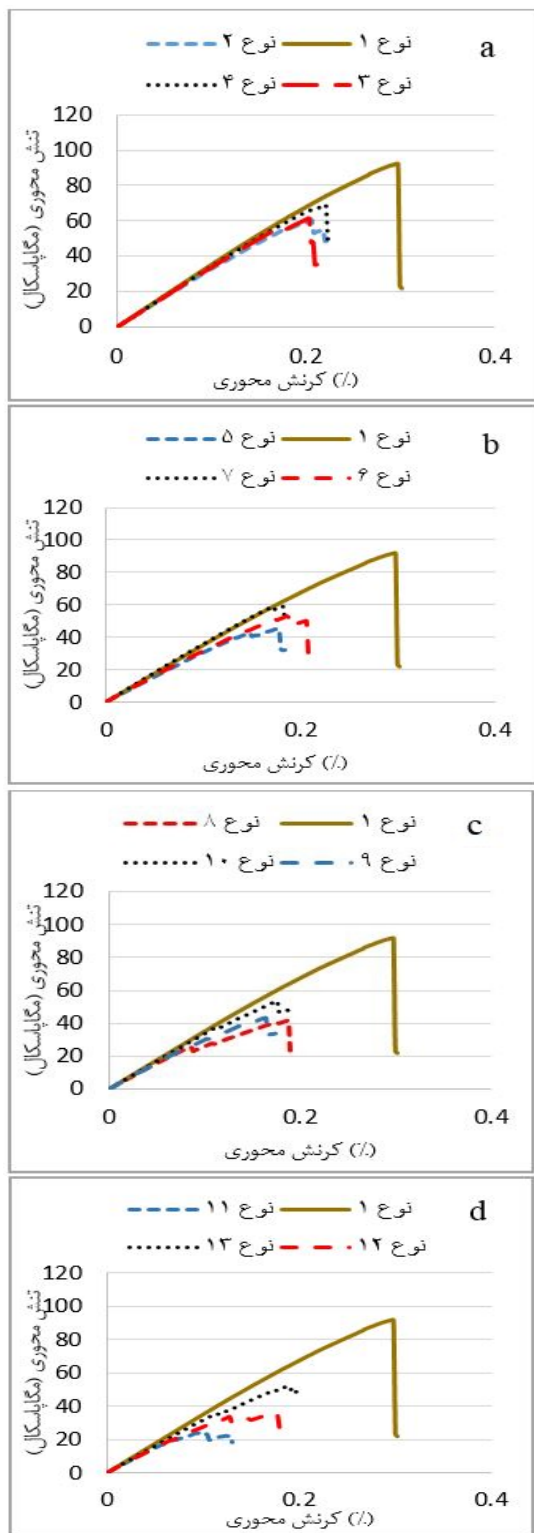
نوع هندسه ترک	تعداد ترک	شماره ترک مصنوعی	$-\alpha$ ۹۰	2a (mm)	2b (mm)	2c (mm)
۱	-	-	-	-	-	-
۲	۱	۱	۳۰	۱۴	-	-
۳	۱	۱	۴۵	۱۴	-	-
۴	۱	۱	۶۰	۱۴	-	-
۵	۲*	۱ و ۲	۳۰	۱۴	۱۴	-
۶	۲*	۱ و ۲	۴۵	۱۴	۱۴	-
۷	۲*	۱ و ۲	۶۰	۱۴	۱۴	-
۸	۲**	۱ و ۳	۳۰	۱۴	-	۱۰
۹	۲**	۱ و ۳	۴۵	۱۴	-	۱۰
۱۰	۲**	۱ و ۳	۶۰	۱۴	-	۱۰
۱۱	۳	۱ و ۲ و ۳	۳۰	۱۴	۱۴	۱۰
۱۲	۳	۱ و ۲ و ۳	۴۵	۱۴	۱۴	۱۰
۱۳	۳	۱ و ۲ و ۳	۶۰	۱۴	۱۴	۱۰
۱۴	۲	۱ و ۳	۳۰	۲۹	-	۱۰
۱۵	۲	۱ و ۳	۴۵	۲۵	-	۱۰
۱۶	۲	۱ و ۳	۶۰	۴۵	-	۱۰

