

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر پیش ترک بر رفتار خزشی سنگ‌های شکننده

مرتضی احمدی^{۱*}، کامران گشتاسبی^۱، بهروز دادرسی^۲، حمیدرضا نجاتی^۳

پذیرش مقاله: ۹۲/۰۳/۰۱

دریافت مقاله: ۹۱/۰۳/۰۷

چکیده

پایداری بلند مدت سازه‌های بنا شده در سنگ، وابسته به تغییر شکل خزشی سنگ‌های در برگیرنده سازه می‌باشد. بنابراین مطالعه تغییر شکل وابسته به زمان سنگ‌ها، در طراحی سازه‌های سنگی از اهمیت زیادی برخوردار است. در گذشته تحقیقات زیادی در زمینه رفتار خزشی سنگ‌های نرم مثل مارن، سنگ نمک و شیل انجام شده است. رفتار خزشی سنگ‌های شکننده کمتر مورد توجه قرار گرفته است و این در حالی است که سنگ‌ها عموماً رفتاری ترد و شکننده دارند. در این مطالعه رفتار خزشی دو نوع سنگ شکننده با درجه شکنندگی متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین از آنجایی که وجود ترک در سازه‌های سنگی اجتناب‌ناپذیر است، تأثیر وجود ترک بر رفتار خزشی نمونه‌های سنگی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور نمونه‌های سنگی مرمر و ماسه سنگ در دو حالت ترک‌دار و بدون ترک تحت بار ثابت خزش قرار داده شده‌اند و بر اساس نتایج آزمون‌های انجام شده رابطه‌ای برای پیش‌بینی رفتار خزشی سنگ‌ها در مراحل اول و دوم خزش تحت بار کشش غیر مستقیم ارائه شده است. در نهایت رابطه‌ای برای پیش‌بینی زمان شروع مرحله سوم خزش تحت بار ثابت، پیشنهاد شده است. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که وجود ترک در سنگ مرمر، با درجه شکنندگی بالاتر نسبت به ماسه سنگ، تأثیر بیشتری بر کاهش زمان و کرنش شکست نسبت به ماسه سنگ خواهد داشت. به عبارت دیگر، وجود ترک در سنگی با شکنندگی بالاتر تأثیر بیشتری در کاهش کرنش و به تبع آن زمان شکست دارد.

کلید واژه‌ها: پیش ترک، ترک، خزش، سنگ شکننده، مکانیک شکست

۱. دانشیار گروه مکانیک سنگ، بخش معدن دانشگاه تربیت مدرس moahmadi@modares.ac.ir

۲. کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس

۳. دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

شکست ناگهانی سازه‌های سنگی تحت بارگذاری ثابت، اهمیت مطالعه رفتار خزشی سنگ‌ها را مشخص می‌نماید. مطالعات متعددی در زمینه بررسی رفتار خزشی سنگ‌ها صورت گرفته است (Boukharov et al., 1995, Yang et al., 1999, Maranini and Brignoli, 1999, Malan, 1999, Lin et al., 2004, Amitrano and Helmstetter, 2006, Chen and Azzam, 2007, Yang and Jiang, 2010). که بیشتر این مطالعات بر روی سنگ‌های نرم و شکل‌پذیر مانند مارن و سنگ‌نمک انجام شده و رفتار خزشی سنگ‌های شکننده کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. در بسیاری موارد مطالعه شکست و تغییر شکل سنگ‌ها تحت شرایط خزشی، برای درک رفتار سازه‌های سنگی و ساختارهای زمین‌شناختی نظیر گسل‌ها که رفتار وابسته به زمان دارند، مفید می‌باشد (Amitrano and Helmstetter, 2006).

وجود ترک در توده سنگ یک پدیده معمول بوده و باعث کاهش مقاومت سنگ می‌شود. بدون شک رفتار خزشی سنگ‌های بدون ترک و ترک‌دار کاملاً متفاوت است. زیرا وجود ترک به شدت بر روی مقدار مقاومت سنگ و میزان جابه‌جایی یا کرنش مورد نیاز تأثیر می‌گذارد. بنابراین در طراحی زمان پایداری فضاهای زیرزمینی باید مناطق ترک‌دار و سیستم درزه و ناپیوستگی در محاسبات لحاظ شود.

تغییر شکل سنگ‌ها رابطه مستقیمی با زمان بارگذاری دارد. بعضی از سنگ‌ها مثل گابرو و گرانیت، کرنش وابسته به زمان کمتری نسبت به سنگ‌های نرم‌تر مثل سنگ نمک، پتاس و زغال سنگ دارند. کرنش وابسته به زمان سنگ‌های نرم از تغییر شکل الاستیک آنی هم بیشتر است (Singh, 1975).

