

ارزیابی روش دندان‌گذاری در تعیین چقرمگی شکست سنگ

مهدی زارع نجف‌آبادی^۱، مجیدرضا آیت‌اللهی^{*۱}

پذیرش مقاله: ۹۲/۱۰/۰۷

دریافت مقاله: ۹۱/۰۹/۲۱

چکیده

چقرمگی شکست سنگ یکی از پارامترهای مکانیکی مهم در برخی از کاربردهای مربوط به توده‌های سنگی مانند فرآیند شکست در سنگ، فرآیند شکست هیدرولیکی، طراحی و ساخت ماشین‌آلات حفاری می‌باشد. با این وجود برای اندازه‌گیری این پارامتر روش‌های آزمایشگاهی مختلفی وجود دارد. یکی از روش‌های آزمایشگاهی ارائه شده در این زمینه، روش دندان‌گذاری می‌باشد. در این تحقیق، در ابتدا رفتارچند سنگ مختلف از نظر نوع و اندازه دانه‌بندی، در آزمایش دندان‌گذاری بررسی شده و در ادامه عملی بودن این روش در تعیین چقرمگی شکست آن‌ها ارزیابی می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که سنگ‌ها در آزمایش دندان‌گذاری رفتار دوگانه‌ای را از خود نشان می‌دهد. برای نیروهای کمتر از بار بحرانی، رفتار سنگ مشابه با مواد ترد دیگر بوده ولی برای نیروهای بیشتر از بار بحرانی، رفتار سنگ‌های آزمایش شده به طور کلی متفاوت با مواد ترد دیگر می‌باشد. این تفاوت در رفتار باعث می‌شود که نتوان از روش دندان‌گذاری برای تعیین چقرمگی شکست آن‌ها استفاده کرد. دلیل اصلی این تفاوت را می‌توان ناشی از برخی عیوب ساختاری ذاتی در سنگ‌ها دانست.

کلید واژه‌ها: چقرمگی شکست، سنگ، روش دندان‌گذاری، ترک

۱. آزمایشگاه تحقیقاتی خستگی و شکست، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران m.ayat@iust.ac.ir

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

یکی از پارامترهای مکانیکی مهم در برخی از حوزه‌های کاربردی مکانیک سنگ، چقرمگی شکست سنگ می‌باشد. چقرمگی شکست به صورت مقاومت ماده در مقابل رشد ترک تعریف می‌شود (Anderson, 2004). برای محاسبه چقرمگی شکست سنگ‌ها، روش‌ها و قطعات آزمایشگاهی مختلفی پیشنهاد شده است. با توجه به محدودیت‌های موجود در تهیه و آماده‌سازی قطعات سنگی، ابعاد هندسی قطعات مورد استفاده برای آزمایش مواد سنگی با سایر مواد متفاوت است. به عنوان مثال چون مغزه‌های سنگی حالت استوانه‌ای شکل دارند، تهیه نمونه‌های دیسک شکل یا دایره‌ای شکل مانند قطعات دیسک برزیلی و نیم‌دیسک از این مغزه‌ها با کمترین ماشین‌کاری و بدون نیاز به عملیات پرداخت اضافی امکان‌پذیر است. لذا روش‌های استاندارد اندازه‌گیری چقرمگی شکست سنگ‌ها بر مبنای این قطعات بوده است (حسین پور ستوبادی، ۱۳۸۹ و خرازی، ۱۳۸۷).

البته چقرمگی شکست یا K_{IC} تنها از طریق آزمایش بر روی نمونه مناسب ترک‌دار قابل تعیین می‌باشد. ترک از دیدگاه مکانیک شکست باید به میزان کافی تیز و از آثار مربوط به تنش‌های پسماند و آثار لبه‌ها دور باشد. ایجاد چنین شرایطی در اکثر موارد کار دشواری است و معمولاً نوک ترک ایجاد شده گرد می‌باشد (Lawn et al., 1980). لذا محققین به دنبال ارائه روش‌هایی می‌باشند که در آن‌ها ترک به صورت طبیعی و در طول آزمایش ایجاد شود.

یکی از روش‌های ارائه شده در این زمینه، آزمایش دندانانه‌گذاری (Indentation Test) می‌باشد. ایونس (Evans) و لاون (Lawn) با توجه به طول ترک‌های ایجاد شده در گوشه‌های سختی‌سنج ویکرز (Vickers Indenter)، برای اولین بار چقرمگی شکست چند ماده سرامیکی را محاسبه نمودند (Lawn et al., 1980). در این روش با استفاده از یک سختی‌سنج نوک تیز، نیروی مشخصی بر سطح قطعه اعمال شده و سپس با اندازه‌گیری طول ترک‌های حاصله در گوشه‌های حفره به وجود آمده روی سطح و استفاده از روابط

ارائه شده در این زمینه، چقرمگی شکست ماده محاسبه می‌شود. هر چند این روش در ابتدا برای محاسبه چقرمگی شکست سرامیک‌ها معرفی شده ولی با توجه به سرعت بالا و کم هزینه بودن آن، چقرمگی شکست مواد ترد دیگر مانند پلیمرهای ترد، شیشه‌ها و حتی بیومتریال‌ها مانند استخوان نیز با استفاده از این روش اندازه‌گیری شده است (Lach et al., 2007, Cook and Pharr, 1990, Kruzic et al., 2009). با این وجود برای محاسبه چقرمگی شکست سنگ با استفاده از روش دندانانه‌گذاری تلاش درخور توجهی صورت نگرفته است. در این پژوهش، رفتار برخی از سنگ‌ها در آزمایش دندانانه‌گذاری بررسی شده و در ادامه عملی بودن این روش در تعیین چقرمگی شکست سنگ‌های مورد نظر، ارزیابی می‌شود.