* ترک‌های ناممتمد

** ترک‌های پله‌ای

۳- مقاومت و تغییر شکل نمونه‌های بازالت

شکل ۳ منحنی تنش محوری- کرنش محوری برای نمونه‌های بازالت با هندسه ترک‌های مختلف (نوع ۱ تا ۱۳) تحت فشار تک محوره نشان می‌دهد. نوع ۱ نمونه بکر، اما انواع ۲ تا ۱۳ نمونه‌های با ترک مصنوعی مختلف هستند. چنانچه از این شکل مشخص است هندسه ترک مصنوعی، یک نقش کلیدی در رفتار مقاومت و تغییر شکل نمونه‌های بازالت دارد.



شکل ۳: منحنی تنش محوری- کرنش محوری نمونه‌های بازالت با هندسه ترک‌های مختلف (نوع ۱ تا ۱۳) تحت فشار تک محوره، نوع ۱ نمونه بکر و نمونه‌های دیگر دارای ترک‌های مصنوعی مختلف هستند.

با دو ترک ناممتد و با سه ترک مصنوعی کمترین مقدار را در زاویه ۳۰ درجه دارند.

جدول ۲: پارامترهای مکانیکی نمونه‌های بازالت بکر و ترک‌دار با هندسه‌های مختلف تحت فشار تک محوره

ترک	نوع هندسه	تعداد ترک	شماره ترک	UCS (Mpa)	Es (Gpa)	E50 (Gpa)	Esec (Gpa)	εcr (%)
۱		-	-	۹۲	۳۳/۳۷	۳۴/۹۱	۳۰/۹	۰/۲۹۸
۲		۱	۱	۶۰/۶	۳۱/۳۶	۳۳/۲۵	۲۹/۴۶	۰/۲۰۶
۳		۱	۱	۶۱/۵	۳۲/۷	۳۳/۸۹	۳۰/۱۶	۰/۲۰۴
۴		۱	۱	۶۹/۳	۳۳/۶۷	۳۴/۳۳	۳۱/۲۴	۰/۲۲۲
۵		۲*	۱ و ۲	۴۵/۳	۳۰/۵	۳۱	۲۵/۴۳	۰/۱۷۸
۶		۲*	۱ و ۲	۵۳/۱	۳۰/۱۴	۳۱/۸۷	۲۷/۴۱	۰/۱۹۴
۷		۲*	۱ و ۲	۵۸/۷	۳۵/۰۴	۳۶/۰۱	۳۲/۲۸	۰/۱۸۲
۸		۲**	۱ و ۳	۴۱/۵	۲۸/۷۲	۳۰/۶	۲۲/۱	۰/۱۸۸
۹		۲**	۱ و ۳	۴۳/۶	۲۹/۳۷	۳۱/۸۳	۲۶/۶۱	۰/۱۶۴
۱۰		۲**	۱ و ۳	۵۳/۵	۳۳/۴۵	۳۳/۸	۳۰/۴۳	۰/۱۷۶
۱۱		۳	۱ و ۲ و ۳	۲۴/۳	۲۹/۸	۳۰/۴۷	۲۵/۳۶	۰/۰۹۶
۱۲		۳	۱ و ۲ و ۳	۳۵/۸	۲۶/۱۵	۲۹/۸۳	۲۰/۸۱	۰/۱۷۲
۱۳		۳	۱ و ۲ و ۳	۵۲/۵	۳۱/۶۲	۳۲/۴	۲۷/۹۴	۰/۱۸۸
۱۴		۲	۱ و ۳	۳۰	-	-	-	-
۱۵		۲	۱ و ۳	۳۱/۵	-	-	-	-
۱۶		۲	۱ و ۳	۵۳/۱۴	-	-	-	-

* ترک‌های ناممتد

** ترک‌های پله‌ای

در جدول ۲:

UCS مقاومت فشاری تک محوره

εcr کرنش محوری متناظر با تنش حداکثر

Es مدول یانگ مماسی

E50 مدول متوسط در ۵۰ درصد مقاومت نهایی

Esec مدول سکانتی شیب

با توجه به شکل ۴ و جدول ۲ می‌توان تأثیر هندسه ترک مصنوعی را روی مقاومت نهایی، کرنش محوری متناظر با تنش حداکثر، مدول‌های یانگ مماسی، متوسط و سکانتی تحلیل و بحث کرد. بدیهی است که مقاومت فشاری تک محوره، مدول یانگ و کرنش محوری متناظر با تنش حداکثر نمونه‌های بازالت ترک‌دار کمتر از نمونه بکر هستند و از طرفی با افزایش تعداد ترک، مقاومت فشاری تک محوره و مدول یانگ کاهش می‌یابد. مقدار کاهش این مقادیر ارتباط نزدیکی با هندسه ترک مصنوعی دارد. در نمونه‌هایی که دارای دو ترک ناممتد هستند مقادیر مقاومت و مدول یانگ بیشتر از نمونه‌هایی است که در آن‌ها دو ترک حالت پله‌ای دارند.

چنانچه جدول ۲ نشان می‌دهد مقاومت فشاری تک محوره در نمونه‌های ترک‌دار از ۲۶ تا ۷۵ درصد مقاومت نمونه بکر تغییر می‌کند. از شکل ۴a به کمک جدول ۱ می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت تک محوره با افزایش طول، تعداد و یا زاویه ترک مصنوعی کاهش می‌یابد اما طول و زاویه وتر روی مقاومت نمونه‌های ترک‌دار تأثیر مشخصی ندارد.

در این مطالعه، مدول یانگ مماسی، متوسط و سکانتی نمونه بازالت بکر به ترتیب ۳۳/۳۷، ۳۴/۹۱ و ۳۰/۹ و میانگین آن‌ها ۳۳/۰۶ گیگاپاسکال بود. میانگین این سه نوع مدول یانگ در نمونه‌های ترک‌دار از ۷۶ تا ۱/۰۴ درصد میانگین این مدول‌ها در نمونه بکر تغییر می‌کند. مقدار مدول یانگ نمونه ترک‌دار نوع ۱۲ (دارای سه ترک با زاویه ۴۵ درجه) نسبت به سایر نمونه‌های ترک‌دار کمتر است که دلیل آن وجود سه ترک در نمونه است که باعث بیشترین تغییر شکل در فرآیند بارگذاری محوری و کمترین مقدار مدول یانگ می‌شود. مدول یانگ نمونه نوع ۷ (دارای دو ترک ناممتد با زاویه ۶۰ درجه) در بین تمام نمونه‌های ترک‌دار دارای بیشترین مقدار بوده که به علت وجود کمترین تغییر شکل در نمونه است که این خود به دلیل مقدار زاویه ترک است.

در تنش فشاری حداکثر مقدار کرنش نمونه بکر ۰/۲۹۸ است. در حالی که در نمونه‌های ترک‌دار این مقدار از ۰/۰۹۶ درصد (نوع ۱۱، دارای سه ترک با زاویه ۳۰ درجه) تا ۰/۲۲۲ درصد (نوع ۴، دارای یک ترک با زاویه ۶۰ درجه) تغییر می‌کند. علاوه بر این، کرنش محوری متناظر با تنش حداکثر در نمونه‌های دارای یک ترک و یا دو ترک پله‌ای مصنوعی با زاویه ۴۵ درجه، دارای کمترین مقدار هستند، این در حالی است که نمونه‌های

همه انواع ترک‌ها در نمونه‌های مدلسازی شده مشاهده شد که در زیر توصیف می‌شوند:

ترک کششی نوع ۱: ترک‌های باله‌ای به طور معمول اولین ترک‌هایی بودند که از نوک ترک مصنوعی در نمونه‌ها (نوع ۵، ۶، ۸، ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳) شروع شدند. این ترک‌ها در ابتدا عمود بر ترک مصنوعی بوده و در ادامه در جهت تنش محوری گسترش یافته و به تدریج متوقف می‌شدند.