فرآیند توسعه و گسترش تغییر شکل خزشی، یک فاکتور مهم و ضروری برای پایداری بلند مدت سازه‌های سنگی است. نتایج مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که گسترش ترک‌های بحرانی دلیل اصلی شکست خزشی سنگ‌های شکننده می‌باشد (Shao et al., 2005, Kranz, 1979, Miura et al., 2003, Rinne, 2008, Heap et al., 2011). تعدادی از تحقیقات گذشته، مشخص نموده است که تغییر شکل خزشی

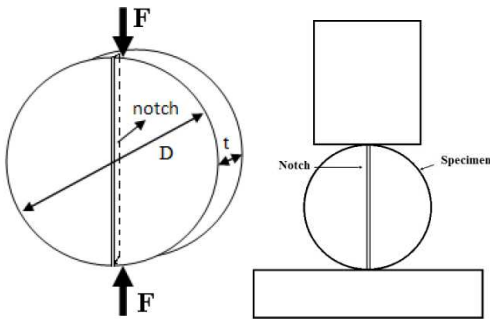
سنگ معمولاً از روند واحدی تبعیت می‌کند که این روند از سه مرحله تشکیل می‌شود، خزش اولیه (کاهش نرخ کرنش)، خزش ثانویه (نرخ کرنش ثابت) و در صورت بالا بودن سطح تنش وارده، مرحله سوم خزش (افزایش نرخ کرنش) نیز اتفاق می‌افتد (Armitrano and Helmstetter, 2006, Yang and Jiang, 2010). در طول فاز اولیه و ثانویه، تجمع و رشد ریزترک‌ها به طور یکنواخت و سراسری اتفاق می‌افتد. در مرحله سوم خزش، تغییر شکل وابسته به زمان با رشد ترک افزایش پیدا می‌کند که این مساله برای پیش‌بینی شکست سنگ‌ها و توده‌سنگ در طولانی مدت بسیار مهم است. در این مرحله چگالی ترک‌ها به سطح بحرانی می‌رسد و رشد ترک به سمت نقاط ضعیف هدایت می‌شود. این مناطق ضعیف سریع رشد می‌کنند و میکروترک‌ها بسته می‌شوند و شکست سنگ اتفاق می‌افتد (Heap et al., 2011).

در این تحقیق رفتار خزشی سنگ‌های شکننده و نیمه شکننده مورد مطالعه قرار گرفته و تأثیر شکنندگی و وجود ترک در مدت زمان شکست خزشی و همچنین مقدار تغییر شکل در لحظه شکست مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور از سنگ شکننده آهک و سنگ نیمه شکننده ماسه‌سنگ که ساختاری هموزن و یک‌دست دارند، استفاده شده است. روشی که در این تحقیق برای مطالعه گسترش ترک مورد استفاده قرار می‌گیرد، بارگذاری قطری بر روی نمونه‌های دیسکی (برزیلی) است. در واقع نمونه‌های برزیلی آماده شده به دو دسته شامل یک دسته نمونه‌های بکر بدون پیش ترک و دسته دیگر نمونه‌های با پیش ترک لبه‌ای تقسیم شدند تا تأثیر وجود پیش ترک بر رفتار خزشی سنگ مورد بررسی قرار گیرد. پیش ترک اشاره شده با مته الماسه بر روی نمونه‌های سنگی ایجاد شد.

۲. تعیین پارامترهای سنگ مورد مطالعه

در این تحقیق از دو نوع سنگ، ماسه‌سنگ قرمز قم و سنگ آهک دهیید استفاده شده است. برای به دست آوردن پارامترهای ژئومکانیکی این دو نوع سنگ، ۹ آزمون مقاومت فشاری تک محوره روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۵۴

شکل شماتیک نمونه ترک‌دار و نحوه اعمال نیرو در این نوع آزمون در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱. شکل نمونه و نحوه اعمال بار در روش بارگذاری

فشاری قطری (Szendi-Horvath, 1982).

آزمون‌های مکانیک شکست با دستگاه خودکنترل با دقت $0/004$ میکرومتر انجام شده است. برای انجام این نوع آزمون محدودیت‌هایی برای ابعاد نمونه وجود دارد و ضخامت نمونه نباید کمتر از $0/7$ قطر آن باشد (Szendi-Horvath, 1982) که این نکته در آماده سازی نمونه‌ها رعایت شده است. قطر نمونه‌ها 54 میلی‌متر و ضخامت آنها از 38 تا 42 میلی‌متر متغیر و نرخ بارگذاری $0/12$ mm/s بوده است. نسبت طول ترک به ضخامت نمونه هم $0/4$ انتخاب شده است.

ایجاد ترک توسط دستگاه برش و با تیغه‌ای به ضخامت $0/5$ میلی‌متر انجام شد. تیز بودن نوک ترک باعث تمرکز تنش شده و مسیر ترک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Heap et al., 2011). لذا برای کم کردن تمرکز تنش از اهر مویی نیز در انتهای ترک استفاده شد. در شکل ۲ دو نمونه از سنگ‌های ترک‌دار که در این تحقیق برای دو نوع سنگ استفاده شده قابل مشاهده است. در شکل ۳ نحوه شکست نمونه‌های ترک‌دار سنگ آهک دهبید و ماسه سنگ قرمز ارائه شده است. شروع شکست دقیقاً از نوک ترک مصنوعی ایجاد شده در نمونه بوده است. شکست سنگ از نوع کششی و موازی با جهت بارگذاری است.

میلی‌متر و نسبت ارتفاع به قطر دو، 10 آزمون کششی غیر-مستقیم برزیلی روی نمونه‌های با نسبت ضخامت به قطر $0/5$ ، آزمون تعیین نسبت تخلخل و وزن مخصوص خشک طبق استانداردهای پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ انجام شده است (ISRM, 1891). میانگین نتایج آزمایش‌های انجام شده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. میانگین پارامترهای مقاومتی ماسه‌سنگ و سنگ آهک دهبید

نوع سنگ	σ_c	σ_t	ρ (Kg/m ³)	E (GPa)	ν	n	BI
ماسه سنگ	65	6/8	2458	6/8	0/2	4/2	9/56
سنگ آهک	147	9/4	2679	30	0/13	0/21	15/64

در جدول ۱، σ_c و σ_t به ترتیب مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی سنگ می‌باشند که از طریق آزمون کشش غیرمستقیم برزیلی محاسبه شده است. همچنین ρ ، E ، ν ، n و BI به ترتیب چگالی، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، تخلخل و ضریب شکنندگی سنگ‌های مورد مطالعه می‌باشد. مقدار ضریب شکنندگی سنگ از رابطه $BI = \frac{\sigma_c}{\sigma_t}$ محاسبه شده است.