۲. آزمایش دندانانه‌گذاری ویکرز

آزمایش دندانانه‌گذاری ویکرز مرسوم‌ترین روش برای اندازه‌گیری چقرمگی شکست بر مبنای ترک‌های ایجاد شده در طی آزمایش دندانانه‌گذاری می‌باشد. در این روش از یک سختی‌سنج هرمی مربع‌القاعده با زاویه رأس 136° استفاده می‌شود. پس از اعمال نیرو، سختی‌سنج کنار رفته و با استفاده از یک میکروسکوپ نوری، محل حفره به وجود آمده در سطح مشاهده می‌شود. در ادامه طول ترک‌های ایجاد شده در گوشه‌های این حفره اندازه‌گیری شده و چقرمگی شکست ماده اندازه‌گیری می‌شود. به طور کلی باید توجه داشت که الگوهای ترک ایجاد شده در یک آزمایش دندانانه‌گذاری بسیار پیچیده است ولی عموماً دو حالت ترک متفاوت مشاهده شده است (Chicot et al., 2009):

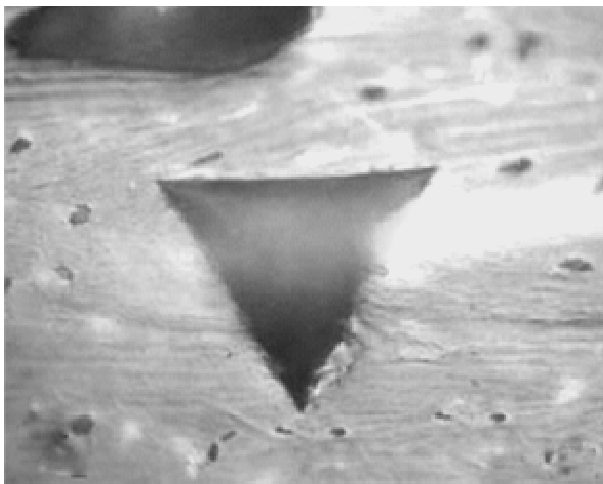
حالت ترک پالمکوئیست (Palmqvist): این حالت در بارهای کم رخ داده و ترک‌های نیم‌دایره‌ای از گوشه‌های حفره رشد می‌کنند. (شکل ۱-الف)

حالت ترک شعاعی - میانی: این حالت در بارهای زیاد و به علت تنش‌های کششی پسماند ایجاد شده در مرحله باربرداری رخ می‌دهد. در این حالت ترک‌های شعاعی از گوشه‌های حفره به وجود آمده روی سطح شروع شده و در زیر این حفره

آمده، رفتار برخی از سنگ‌ها در این آزمایش بررسی شده و با رفتار مواد ترد مقایسه می‌شود.

۳. رفتار مواد ترد در آزمایش دندان‌گذاری

رفتار اکثر مواد ترد در آزمایش دندان‌گذاری دارای دو مرحله تغییر شکل تماسی (Contact deformation) و مرحله ترک‌گذاری (Fracturing) می‌باشد (Cook, Lach et al., 2007). در بیشتر مواد ترد در ابتدا با اعمال نیروی سختی سنج یک حفره منظم روی سطح تشکیل می‌شود. این حفره به گونه‌ای می‌باشد که پس از برداشتن نیرو به راحتی قابل مشاهده و تشخیص بوده و هیچ‌گونه به هم ریختگی در آن ایجاد نمی‌شود. در شکل ۲ یک نمونه از این حفره‌ها که مربوط به دندان‌گذاری در استخوان می‌باشد، نشان داده شده است:

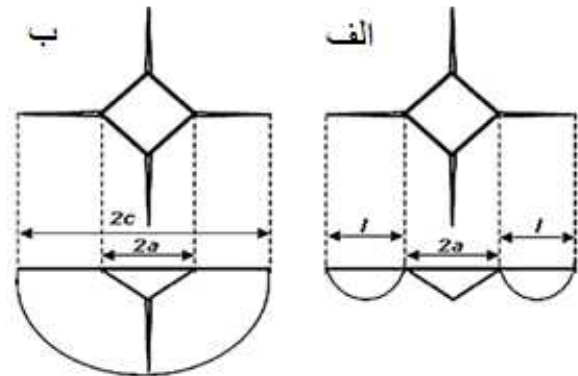


شکل ۲. حفره به وجود آمده در سطح استخوان در آزمایش

دندان‌گذاری (Lach et al., 2007)

در ادامه با رسیدن نیروی دندان‌گذاری به مقداری مشخص، در گوشه‌ها و لبه‌های حفره به وجود آمده روی سطح، ترک‌هایی رشد می‌کند. این مرحله اصطلاحاً مرحله ترک‌گذاری نامیده می‌شود. همان‌طور که گفته شد شکل این ترک‌ها می‌تواند به صورت شعاعی-میانی و یا پالمکویست باشد. در شکل ۳ دو نمونه از الگوهای ترک ایجاد شده در برخی مواد ترد نشان داده شده است.

گسترش می‌یابند. همچنین ترک‌های میانی به صورت حلقه‌های دایره‌ای در زیر ناحیه پلاستیک و در راستای موازی با محور بار رشد می‌کنند. این ترک‌ها در زیر ناحیه تماس به هم متصل شده و دو ترک نیم بیضی شکل را ایجاد می‌کنند (شکل ۱-ب).