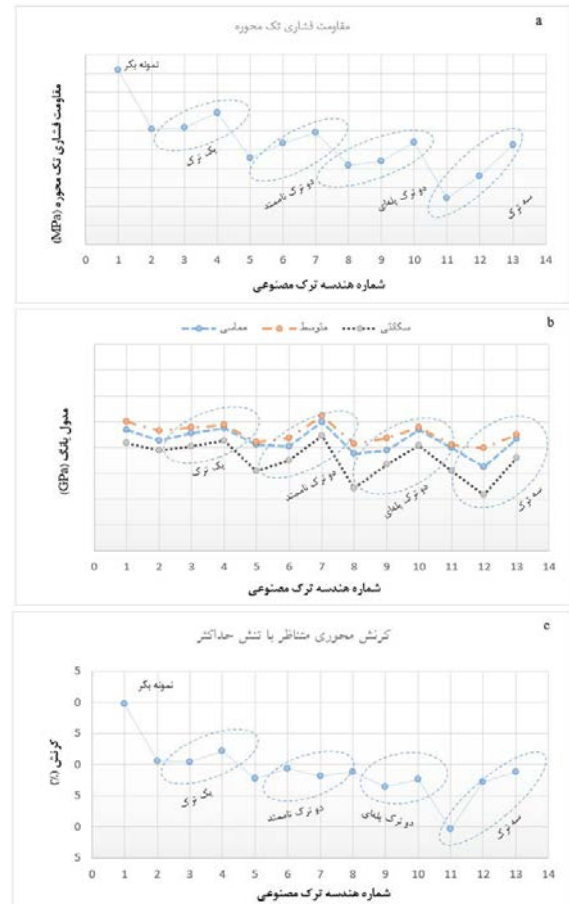
ترک کششی نوع ۲: شبیه به ترک کششی نوع ۱ و به طور معمول از نوک ترک مصنوعی در نمونه‌ها (نوع ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳) شروع می‌شود. این ترک‌ها بر خلاف ترک‌های قبلی ابتدا با زاویه‌ای کم نسبت به ترک مصنوعی شروع شده و به تدریج در جهت تنش محوری گسترش می‌یافتند.

ترک کششی نوع ۳: ترک‌های کششی پاد باله‌ای به طور معمول از نوک ترک مصنوعی در نمونه‌ها (نوع ۵، ۶، ۱۱، ۱۲ و ۱۳) شروع شدند. این ترک‌ها در جهت عکس ترک‌های کششی نوع ۲ شروع شده و از همان ابتدا در جهت تنش محوری گسترش می‌یابند.

ترک برشی نوع ۱: شبیه به ترک کششی نوع ۲ و به طور معمول از نوک ترک مصنوعی در نمونه‌ها (نوع ۸، ۹، ۱۱، ۱۲ و ۱۳) شروع می‌شود. این ترک‌ها همچنین با زاویه‌ای کم نسبت به ترک مصنوعی شروع شده و به تدریج در جهت تنش محوری گسترش می‌یابند ولی بر خلاف ترک کششی نوع ۲ کاملاً موازی با آن نمی‌شوند.

ترک برشی نوع ۲: این ترک برشی از نوک ترک مصنوعی نمونه (نوع ۷) شروع و در راستای ترک مصنوعی گسترش می‌یابد تا دو ترک بهم وصل شوند.

ترک برشی نوع ۳: شبیه به ترک کششی نوع ۳ است و به طور معمول از نوک ترک مصنوعی در نمونه‌ها (نوع ۵، ۶، ۱۲ و ۱۳) شروع می‌شود. این ترک‌ها بر خلاف ترک کششی نوع ۳ با یک زاویه نسبتاً کم با راستای تنش محوری است.