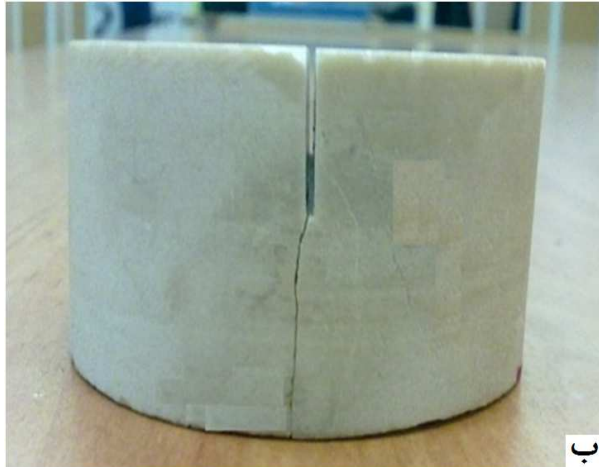
۳. آزمون مکانیک شکست سنگ

برای تعیین مقدار چقرمگی شکست و میزان کرنش شکست سنگ و بررسی نحوه رشد و گسترش ترک، انجام آزمون مکانیک شکست الزامی است. در این تحقیق از روش بارگذاری فشاری قطری با ترک سراسری که اولین بار توسط Szendi-Horvath (1982) برای به دست آوردن چقرمگی شکست کشش خالص ماسه‌سنگ به‌کار گرفته شد، استفاده شده است.

که در آن K_{IC} چقرمگی شکست $(Pa.\sqrt{m})$ ، P بار لحظه‌
شکست (نیوتن)، a طول ترک لبه ای (متر)، B ضخامت نمونه
(متر) و D قطر نمونه (متر) می‌باشد.



الف



ب

شکل ۳. نحوه شکست نمونه‌های ترک‌دار (الف) ماسه سنگ

قرمز (ب) سنگ آهک دهبید

جدول ۲. نتایج آزمون مکانیک شکست بر روی نمونه‌های

ترک‌دار و آزمون مشابه بر روی نمونه‌های بدون ترک

$K_{IC} (MPa.\sqrt{m})$	$\sigma_r (MPa)$		نوع سنگ
	با ترک پیش ساخته	بدون ترک پیش ساخته	
۲/۱	۶/۰۸	۷/۸۶	ماسه سنگ
۱/۵۵	۷/۱	۹/۹۴	قرمز قم سنگ آهک دهبید



الف



ب

شکل ۲. نمونه‌های ترک‌دار شامل (الف) ماسه سنگ قرمز (ب)

سنگ آهک دهبید

در جدول ۲ نتایج آزمون مکانیک شکست بر روی نمونه‌های
ترک‌دار و آزمون مشابه بر روی نمونه‌های بدون ترک ارائه
شده است.

مقدار چقرمگی شکست هم با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شده
است.

$$K_{IC} = \frac{1.264 \times P \times \sqrt{a}}{B \times D} \quad (1)$$



شکل ۴. دستگاه خزش هیدرولیکی الف) نحوه بارگذاری

ب) نحوه ثبت جابه جایی

در منحنی کرنش-زمان، نقطه‌ای که در آن تقعر منحنی به سمت بالا باشد و نرخ کرنش افزایش می‌یابد، همان نقطه شروع مرحله سوم خزش است. به منظور تعیین این نقطه، نتایج آزمون‌های انجام شده مورد بررسی قرار گرفته و لحظه شروع مرحله سوم برای هر کدام از آزمون‌های انجام شده تعیین شده و در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس مقدار به دست آمده از این جدول، طبق روندی که در ادامه توضیح داده خواهد شد، درصد کاهش زمان و کرنش در نمونه ترک‌دار نسبت به نمونه بدون ترک محاسبه شده و در جدول ۴ ارائه شده است. برای مثال این محاسبات برای ضریب ۰/۶۵ ماسه سنگ انجام شده تا روند انجام محاسبات مشخص شود.