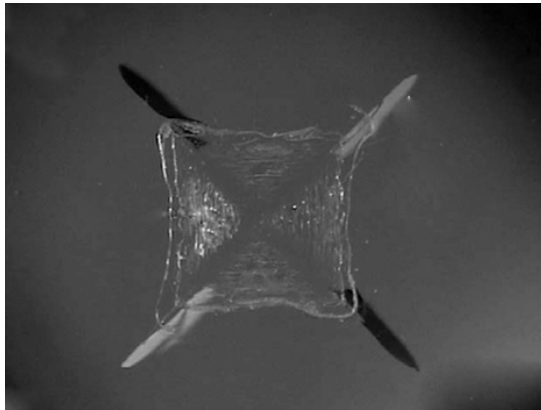


شکل ۱. حالت‌های ترک ایجاد شده در آزمایش دندان‌گذاری

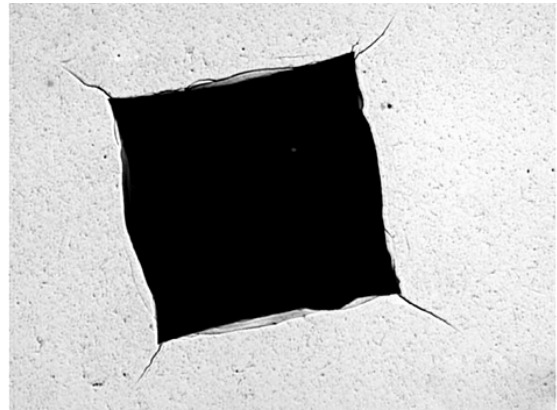
ویکرز (الف): پالمکویست ب: شعاعی-میانی)

(Chicot et al., 2009)

برای محاسبه چقرمگی شکست با استفاده از آزمایش دندان‌گذاری روابط زیادی ارائه شده است. در بیشتر این روابط چقرمگی شکست به صورت تابعی از ابعاد هندسی ترک، بار دندان‌گذاری و یک ثابت تجربی بیان شده است. (Ponton and Rawlings (1989) در حدود ۲۰ معادله مختلف را در این زمینه جمع‌آوری کرده‌اند. البته بیشتر این معادلات با توجه به برازش منحنی بر داده‌های تجربی و بدون ارائه مدل فیزیکی خاصی بدست آمده‌اند. باید توجه داشت که استفاده از روش دندان‌گذاری برای تعیین چقرمگی شکست، در درجه اول نیازمند آن است که ترک‌هایی منظم و قابل تشخیص در گوشه‌های حفره ایجاد شده روی سطح رشد کرده باشند تا بتوان با اندازه‌گیری طول آن‌ها چقرمگی شکست ماده را محاسبه نمود. به علاوه تاکنون تلاش درخور توجهی برای تعیین چقرمگی شکست سنگ با استفاده از روش دندان‌گذاری صورت نگرفته است. لذا در ابتدا رفتار مواد ترد در آزمایش دندان‌گذاری بررسی می‌شود. در ادامه با توجه به نتایج بدست



ب

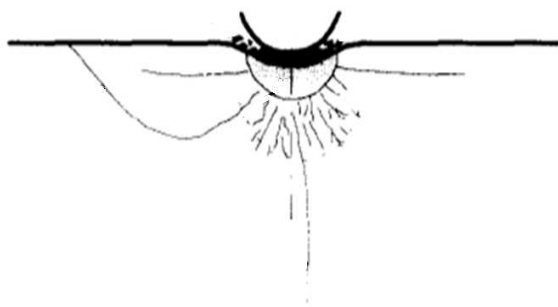


الف

شکل ۳. ترک‌های ایجاد شده در گوشه‌های حفره ایجاد شده روی سطح (الف: فولاد نیتزیده شده ب: پلیمر PMMA)

(Lach et al., 2007 ب: Nolan et al., 2006 الف)

نیرو به طور موقت کاهش یافته و نفوذ سختی‌سنج در سنگ به طور ناگهانی افزایش می‌یابد. لذا می‌توان رفتار سنگ در آزمایش دندان‌گذاری را به دو مرحله تقسیم کرد.



شکل ۴. الگوی کلی ترک‌ها در آزمایش دندان‌گذاری سنگ‌ها (Kou et al., 1998)

۴-۱. رفتار سنگ قبل از رسیدن به بار بحرانی در این حالت رفتار سنگ مشابه با سایر مواد ترد می‌باشد. به عبارت دیگر بعد از برداشتن نیرو از روی سختی‌سنج و مشاهده سطح قطعه، می‌توان یک حفره لوزی شکل منظم را مشاهده نمود. باید توجه داشت که این حفره فاقد هر گونه ترک در نواحی اطراف یا لب پریدگی می‌باشد. برای بررسی این مطلب، تعدادی آزمایش دندان‌گذاری روی سنگ مرمر هرسین انجام شده که یک نمونه از تصاویر مربوطه در شکل ۵ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در لبه‌های حفره ایجاد شده روی سطح، لب پریدگی‌های کمی وجود دارد ولی میزان این پدیده‌ها به اندازه‌ای نمی‌باشد که الگوی کلی ترک غیر قابل تشخیص باشد.