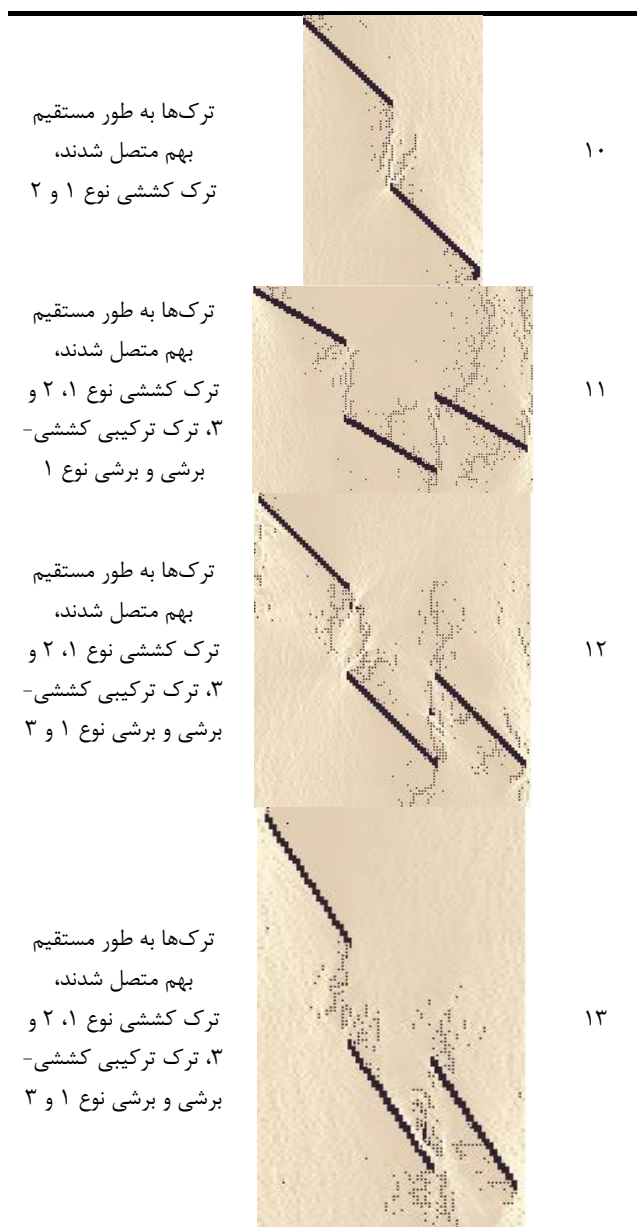


شکل ۴: تأثیر هندسه ترک مصنوعی بر مقاومت و پارامترهای تغییر نمونه‌های بازالت تحت فشار تک محوره

۴- به هم وصل شدن ترک‌ها

برای نمونه بکر (نوع ۱) شکست برشی اتفاق افتاد که با نتایج آزمایشگاهی از سنگ‌های شکننده [۷] تطابق خوبی داشت. همچنین طبق نتایج مدلسازی برای نمونه‌های ترک‌دار (نوع ۲ تا ۱۳) تحت فشار تک محوره، مدهای شکست مختلفی نسبت به نمونه بکر مشاهده شد. بهم وصل شدن ترک در بیشتر موارد از نوک ترک‌های مصنوعی در نمونه‌های ترک‌دار مشاهده شد و مد شکست به طور واضح به هندسه ترک در نمونه وابسته بود.

این مطالعه ۷ نوع ترک مختلف را نشان می‌دهد که بر اساس هندسه ترک مصنوعی و مکانیزم گسترش ترک (کششی، برشی و ترکیب کششی-برشی) شناسایی شدند (جدول ۳). بر طبق مطالعه وانگ و انیشتین [۱۲] سه نوع ترک کششی، سه نوع ترک برشی و یک نوع ترک ترکیبی کششی-برشی وجود دارد.



ترک ترکیبی کششی-برشی: این نوع ترک، ترکیبی از ترک کششی نوع ۲ و ترک برشی نوع ۱ بوده و به طور معمول از نوک ترک مصنوعی در نمونه‌ها (نوع ۸، ۹، ۱۱، ۱۲ و ۱۳) شروع می‌شود. این ترک‌ها در زاویه‌ای کم نسبت به ترک مصنوعی (شبيه به ترک برشی نوع ۱) شروع شده و به تدریج در جهت تنش محوری (شبيه به ترک کششی نوع ۲) گسترش می‌یابد.