۴. آزمون بارگذاری خزشی

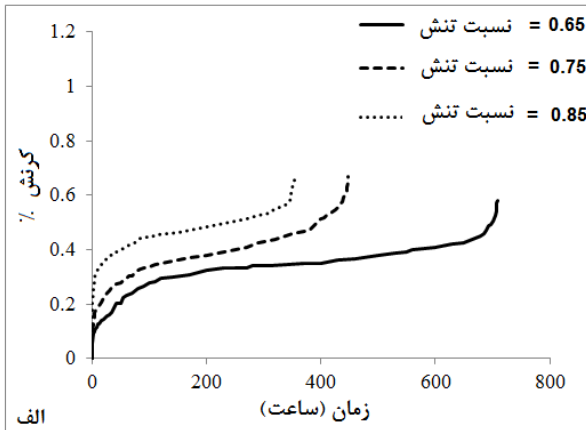
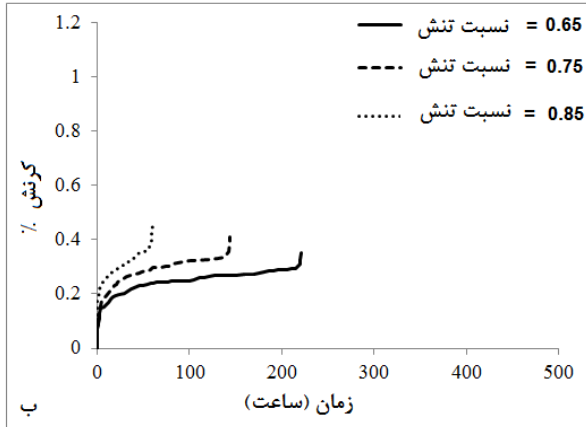
برای بررسی ترک‌خوردگی سنگ شکننده بر اثر گذشت زمان، آزمون خزش با بار ثابت بر روی سنگ‌های مورد نظر انجام گرفت. زاویه بارگذاری و موقعیت ترک در نمونه کاملاً مشابه آزمون شبه استاتیکی بوده با این تفاوت که در آزمون خزشی، درصدی از مقاومت نهایی نمونه‌ها که اصطلاحاً ضریب شدت بارگذاری نامیده می‌شود و در آزمون شبه استاتیکی به دست می‌آید، اعمال می‌شود و این وارده در طول آزمون ثابت می‌ماند تا نمونه بشکند و آزمایش خزش به اتمام برسد.

آزمون‌های خزش با دستگاه خزش هیدرولیکی که قادر به تأمین ۲۰۰ مگاپاسگال فشار هیدرولیکی می‌باشد، انجام شد. طراحی دستگاه به گونه‌ای است که بتوان برای زمان‌های طولانی فشار ثابتی را بر نمونه اعمال نمود. برای ثبت مقدار جابجایی نمونه نیز از جابه‌جایی‌سنج دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر استفاده شده است. این دستگاه و نحوه بارگذاری و ثبت جابجایی آن در شکل ۴ قابل مشاهده می‌باشد.

در این آزمون ضریب شدت بارگذاری‌های ۰/۶۵، ۰/۷۵ و ۰/۸۵ بر نمونه‌ها اعمال شده است. به عبارت دیگر برای هر نوع سنگ سه آزمون خزش تحت سه ضریب بار مختلف انجام شده است.

بعد از اینکه مقدار بار شکست نمونه‌ها مشخص شد، بر حسب ضریب شدت بارگذاری مورد نظر، نمونه‌ها تحت بار خزشی قرار داده می‌شوند. بعد از رساندن بار اعمالی بر نمونه به مقدار بار مورد نظر، ثبت کرنش نمونه آغاز می‌شود. با توجه به اینکه مقاومت سنگ با ترک پیش‌ساخته و سنگ بدون ترک با هم متفاوت می‌باشد، لذا برای مقایسه صحیح بین رفتار خزشی این دو نوع نمونه، ضریب شدت بارگذاری‌های هر دو نوع آزمون، بر حسب مقدار بار شکست مربوط به همان نوع نمونه است. به عنوان مثال، مقدار بار اعمالی در ضریب شدت بارگذاری ۰/۶۵، برای دو نوع نمونه (ترک‌دار و بدون ترک) متفاوت است. منحنی کرنش-زمان برای ماسه سنگ در دو حالت ترک دار و بدون ترک در ضریب شدت بارگذاری‌های ۰/۶۵، ۰/۷۵ و ۰/۸۵ در شکل (۵) ارائه شده است.

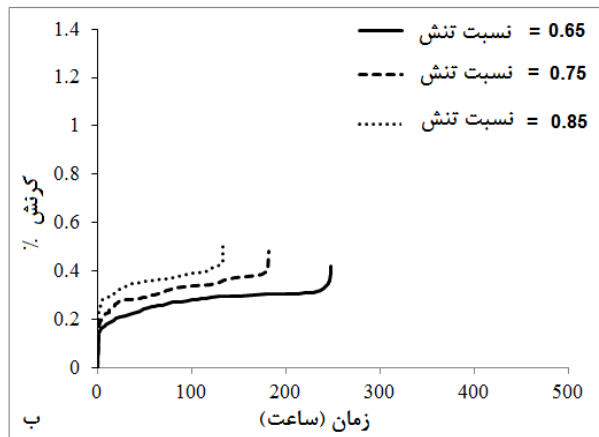
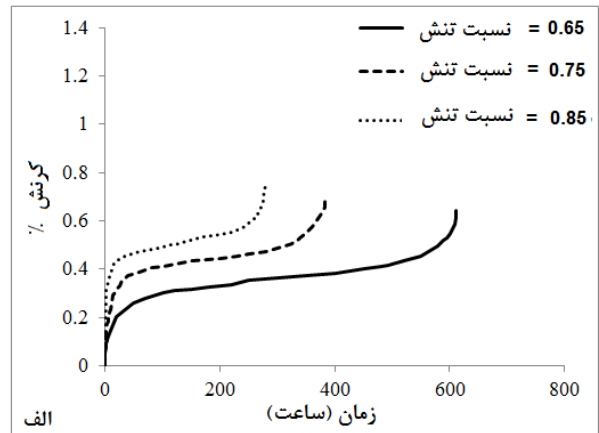
منحنی کرنش-زمان برای سنگ آهک دهیید در دو حالت ترک دار و بدون ترک در ضریب شدت بارگذاری‌های ۰/۷۵، ۰/۸۵ و ۰/۶۵ در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶. منحنی کرنش-زمان سنگ آهک در ضریب شدت بارگذاری ۰/۶۵، ۰/۷۵ و ۰/۸۵ (الف) نمونه بدون ترک و (ب) نمونه ترک‌دار