۴. رفتار سنگ در آزمایش دندان‌گذاری

ناحیه ایجاد شده در زیر سختی‌سنج در آزمایش دندان‌گذاری سنگ دارای پیچیدگی‌های زیادی می‌باشد. در آزمایش دندان‌گذاری در سنگ‌ها مشاهده شده است که ماده سنگی زیر سختی‌سنج عمدتاً دستخوش سه فرآیند خرد شدگی (Crushing)، ترک‌گذاری (Fracturing) و لب پریدگی (Chipping) می‌شود (Kou et al., 1998). این فرآیندها به همراه تصاویری برای هر مرحله، در قسمت ۳-۲ توضیح داده می‌شود. یک نمای کلی از انواع ترک‌ها و نواحی بوجود آمده در آزمایش دندان‌گذاری سنگ در شکل ۴ نشان داده شده است:

همچنین Lindqvist et al. (1984) نشان داده‌اند زمانی که نیروی اعمالی به سختی‌سنج به یک مقدار بحرانی برسد (که مقدار این نیروی بحرانی به نوع سنگ و نرخ بارگذاری بستگی دارد)، پدیده لب پریدگی رخ می‌دهد و یک حفره نامنظم و تخریب شده روی سطح ایجاد می‌شود. با تشکیل این حفره

طبیعی شروع می‌شود (Tan et al., 1997). با رسیدن بار فشاری به مقدار مشخصی (بار بحرانی)، این میکروترک‌های طبیعی رشد کرده و به یکدیگر می‌پیوندند و باعث ایجاد یک ناحیه تغییر شکل یافته در سنگ می‌شوند. در واقع می‌توان گفت که با رسیدن نیروی فشاری به مقدار مشخصی، به دلیل پل زدن (Bridging) بین این میکرو ترک‌ها، به تدریج یک نوار برشی (Shear band) ایجاد می‌شود. با تشکیل این نوار برشی، سنگ توانایی تحمل بار فشاری را از دست داده و با ایجاد ترک‌های عمیق‌تر دچار شکست می‌شود. این نوع شکست اصطلاحاً شکست جدایشی (Splitting fracture) نامیده می‌شود. لذا می‌توان گفت که با توجه به وجود نقص‌های ذاتی، ماهیت تشکیل ترک در سنگ‌ها متفاوت با سایر مواد ترد مانند سرامیک‌ها می‌باشد.

به طور کلی در صورت بیشتر بودن نیروی دندان‌گذاری از نیروی بحرانی در طول یک سیکل کامل دندان‌گذاری در سنگ، به ترتیب پدیده‌های زیر رخ می‌دهد:

تغییر شکل تماسی: پس از تماس نوک سختی‌سنج با سطح قطعه و در مراحل ابتدایی اعمال نیرو، در سطح سنگ تا حدودی تغییر شکل پلاستیک رخ می‌دهد و در صورت برداشته شدن نیرو، یک حفره منظم روی سطح ایجاد می‌شود. شروع و رشد ترک: همانطور که گفته شد سنگ‌ها دارای میکرو حفره‌ها و ریز ترک‌های طبیعی زیادی بوده که هر یک از آنها می‌تواند محل شروع یک ترک بزرگتر باشد. در صورت رسیدن نیروی دندان‌گذاری به مقدار بار بحرانی، مقدار تنش کششی در این نقص‌ها افزایش یافته و این ریز ترک‌ها رشد می‌کنند.

ترک‌گذاری ثانویه: با افزایش نیرو، ترک‌های اولیه ایجاد شده در مرحله قبل رشد می‌کنند. باید توجه داشت که این ترک‌ها لزوماً در لبه‌های حفره به وجود آمده روی سطح نمی‌باشند و ممکن است در فواصل دورتری تشکیل شوند. برای واضح‌تر شدن این مطلب یکی از تصاویر مربوط به آزمایش دندان‌گذاری در سنگ مرمر هرسین در شکل ۶ نشان داده شده است:



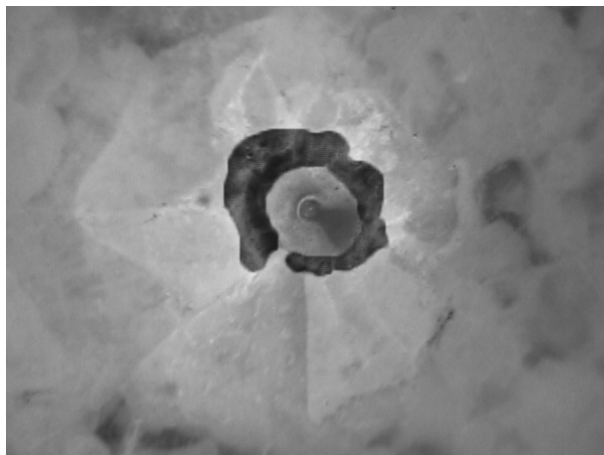
شکل ۵. تشکیل حفره منظم برای نیروی ۱۰۰۰g در سطح سنگ مرمر هرسین

۴-۲. رفتار سنگ بعد از رسیدن به بار بحرانی معمولاً سنگ‌ها دارای میکرو ترک‌ها و حفره‌های طبیعی زیادی می‌باشند. حفره‌های موجود در داخل سنگ را می‌توان با توجه به نسبت پهنا به طول آن‌ها به دو دسته تقسیم کرد (Lindqvist et al., 1984). حفره‌هایی که این نسبت برای آن‌ها کمتر از ۰/۱ می‌باشد، LARC (Low aspect ratio cavities) و حفره‌هایی که این نسبت برای آن‌ها بزرگتر از ۰/۱ می‌باشد، HARC (High aspect ratio cavities) نامیده می‌شوند. حفره‌های LARC معمولاً بی‌نوک بوده و در اکثر موارد ترک‌های بزرگتر روی آن‌ها پل می‌زنند. پهناي این حفره‌ها معمولاً تا ابعاد کمتر از یک میکرومتر می‌باشد. با این وجود طول آن‌ها بسته به نوع سنگ متفاوت بوده و معمولاً کمتر از یک میلی‌متر می‌باشد (Lindqvist et al., 1984).