جدول ۳: طبقه‌بندی انواع ترک‌های تشکیل شده و نحوه بهم متصل شدن ترک‌ها

نوع هندسه ترک	الگوی گسترش ترک	ترک و انواع ترک تولید شده	نحوه بهم وصل شدن
۵		ترک‌ها بدون آنکه بهم متصل شوند گسترش یافتند، ترک کششی نوع ۱ و ۳ و ترک برشی نوع ۳	ترک‌ها بدون آنکه بهم متصل شوند گسترش یافتند، ترک کششی نوع ۱ و ۳ و ترک برشی نوع ۳
۶		ترک‌ها به طور غیر مستقیم بهم متصل شدند، ترک کششی نوع ۱ و ۳ و ترک برشی نوع ۳	ترک‌ها به طور مستقیم بهم متصل شدند، ترک کششی نوع ۱ و ۳ و ترک برشی نوع ۳
۷		ترک‌ها به طور مستقیم بهم متصل شدند، ترک برشی نوع ۲	ترک‌ها به طور مستقیم بهم متصل شدند، ترک برشی نوع ۲
۸		ترک‌ها به طور مستقیم بهم متصل شدند، ترک کششی نوع ۱ و ۲، ترک ترکیبی کششی-برشی و برشی نوع ۱	ترک‌ها به طور مستقیم بهم متصل شدند، ترک کششی نوع ۱ و ۲، ترک ترکیبی کششی-برشی و برشی نوع ۱
۹		ترک‌ها به طور مستقیم بهم متصل شدند، ترک کششی نوع ۲، ترکیبی برشی-کششی و برشی نوع ۱	ترک‌ها به طور مستقیم بهم متصل شدند، ترک کششی نوع ۲، ترکیبی برشی-کششی و برشی نوع ۱

با اقتباس از انواع ترک‌های تولید شده و نحوه بهم وصل شدن آن‌ها در نرم‌افزار RFPA، مد شکست نمونه‌های بازالت (جدول ۳) مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نمونه‌های ترک‌دار چندین نوع ترک متفاوت تشکیل می‌شود و مدهای شکست متفاوتی بوجود می‌آید. برای مثال در نمونه دارای دو ترک ناممتمد با زاویه شیب ۳۰ درجه، ترک‌های مصنوعی بهم متصل نمی‌شوند و در نمونه دارای دو ترک ناممتمد با زاویه شیب ۴۵ درجه ترک‌های مصنوعی به طور غیر مستقیم و در نمونه‌های دیگر، ترک‌های مصنوعی به طور مستقیم بهم متصل می‌شوند. در تعدادی از

۶۰ درجه) در بین تمام نمونه‌های ترک‌دار دارای بیشترین مقدار است که به دلیل وجود کمترین تغییر شکل در نمونه است.

۷- نوع ترک با مکانیزم متفاوت در واکنش به بارگذاری تک محوره شروع شد که شروع اغلب آن‌ها از نوک ترک مصنوعی بود. ترک‌های کششی نوع ۱ و ۲ به طور معمول اولین ترک‌ها بودند که از نوک ترک مصنوعی شروع می‌شدند. ترک کششی نوع ۳ معمولاً به عنوان ترک ثانویه بعد از ترک اولیه بود که همراه با ترک کششی نوع ۱ و ۲ مشاهده شد ولی جهت گسترش آن عکس جهت ترک‌های کششی نوع ۱ و ۲ بود. ترک برشی نوع ۲ فقط در نمونه ترک‌دار نوع ۷ ولی انواع ترک‌های دیگر در اکثر نمونه‌ها تشکیل شدند.

۸- در نمونه دارای دو ترک ناممتد با زاویه شیب ۳۰ درجه، ترک‌های مصنوعی بهم وصل نشدند اما نمونه دارای دو ترک ناممتد با زاویه شیب ۴۵ درجه، ترک‌های مصنوعی به طور غیر مستقیم و در نمونه‌های دیگر، ترک‌های مصنوعی به طور مستقیم بهم وصل شدند. در تعدادی از نمونه‌ها هم، ترک‌های مصنوعی از طریق یک یا چند مسیر بهم رسیدند و نیز در بعضی از موارد چند نوع ترک با یکدیگر تشکیل شدند.