جدول ۳. میزان کرنش و زمان شروع مرحله سوم خزش ماسه سنگ و سنگ آهک در ضریب شدت بارگذاری‌های مختلف

ضریب شدت بارگذاری	هندسه نمونه	زمان شروع مرحله سوم		کرنش شروع مرحله سوم	
		خرش (ساعت)	خرش (درصد)	خرش (ساعت)	خرش (درصد)
۰/۶۵	سنگ آهک	دهیید	۵۵۰	دهیید	۰/۴۳
		ماسه سنگ	۶۵۰	دهیید	۰/۴۵
۰/۷۵	بدون ترک	دهیید	۳۴۰	دهیید	۰/۵۱
		ماسه سنگ	۴۴۷	دهیید	۰/۵۳
۰/۸۵	بدون ترک	دهیید	۲۶۰	دهیید	۰/۵۷
		ماسه سنگ	۳۴۳	دهیید	۰/۶۱
۰/۶۵	ترک‌دار	دهیید	۲۳۷	دهیید	۰/۲۹
		ماسه سنگ	۱۷۵	دهیید	۰/۳۳
۰/۷۵	ترک‌دار	دهیید	۱۳۲	دهیید	۰/۳۳
		ماسه سنگ	۱۴۰	دهیید	۰/۳۸
۰/۸۵	ترک‌دار	دهیید	۱۳۲	دهیید	۰/۳۶
		ماسه سنگ	۱۳۲	دهیید	۰/۴۳



شکل ۵. منحنی کرنش-زمان ماسه سنگ در ضریب شدت بارگذاری‌های ۰/۶۵، ۰/۷۵ و ۰/۸۵ (الف) نمونه‌های بدون ترک و (ب) نمونه‌های ترک‌دار

همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، مقدار کرنش و زمان شروع مرحله سوم خزش نمونه ترک‌دار نسبت به نمونه بدون ترک کاهش یافته است. در ضریب شدت بارگذاری ۰/۶۵، مقدار کاهش زمان شکست ۵۶/۹۲ درصد و مقدار کاهش کرنش در لحظه شروع مرحله سوم خزش ۲۶/۶۷ درصد می‌باشد. طریقه محاسبه این کاهش عبارت است از:

$$\Delta t = \frac{550 - 237}{550} * 100 = 56.92\%$$

$$\Delta \epsilon = \frac{0.45 - 0.33}{0.45} * 100 = 26.67\%$$

که در آن Δt درصد تغییر زمان شکست و $\Delta \epsilon$ درصد تغییر کرنش شروع مرحله سوم خزش در نمونه ترک‌دار نسبت به نمونه بدون ترک است.

خزشی برای دو نوع سنگ مورد مطالعه تحت بار کشش غیرمستقیم ثابت قبل از شروع مرحله سوم خزش، ارائه شود. در رابطه‌ی پیشنهاد شده یکی از پارامترها، مقدار تنش (σ) و پارامتر دیگر زمان (t) می‌باشد. با استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام شده و همچنین بر اساس تحلیل‌های آماری صورت گرفته رابطه شماره ۲ که نتیجه برازش گرفتن از نرم افزار متلب می‌باشد، حاصل شده است.

$$\varepsilon = \varepsilon(t, \sigma) = a \times \sigma^b \times t^c \quad (2)$$

که در آن t عامل زمان بر حسب ساعت، σ مقدار تنش بر حسب مگاپاسگال و (c, b, a) ضرایب ثابت هستند. ضرایب ثابت به دست آمده برای سنگ‌های متفاوت و هندسه نمونه (وجود ترک) مختلف است. در واقع این رابطه مشابه رابطه توانی هنسن ($\varepsilon = A \times \sigma^n \times t^m$) می‌باشد که نشان دهنده انطباق خوب نتایج آزمایشگاهی خزشی با این رابطه می‌باشد. در جدول ۵ مقادیر این ضرایب برای دو نوع سنگ (ماسه سنگ قرمز قم و سنگ آهک دهیید) ارائه شده است. منحنی‌های به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی و رابطه ارائه شده برای ماسه سنگ بدون ترک و ترک‌دار، به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است.

جدول ۵. ضرایب رابطه ۲ برای دو نوع سنگ

رگرسیون %	ضرایب			نوع سنگ
	c	b	a	
۹۷/۴۶	۲/۱۷۶	۰/۱۹۳	۰/۰۰۳۴	ماسه سنگ بدون ترک
۹۹/۱۳	۱/۴۳۶	۰/۱۶۵	۰/۰۱۷۷	ماسه سنگ ترک‌دار
۹۷/۶۹	۲/۰۴۲	۰/۲۱۷	۰/۰۰۲۱	سنگ آهک بدون ترک
۹۷/۸۸	۱/۷۲۱	۰/۱۹۷	۰/۰۰۷۵	سنگ آهک ترک‌دار

نتایج به دست آمده، گویای این حقیقت است که در حالت بدون ترک، ماسه سنگ کرنش بیشتری را نسبت به سنگ آهک داشته است ولی در زمان کوتاه‌تری به مرحله شروع شکست رسیده است. دلیل این تفاوت‌ها را می‌توان به تأثیر شکنندگی و مقاومت کششی این دو نوع سنگ مربوط دانست. در جدول ۴ نتایج به دست آمده از محاسبه درصد کاهش زمان و کرنش لحظه شروع مرحله سوم خزش ارائه شده است.