مرز بین دانه‌ها محتمل‌ترین مکان برای وجود LARCها بوده ولی این نقص‌ها بعضاً درون دانه‌های سنگ‌ها نیز وجود دارند. در نقطه مقابل HARCها بزرگتر از LARCها بوده و می‌توانند نقطه شروع یک ترک بزرگتر باشند. نکته مهمی که باید به آن توجه داشت این است که این نقص‌های ذاتی در سنگ‌ها تأثیر بسزایی در شروع ترک‌ها و حتی تغییر مسیر آن‌ها از مسیر پیش‌بینی شده برای آن‌ها دارند.

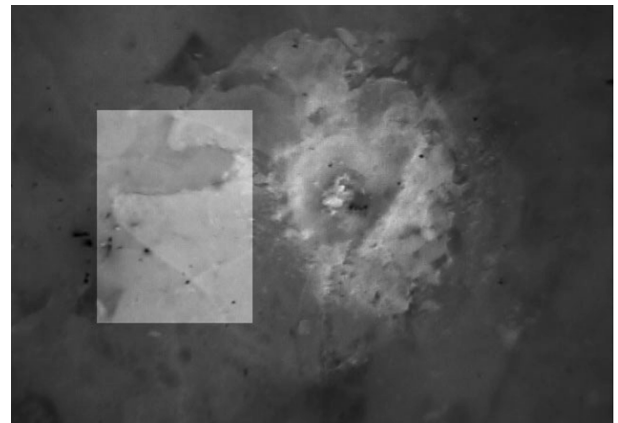
با توجه به تحقیقات صورت گرفته مشخص شده است که تغییر شکل سنگ‌ها در بارهای فشاری از همین حفره‌های

به سرعت کنار رفته و اصطلاحاً پدیده لب پریدگی (Chipping) رخ می دهد. به عبارت دیگر در یک لحظه انرژی کرنشی ذخیره شده در سنگ به انرژی جنبشی تکه های ریز سنگ تبدیل شده و باعث می شود که آن ها به سرعت کنار بروند. ناحیه متأثر از لب پریدگی در سنگ مرمر هرسین در شکل ۸ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برای مشخص تر شدن ناحیه متأثر از لب پریدگی، این ناحیه با رنگ تیره و حفره ایجاد شده در وسط آن با رنگ خاکستری نشان داده شده است.



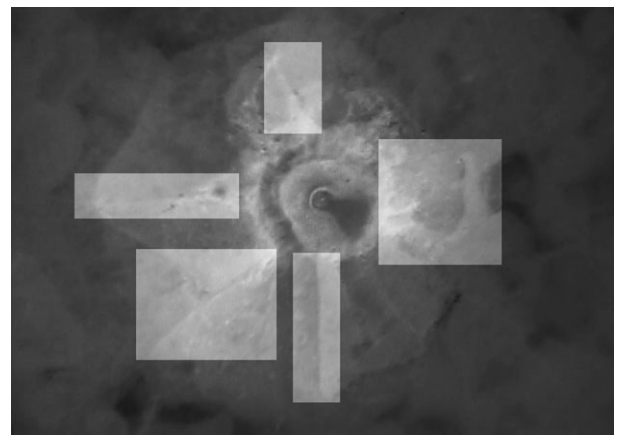
شکل ۸. ناحیه متأثر از لب پریدگی در سنگ مرمر هرسین (نیروی ۵۰۰۰g)

همان طور که در شکل ۸ مشاهده می شود هندسه حفره ایجاد شده روی سطح برخلاف انتظار، بیشتر شبیه به یک دایره می باشد. در شکل ۹ نیز تصویر مربوط به دندان گذاری در سنگ کریستال چینی نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۹ نیز مشخص است، در این سنگ هندسه حفره ایجاد شده روی سطح تا حدودی شبیه به لوزی می باشد ولی باز هم برخی از لبه ها به علت پدیده لب پریدگی به کلی نابود شده است. در شکل ۹ نیز ناحیه متأثر از لب پریدگی با رنگ تیره و حفره ایجاد شده در وسط آن با رنگ خاکستری نشان داده شده است.



شکل ۶. ترک گذاری ثانویه در نقاط دورتر از حفره ایجاد شده روی سطح مرمر هرسین (نیروی ۵۰۰۰g)

به علاوه چند ترک دیگر نیز در لبه به صورت شعاعی و به سمت پایین رشد کرده که برخی از آن ها نسبت به راستای نیروی اعمالی به سطح، دارای زاویه انحراف بیشتری می باشند. با این وجود به علت وجود عوامل تمرکز تنش در سنگ ها مانند نقص های طبیعی، مرز دانه های ضعیف و ترکیب شیمیایی مختلف دانه ها، این ترک های بزرگ تر به سرعت منحرف شده و در جهت های دلخواه رشد می کنند. نمونه ای از این ترک ها در سنگ مرمر هرسین در شکل ۷ نشان داده شده است:



شکل ۷. ترک های لبه ای شعاعی در اطراف حفره ایجاد شده روی سطح مرمر هرسین (نیروی ۵۰۰۰g)

لب پریدگی: در صورت رشد و رسیدن ترک های جانبی به سطح قطعه، ماده سنگی اطراف به همراه ناحیه زیر سختی سنج