[5] Bobet A. The initiation of secondary cracks in compression. *Engineering Fracture Mechanics* 2000;66(2):187-219.

[6] Wong R, Chau K, Tang C, Lin P. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws—part I: experimental approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 2001;38:909-24.

[7] Yang S, Jiang Y, Xu W, Chen X. Experimental investigation on strength and failure behavior of pre-cracked marble under conventional triaxial compression. *International Journal of Solids and Structures* 2008;45(17):4796-819.

[8] Wang E, Shrive N. Brittle fracture in compression: mechanisms, models and criteria. *Engineering Fracture Mechanics* 1995;52(6):1107-26.

[9] Bobet A, Einstein H. Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression.

نمونه‌ها، ترک‌های مصنوعی از طریق یک یا چند مسیر بهم متصل می‌شوند و همچنین چند نوع ترک به طور همزمان تشکیل می‌شوند.

در این بخش، نحوه بهم وصل شدن ترک‌ها و انواع ترک‌های تولید شده نمونه‌های ترک‌دار با انواع هندسه‌های متفاوت ترک مصنوعی (زاویه و تعداد ترک مصنوعی) تحت آزمایش فشاری تک محوره مورد بررسی قرار گرفت. اگرچه این نتایج کیفی هستند ولی در بررسی رفتار شکست سنگ بسیار اهمیت دارند.

۵- نتیجه‌گیری

براساس نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی عددی روی نمونه‌های بازالت با ترک‌های مصنوعی مختلف نتایج زیر بدست آمد:

- میزان کاهش مقاومت فشاری تک محوره و کرنش محوری متناظر با تنش حداکثر ارتباط نزدیکی با هندسه ترک مصنوعی دارد. با افزایش تعداد و زاویه ترک مصنوعی مقدار مقاومت تک محوره فشاری کاهش یافت.

- مدول یانگ نمونه ترک‌دار نوع ۱۲ (دارای سه ترک با زاویه ۴۵ درجه) کمترین مقدار است که دلیل آن وجود سه ترک در نمونه است که باعث بیشترین تغییر شکل و کمترین مدول یانگ می‌شود. مدول یانگ نمونه نوع ۷ (دو ترک ناممتد با زاویه

۶- مراجع

[1] Horii H, Nemat-Nasser S. Compression-induced microcrack growth in brittle solids: Axial splitting and shear failure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012) 1985;90(B4):3105-25.

[2] Shen B. The mechanism of fracture coalescence in compression—experimental study and numerical simulation. *Engineering Fracture Mechanics* 1995;51(1):73-85.

[3] Shen B, Stephansson O, Einstein HH, Ghahreman B. Coalescence of fractures under shear stresses in experiments. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 1995;100(B4):5975-90.

[4] Zhu WS, Chen WZ, Shen J. Simulation experiment and fracture mechanism study on propagation of echelon pattern cracks. *Acta Mechanica Solida Sinica* 1998;19:355-60.

compression: a numerical study based on parallel bonded-model approach. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 2012;45:711-737.

[14] Zhang XP, Wong LNY Crack initiation, propagation and coalescence in rock-like material containing two flaws: a numerical study based on bonded-particle model approach. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 2013;46:1001-1021.

[15] Fairhurst C, Hudson J. Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 1999;36(3):279-89.

[16] ZhuW, TangC. Micromechanical model for simulating the fracture process of rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 2004;37(1):25-56.

International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 1998;35(7):863-88.

[10] Wong RH, Chau K. Crack coalescence in a rock-like material containing two cracks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 1998;35(2):147-64.

[11] Vasarhelyi B, Bobet A. Modeling of crack initiation, propagation and coalescence in uniaxial compression. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 2000;33(2):119-39.

[12] Wong L, Einstein H. Systematic evaluation of cracking behavior in specimens containing single flaws under uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 2009;46(2):239-49.

[13] Zhang X, Wong L. Cracking processes in rock-like material containing a single flaw under uniaxial

1Finite Element Method (FEM)

2ISRM

3Rock Failure Process Analysis (RFPA)