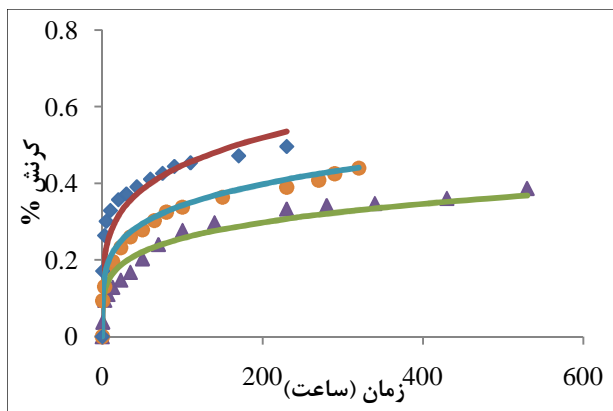
جدول ۴. درصد کاهش زمان و کرنش لحظه شروع مرحله سوم خزش ماسه سنگ و سنگ آهک به واسطه وجود ترک

ضریب شدت بارگذاری	درصد کاهش مقدار زمان		درصد کاهش مقدار کرنش	
	لحظه شروع مرحله سوم خزش ماسه سنگ	لحظه شروع مرحله سوم خزش سنگ آهک	لحظه شروع مرحله سوم خزش ماسه سنگ	لحظه شروع مرحله سوم خزش سنگ آهک
۰/۶۵	۵۶/۹۰	۶۷/۶۹	۲۶/۶۷	۳۲/۵۶
۰/۷۵	۴۸/۵۳	۶۷/۶۸	۲۸/۳۱	۳۵/۲۹
۰/۸۵	۴۹/۲۳	۸۳/۶۷	۲۹/۵۱	۳۶/۸۴

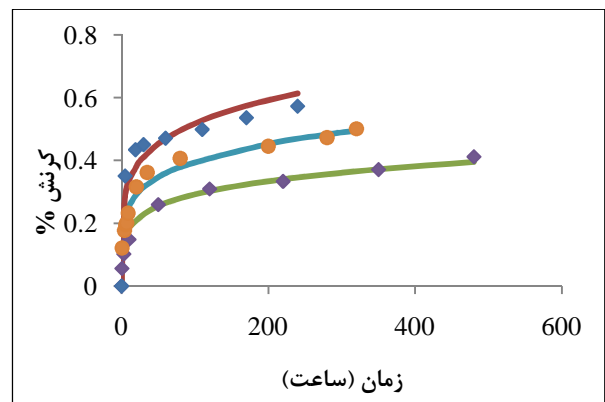
۴-۱. پیش بینی میزان کرنش خزشی قبل از شروع مرحله سوم خزش

هدف اصلی تحقیق و آزمون‌های انجام شده در زمینه رفتار خزشی سنگ‌ها پیش‌بینی میزان کرنش خزشی سنگ‌ها در مراحل اول و دوم و همچنین تعیین زمان شروع مرحله سوم خزش می‌باشد. البته این مسئله منحصر به رفتار خزشی سنگ‌ها نمی‌باشد و تحقیقات متعدد انجام شده در زمینه رفتار خزش فلزات نیز همین هدف را دنبال می‌نماید. به همین منظور روابط مختلفی برای تعیین کرنش مواد مختلف تحت بار ثابت و در مدت زمان معین ارائه شده است. از جمله معروف ترین این روابط که برای سنگ ارائه شده است، رابطه‌ی توانی Hansen می‌باشد (Hansen, 1977) این قانون توانی ابتدا برای رفتار خزشی سنگ‌های تبخیری (نمک) ارائه شد.

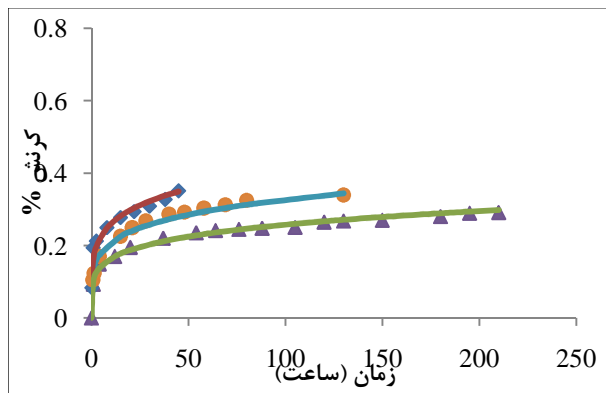
بر اساس آزمون‌های انجام شده در سه ضریب شدت بارگذاری، تلاش شده است تا رابطه‌ای برای پیش‌بینی کرنش



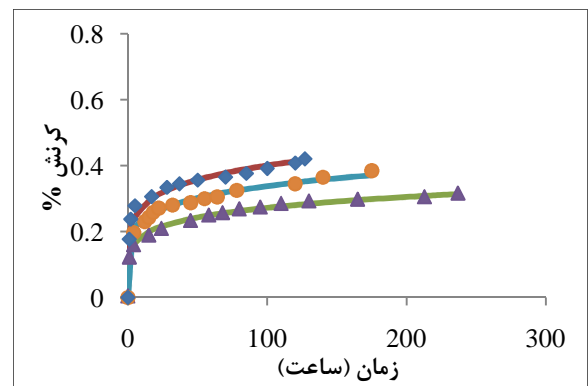
شکل ۹. منحنی کرنش زمان مرحله اول و دوم خزش سنگ آهک بدون ترک، خطوط نشان دهنده رابطه پیشنهادی و نقاط نشان دهنده نتایج آزمایشگاهی است