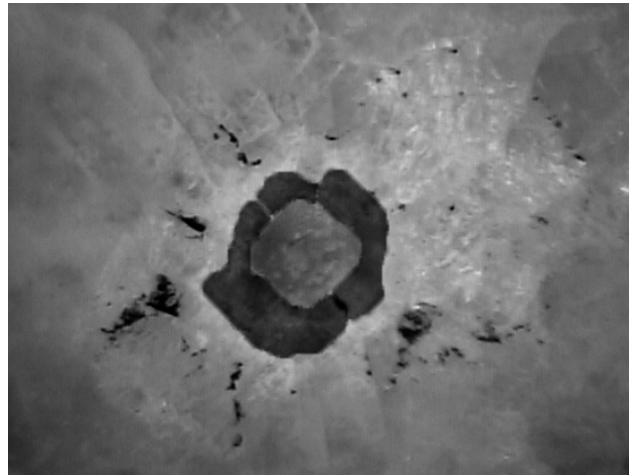
همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، تنها می‌توان ناحیه‌ای متأثر از دندان‌گذاری را در سطح سنگ گرانیت تکاب تشخیص داد که از هندسه منظمی برخوردار نیست. خرد شدگی: با نفوذ بیشتر سختی‌سنج به سطح سنگ، ماده سنگی زیر سختی‌سنج دچار پدیده خرد شدگی (Crushing) می‌شود. در این پدیده ماده سنگی زیر سختی‌سنج به صورت تکه‌های بسیار ریز و از هم گسسته در می‌آید. این تکه‌های بسیار ریز ممکن است در ادامه با نفوذ بیشتر سختی‌سنج، دوباره به هم فشرده شده و تکه‌های بزرگتری را ایجاد کنند. باید توجه داشت که ناحیه خرد شده بیشتر متمرکز در وسط حفره به وجود آمده روی سطح می‌باشد و می‌توان گفت که در حقیقت این ناحیه از سفت شدن مجدد پودر سنگ بوجود می‌آید.

۵. ناکارآمدی آزمایش دندان‌گذاری در تعیین چقرمگی شکست سنگ

در این پژوهش، در مورد رفتار سنگ و تفاوت آن با سایر مواد ترد در آزمایش دندان‌گذاری توضیح داده شد. در این قسمت به بررسی علل ناکارآمدی این روش در تعیین چقرمگی شکست سنگ‌ها پرداخته می‌شود:

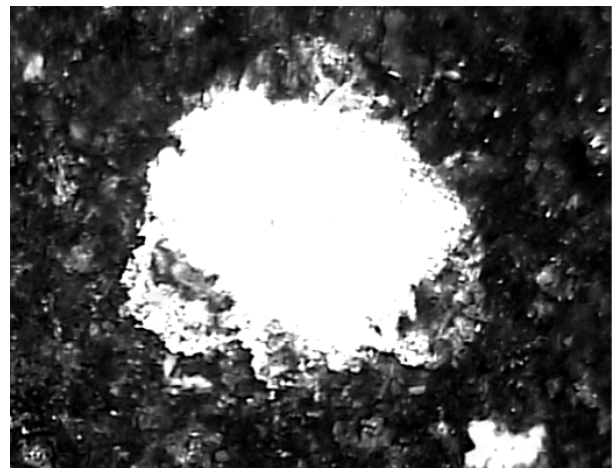
شفاف بودن سنگ: بسیاری از سنگ‌های طبیعی مانند سنگ‌های مرمر، مرمریت و کریستال چینی، موادی نسبتاً شفاف می‌باشند. از طرف دیگر برای بررسی الگوی ترک و پدیده‌های رخ داده در اطراف ناحیه دندان‌گذاری باید از میکروسکوپ‌های نوری استفاده کرد. شفاف بودن سنگ باعث می‌شود که نور میکروسکوپ توسط سنگ منعکس شده و نتوان تصویر واضحی از ناحیه دندان‌گذاری در سنگ بدست آورد. لذا بررسی ناحیه ایجاد شده و احتمالاً اندازه‌گیری طول ترک با مشکل همراه خواهد بود.

پدیده‌های لب‌پریدگی و خردشدگی: بروز پدیده‌های لب‌پریدگی و خردشدگی یکی از تفاوت‌های موجود در رفتار سنگ در آزمایش دندان‌گذاری در مقایسه با سایر مواد ترد می‌باشد. بروز این پدیده‌ها باعث می‌شود که نقطه شروع



شکل ۹. ناحیه متأثر از لب‌پریدگی در سنگ کریستال چینی (نیروی ۵۰۰۰g)

نکته‌ای که باید به آن توجه داشت این است که رخ دادن پدیده لب‌پریدگی باعث می‌شود که نقطه شروع ترک‌های شعاعی قابل تشخیص نباشد. این مطلب باعث می‌شود که نتوان طول ترک‌های ایجاد شده را اندازه‌گیری کرد. به علاوه میزان رخ دادن پدیده لب‌پریدگی به طور مستقیم به اندازه دانه‌های سنگ مرتبط می‌باشد. به عبارت دیگر در سنگ‌های درشت دانه‌تر میزان پریدگی لبه‌ها بیشتر می‌باشد. این موضوع باعث می‌شود که در سنگ‌هایی مانند گرانیت، حفره به وجود آمده روی سطح به کلی در هم ریخته و غیر قابل تشخیص باشد. این مطلب در شکل ۱۰ که مربوط به آزمایش دندان‌گذاری در گرانیت تکاب می‌باشد، نشان داده شده است.



شکل ۱۰- حفره در هم ریخته روی سطح سنگ گرانیت تکاب (نیروی ۱۰۰۰۰g)

متناقض با تئوری‌های حاکم بر آزمایش دندان‌گذاری می‌باشد. زیرا در تئوری‌های حاکم بر این روش، قطعه مورد نظر به صورت یک ماده بکر و بدون نقص ذاتی، فرض می‌شود. لذا در نظر گرفتن و یا صرف نظر کردن از این رگه‌های طبیعی دارای ابهام اساسی می‌باشد.

متفاوت بودن ماهیت ایجاد ترک در سنگ در مقایسه با مواد ترد دیگر: ماهیت ایجاد ترک در سنگ‌ها با مواد ترد دیگر به طور کلی متفاوت می‌باشد. در سنگ‌ها به علت وجود نقص‌های طبیعی زیاد، تغییر شکل در بارهای فشاری از حفره‌ها و ریزترک‌ها آغاز می‌شود. در ادامه با تشکیل نوار برشی، سنگ توانایی تحمل بار را از دست داده و دچار ترک‌های عمیق‌تر می‌شود.

علاوه بر این مطلب در سنگ‌ها و طی دندان‌گذاری، پدیده‌هایی همچون لب‌پریدگی و خردشدگی به طور قابل ملاحظه‌ای رخ می‌دهد. بروز این پدیده‌ها در مواد ترد دیگر همچون سرامیک‌ها بسیار محدود و قابل صرف‌نظر می‌باشد. با این وجود در روابط ارائه شده برای چقرمگی شکست، از بروز چنین پدیده‌هایی به طور کلی صرف‌نظر شده و رفتار ماده به صورت کاملاً ایده‌آل و تنها دارای دو مرحله تغییر شکل تماسی و ترک‌گذاری در نظر گرفته شده است. لذا در مجموع می‌توان گفت که استفاده از روابط ارائه شده برای سرامیک در مورد سنگ‌ها، دارای تردید و ابهام اساسی می‌باشد.

۶. نتیجه‌گیری

استفاده از آزمایش دندان‌گذاری و محاسبه چقرمگی شکست مواد ترد با توجه به طول ترک‌های ایجاد شده در این آزمایش، روشی متداول می‌باشد. به وجود آمدن طبیعی ترک در طول پروسه آزمایش، ارزان بودن و سرعت بالا نسبت به روش‌های دیگر از جمله مزایای این روش می‌باشد. هر چند این روش در اصل برای سرامیک‌ها ارائه شده است ولی به دلیل جذابیت‌های این روش، استفاده از آن برای محاسبه چقرمگی شکست مواد ترد دیگر از دیرباز مورد توجه محققین بوده است. در این تحقیق با مرور مطالعات صورت گرفته در این

ترک‌ها قابل تشخیص نباشد. همچنین برخی از ترک‌های شعاعی ایجاد شده در اطراف حفره ایجاد شده روی سطح، طی فرآیند لب‌پریدگی به‌طور کلی نابود می‌شوند. به عبارت دیگر طی فرآیند لب‌پریدگی برخی از ترک‌های کوچکتر ایجاد شده در ناحیه دندان‌گذاری به همراه کنده شدن تکه‌های سنگ از بین می‌روند.

دشوار بودن دنبال کردن مسیر ترک و تکه تکه شدن سنگ: یکی از ویژگی‌های طبیعی سنگ‌ها وجود دانه‌بندی درشت، ریزترک‌ها و حفره‌های زیاد می‌باشد. وجود این عوامل باعث می‌شود که مسیر رشد ترک‌های احتمالی دارای انحرافات و تغییر جهت‌های بسیار باشد. این مطلب در مواد ترد دیگر همچون سرامیک‌ها به ندرت دیده می‌شود. به عبارت دیگر در این مواد به خاطر ریز بودن دانه بندی، عدم وجود عوامل ایجاد کننده تمرکز تنش و همگن بودن ساختار مادی، مسیر رشد ترک‌ها تا حدود زیادی قابل پیش‌بینی و منطبق بر تئوری‌های ارائه شده می‌باشد. ولی در سنگ‌ها، الگوهای ترک ایجاد شده بسیار بی‌نظم و در جهت‌های غیر قابل پیش‌بینی می‌باشند که این موضوع دنبال کردن مسیر ترک‌ها را دشوار می‌سازد.

به علاوه وجود عوامل ایجادکننده تمرکز تنش باعث می‌شوند که در بیشتر موارد، ترک‌هایی در نواحی دورتر از انجام آزمایش ایجاد شوند. این ترک‌های دلخواه یکی از عوامل اصلی ایجادکننده خطا در آزمایش دندان‌گذاری سنگ می‌باشند. زیرا در تئوری‌های ارائه شده در زمینه دندان‌گذاری، وجود چنین ترک‌هایی در نظر گرفته نشده است.

وجود رگه‌های طبیعی در سنگ: سنگ‌ها دارای رگه‌های طبیعی زیادی می‌باشند. این رگه‌های طبیعی در واقع صفحاتی می‌باشند که پیوند بین دانه‌ای در آن‌ها وجود ندارد و یا در صورت وجود، این پیوند بسیار ضعیف می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که برخی از ترک‌های ایجاد شده در آزمایش دندان‌گذاری در واقع رگه‌های طبیعی سنگ می‌باشند که در اثر اعمال نیروی سختی‌سنج بازتر شده‌اند و تشخیص آن‌ها از ترک‌های ایجاد شده طی دندان‌گذاری مشکل می‌باشد. به علاوه وجود این رگه‌های طبیعی یکی از عوامل

می‌شوند. علاوه بر دلیل فوق، متفاوت بودن ماهیت ایجاد ترک در سنگ‌ها، بروز پدیده‌های لب‌پریدگی و خردشدگی، شفاف بودن سنگ‌ها، دشوار بودن پیدا کردن نقطه شروع ترک و تشخیص ترک از رگه‌های طبیعی سنگ از دلایل دیگر ناکارآمدی این روش در سنگ‌های آزمایش شده می‌باشد.