شکل ۷. منحنی کرنش زمان مرحله اول و دوم خزش ماسه سنگ بدون ترک، خطوط نشان دهنده رابطه پیشنهادی و نقاط نشان دهنده نتایج آزمایشگاهی است



شکل ۱۰. منحنی کرنش زمان مرحله اول و دوم خزش سنگ آهک ترک دار، خطوط نشان دهنده رابطه پیشنهادی و نقاط نشان دهنده نتایج آزمایشگاهی است



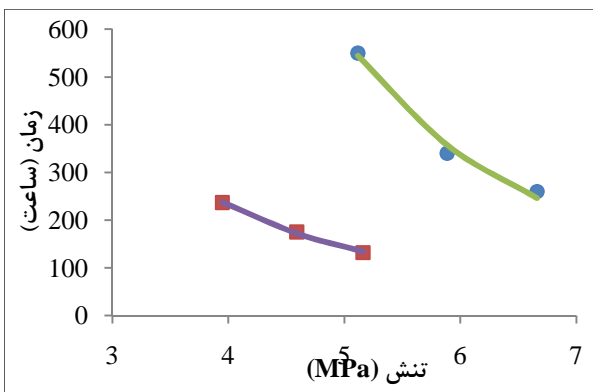
شکل ۸. منحنی کرنش زمان مرحله اول و دوم خزش ماسه سنگ ترک دار، خطوط نشان دهنده رابطه پیشنهادی و نقاط نشان دهنده نتایج آزمایشگاهی است

۴-۲. پیش بینی زمان شروع مرحله سوم خزش

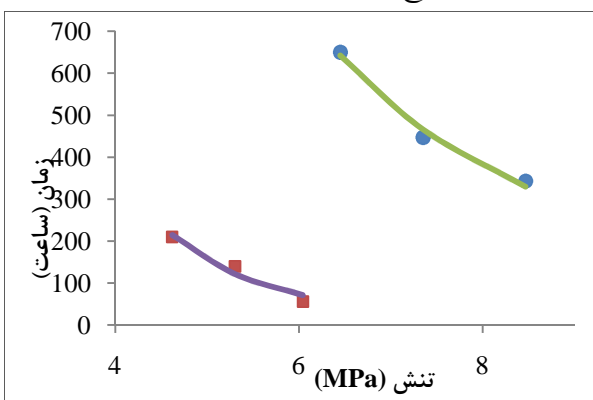
همان طور که پیش تر اشاره شد، تعیین زمان شروع مرحله سوم خزش، یکی از اهداف تحقیق است. بر اساس اطلاعات ثبت شده از آزمون های خزشی در جدول ۳ و بر اساس برآزش اطلاعات در نرم افزار متلب، رابطه ۳ برای پیش بینی زمان شروع مرحله سوم خزش برای سنگ های شکننده تحت بار کششی غیرمستقیم پیشنهاد شده است.

$$t = d\sigma^f \quad (3)$$

منحنی های به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی و رابطه ارائه شده برای سنگ آهک بدون ترک و ترک دار، در شکل های شماره ۹ و ۱۰ ارائه شده است.



شکل ۱۱. زمان شروع مرحله سوم خزش ماسه سنگ بر حسب تنش وارده، نقاط توپر نتایج آزمایشگاهی و منحنی‌ها منتج از رابطه ارائه شده است



شکل ۱۲. زمان شروع مرحله سوم خزش سنگ آهک دهبید بر حسب تنش وارده، نقاط توپر نتایج آزمایشگاهی و منحنی‌ها منتج از رابطه ارائه شده است.

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق رفتار وابسته به زمان دو نوع سنگ شکننده تحت بارگذاری خزشی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، تعدادی نمونه دیسکی از دو نوع سنگ با درجه شکنندگی متفاوت تهیه شده و آزمایش خزش تحت بار کشش غیرمستقیم روی این نمونه‌ها انجام شده است. همچنین به منظور بررسی تأثیر پیش ترک بر رفتار خزشی سنگ‌ها آزمایش مربوطه بر روی نمونه‌های دیسکی با پیش ترک لبه‌ای نیز انجام شده است. نتایج آزمون‌های انجام شده عبارتند از:

- در نمونه‌های بدون پیش ترک، ماسه سنگ کرنش بیشتری را نسبت به سنگ آهک داشته است ولی در زمان کوتاه‌تری به مرحله شروع شکست رسیده است. دلیل این تفاوت‌ها

در این رابطه t عامل زمان بر حسب ساعت، σ مقدار تنش بر حسب مگاپاسگال و f_{0d} نیز ضرایب ثابت می‌باشند. این ضرایب برای هر سنگ به دست خواهد آمد. در جدول ۶ مقادیر این ضرایب برای سنگ‌های آهک و ماسه سنگ ارائه شده است.

جدول ۶. ضرایب رابطه ۳ برای دو نوع سنگ

نوع سنگ	ضرایب		رگرسیون %
	d	F	
ماسه سنگ بدون ترک	-۳/۰۱	۷۳۶۹۰	۹۸/۸۴
ماسه سنگ ترک‌دار	-۲/۱۴	۴۵۱۳	۹۹/۷۹
سنگ آهک بدون ترک	-۲/۴۵	۶۲۰۳۰	۹۸/۷۵
سنگ آهک ترک‌دار	-۴/۰۹	۱۱۲۰۰۰	۹۵/۰۷

شکل ۱۱ برازش اطلاعات و رابطه پیشنهادی را به نمایش گذاشته است. در این شکل، تأثیر وجود ترک بر کاهش زمان شروع مرحله سوم خزش کاملاً مشخص است.