همچنین در این پژوهش نشان داده شد، که میزان رخ دادن پدیده لب‌پریدگی می‌تواند در ارتباط مستقیم با اندازه دانه‌های سنگ باشد. به عبارت دیگر برای سنگ‌های درشت‌دانه مانند گرانیت، به علت بیشتر بودن تأثیر پدیده لب‌پریدگی، تشخیص هندسه حفره ایجاد شده روی سطح سنگ عملاً غیرممکن می‌باشد. به علاوه مقدار بار بحرانی بسته به نوع سنگ و نرخ بارگذاری متفاوت می‌باشد. لذا بررسی رابطه بین مقدار بار بحرانی و نرخ بارگذاری نیازمند تحقیقات بیشتری در این زمینه می‌باشد. همچنین مقدار بار بحرانی برای سنگ‌های مختلف را، تنها می‌توان با انجام آزمایش‌های متعدد دندان‌گذاری بر روی سنگ‌های مورد نظر محاسبه نمود.

زمینه توسط محققین دیگر و انجام آزمایش دندان‌گذاری روی چند نمونه سنگ، عملی بودن این روش در تعیین چقرمگی شکست سنگ مورد ارزیابی قرار گرفت.

با توجه به مطالعات صورت گرفته و نتایج بدست آمده از آزمایش دندان‌گذاری می‌توان گفت، در صورت کمتر بودن نیروی دندان‌گذاری از مقدار مشخصی (نیروی بحرانی)، رفتار سنگ‌های آزمایش شده مشابه با مواد ترد دیگر بوده و با اعمال نیروی سختی‌سنج به سطح سنگ، یک حفره منظم و بدون لب‌پریدگی ایجاد می‌شود. البته به علت عدم وجود ترک در این حالت، نمی‌توان چقرمگی شکست سنگ مورد نظر را محاسبه نمود و باید نیروی دندان‌گذاری را افزایش داد. با این وجود برای نیروهای بیشتر از بار بحرانی رفتار سنگ متفاوت با سایر مواد ترد بوده و استفاده از حفره به وجود آمده روی سطح و ترک‌های اطراف آن، برای محاسبه چقرمگی شکست عملاً غیرممکن می‌باشد. علت اصلی این تفاوت‌ها را می‌توان در ساختار سنگ‌ها دانست. به عبارت دیگر سنگ‌ها دارای عیوب ساختاری و حفره‌های طبیعی زیادی می‌باشند که باعث متفاوت بودن رفتار سنگ در فشار در مقایسه با سایر مواد ترد

منابع

- حسین‌پور ستوبادی، غ.، ۱۳۸۹. بررسی عددی و تجربی یک نمونه جدید آزمایشگاهی برای تخمین پارامترهای شکست مواد ترد تحت بارگذاری مرکب، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ص ۴۴-۴۹.
- خرازی، ب.، ۱۳۸۷. بررسی شکست مرکب در سنگ گرانیت با استفاده از قطعه آزمایشی FPB، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ص ۳۲-۳۸.
- Anderson, T.L. , 2004. Fracture mechanics: fundamentals and applications, CRC Press, Third edition, 48p.
- Chicot, D., Duarte, G., Tricoteaux, A., Jorgowski, B., Leriche, A. and Lesage, J. , 2009. Vickers Indentation Fracture (VIF) modeling to analyze multi-cracking toughness of titania, alumina and zirconia plasma sprayed coatings, Materials Science and Engineering, 527: 65-76.
- Cook, R. F. and Pharr, G. M., 1990. Direct observation and analysis of Indentation cracking in glasses and Ceramics, The American Ceramic Society, 73: 787-817.
- Kou, S.Q., Huang, Y., Tan, X.C. and Lindqvist, P.A., 1998. Identification of the governing parameters related to rock indentation depth by using similarity analysis, Engineering Geology, 49: 261-269.
- Kruzic, J.J., Kim, D.K., Koester, K.J. and Ritchie, R.O., 2009. Indentation techniques for evaluating the fracture toughness of biomaterials and hard tissues, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2: 384-395.

-
- Lach, R., Gyurova, L.A. and Grellmann, W., 2007. Application of indentation fracture mechanics approach for determination of fracture toughness of brittle polymer systems, *Polymer Testing*, 26: 51–59.
- Lawn, B.R., Eavans, A.G. and Marshall, D.B., 1980. Elastic/plastic indentation damage in ceramics: The median/radial crack system, *The American Ceramic Society*, 63: 574-581.
- Lindqvist, P.A., Lai, H.H. and Alm, O., 1984. Indentation fracture development in rock continuously observed with a scanning electron microscope, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics*, 4: 165–182.
- Nolan, D., Leskovsek, V. and Jenko, M., 2006. Estimation of fracture toughness of nitride compound layers on tool steel by application of the Vickers indentation method, *Surface and Coatings Technology*, 201: 182–188.
- Ponton, C.B. and Rawlings, R.D., 1989. Vickers indentation fracture toughness test, Part 1: Review of literature and formulation of standardized indentation toughness equations, *Materials Science and Technology*, 5: 865–872.
- Ponton, C.B. and Rawlings, R.D., 1989. Vickers indentation fracture toughness test, Part 2: Application and critical evaluation of standardized indentation toughness equations, *Materials Science and Technology*, 5: 961–976.
- Tan, X.C., Lindqvist, P.A. and Kou, S.Q., 1997. Application of a splitting fracture model to the simulation of rock indentation subsurface fractures, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 21: 1–13.