همانند روش مشابهی که برای ماسه سنگ انجام شده است تا رابطه پیش‌بینی زمان شروع مرحله سوم خزش ارائه شود، برای سنگ آهک دهبید نیز رابطه‌ای مشابه رابطه ماسه سنگ ارائه شده است که ضرایب و مقدار رگرسیون رابطه پیشنهادی تعیین شده است و در جدول ۶ ارائه شده است. در شکل ۱۲، منحنی نقاط به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی و رابطه پیشنهادی ارائه شده است.

با استفاده از رابطه پیشنهاد شده، با معلوم بودن مقدار تنش کششی وارده بر سنگ، می‌توان در هر دو حالت بدون ترک و ترک‌دار، زمان شروع مرحله سوم خزش سنگ را تعیین نمود. البته آزمون‌های انجام شده در این تحقیق در نسبت تنش‌های ۰/۶۵، ۰/۷۵ و ۰/۸۵ مقاومت شکست نمونه تحت بار کششی غیرمستقیم بوده است و ضرایب ارائه شده برای دو نوع سنگ ذکر شده معتبر است.

است. به عبارت دیگر وجود ترک در سنگ آهک دهیید تأثیر بیشتری بر کاهش زمان و کرنش شکست داشته است. دلیل این مسئله می‌تواند اختلاف ضریب شکنندگی سنگ‌های آهک و ماسه سنگ باشد؛ بدین معنی که وجود ترک در سنگی با شکنندگی بالاتر تأثیر بیشتری در کاهش کرنش و به تبع آن زمان شکست دارد. روابط ارائه شده برای پیش‌بینی زمان شکست و همچنین رفتار خزشی سنگ‌ها دارای ضرایب همبستگی بسیار مناسبی می‌باشند.

را می‌توان به تأثیر شکنندگی و مقاومت کششی این دو نوع سنگ مربوط دانست.

- در نمونه‌های دارای پیش ترک، با اینکه سنگ آهک مقاومت کششی بیشتری نسبت به ماسه‌سنگ دارد ولی در زمان کوتاه‌تری به مرحله شروع شکست رسیده است و همچنین کرنش شکست کمتری داشته است. تأثیرگذاری ترک بر کاهش زمان و کرنش شکست سنگ‌ها در سنگ آهک بیشتر از ماسه سنگ می‌باشد.
- درصد کاهش مقدار زمان و کرنش لحظه شروع مرحله سوم خزش برای سنگ آهک دهیید بیشتر از ماسه سنگ

منابع

- Amitrano, D., Helmstetter, A., 2006. Brittle creep, damage and time-to-failure in rocks. *Journal of Geophysical Research*, 111(B11): 1-17.
- Boukharov, G.N., Chanda, M.W., Boukharov, N.G., 1995. The three processes of brittle crystalline rock creep. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*. 32(4): 325-335.
- Chen, Y.L., Azzam, R., 2007. Creep fracture of sandstones. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 47(1):57-67.
- Hansen, F.D., 1977. Evaluation of an inelastic Law for salt creep. *Proceeding of 18th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, Colorado school of Mines, Vol 1, PP. 4B 5-1- 4B 5-5.
- Heap, M.J., Baud, P., Meredith, P.G., Vinciguerra, S. Bell, A.F., Main, I.G., 2011. Brittle creep in basalt and its application to time-dependent volcano deformation. *Earth Planet Science Letter*, 307 (1-2) 71 - 82.
- ISRM (1981). Brown E.T., Editor. *Suggested methods: rock characterization, testing and monitoring*. Oxford: Pergamon. p. 211.
- Kranz, R.L., 1979. Crack growth and development during creep of Barre granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 16: 23-35.
- Lin, Q.X., Tham, L.G., Yeung, M.R., Lee, P.K.K., 2004. Failure of granite under constant loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 41(3):49-54.
- Malan, D.F., 1999. Time-dependent behaviour of deep level tabular excavations in hard rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 32(2): 123-155.
- Maranini, E., Brignoli, M., 1999. Creep behavior of a weak rock: experimental characterization. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 36(1): 127-138.
- Miura, K., Okui, Y., Horii, H., 2003. Micromechanics-based prediction of creep failure of hard rock for long-term safety of high-level radioactive waste disposal system. *Mechanics of Materials*, 35, 587-601.
- Rinne, M., 2008. *Fracture mechanics and subcritical crack growth approach to model time-dependent failure in brittle rock*. Ph.D. Thesis, Helsinki university of Technology.
- Shao, J. F., Chauc, K.T., Feng, X.T., 2005. Modelling of anisotropic damage and creep deformation in brittle rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(4), 582-592.
- Singh, D.P., 1975. A study of creep of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 12: 271-276.
- Szendi-Horvath G., (1982), On fracture toughness of coal. *Australian Journal of Coal Mining Technology and Research*, 2: 51-57.
- Yang, C.H., Daemen, J.J.K., Yin, J.H., 1999. Experimental investigation of creep behavior of salt rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*. 36(2):233-42.
- Yang, S., Jiang, Y., 2010. Triaxial mechanical creep behaviour of sandstone. *Mining Science and Technology*, 20, 339-349.