

# بررسی آزمایشگاهی اثر دانه‌بندی محیط‌های ناهمگن بر گسترش ترک

عبدالهادی قزوینیان<sup>۱\*</sup>، منصور صبری<sup>۲</sup>، حمیدرضا نجاتی<sup>۳</sup>

۱- دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس تهران

۲- کارشناس ارشد مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس تهران

۳- استادیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس تهران

hadi@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹۲/۹/۱۹]

تاریخ پذیرش: [۹۳/۲/۱۱]

**چکیده** - شکست سازه‌های سنگی و بتنی بر اثر رشد و گسترش ترک‌های داخلی، ناشی از تمرکز تنش در نوک آنها، لزوم بررسی رفتار شکست این سازه‌ها را می‌رساند. تقابل میان چقرمگی سنگ و میزان تمرکز تنش در نوک میکروتُرک‌ها، جدال بر سر گسترش یا عدم گسترش ترک است. بنابراین این مطالعه اثر ناهمگنی ناشی از اندازه دانه‌ها به عنوان یکی از عوامل مهم در چقرمگی نمونه‌ها و تاثیر گذار در مسیر گسترش ترک بررسی کرده است. برای انجام این کار، شش نوع نمونه با دانه‌بندی‌های متفاوت اما ترکیب یکسان ساخته شده و تحت آزمایش تعیین چقرمگی قرار گرفته است. برای بررسی بیشتر سازوکار شکست نمونه‌ها، از سامانه انتشار آوایی نیز استفاده شده است. نتایج بیانگر رابطه میان چقرمگی مد برش و کشش با اندازه دانه‌ها به صورت غیر خطی است. به گونه‌ای که بیشترین چقرمگی شکست مربوط به نمونه‌هایی با اندازه دانه‌های متوسط (۲\_۲,۳۸) میلی‌متر است و با افزایش و یا کاهش اندازه دانه‌ها از این مقدار، چقرمگی نمونه‌ها در هر دو حالت بارگذاری برش و کشش کاهش می‌یابد. همچنین با مطالعه مسیر رشد ترک برای نمونه‌های با دانه‌بندی مختلف مشاهده می‌شود که مسیر رشد ترک در نمونه‌هایی با دانه‌بندی ریزتر، منظم‌تر بوده و از نوک ترک اولیه شروع شده و در جهت عمود بر تنش کششی حداکثر گسترش می‌یابد. ولی در نمونه‌هایی با دانه‌بندی درشت‌تر، ترک از مرز دانه‌ها شروع شده و در یک مسیر نامنظم‌تر رشد کرده و ختم ترک در نقاطی با مقاومت کم در محیط نمونه است. با بررسی برخی پارامترهای انتشار آوایی (AE) نمونه‌ها همچون تعداد کانت، انرژی، فرکانس متوسط و RA نیز مشاهده شد که با تغییرات چقرمگی برای دانه‌بندی‌های مختلف، این پارامترها نیز تغییر می‌کنند. تعداد کانت‌های ثبت شده در بازه زمانی انتهای ناحیه الاستیک تا نقطه شروع بهم پیوستن میکروتُرک‌ها به عنوان زون شکست در نوک ترک، برای شش نمونه به دست آورده شده است که رابطه مستقیم با نمودار تغییرات چقرمگی نمونه‌ها در هر دو حالت مد شکست کشش خالص و برش خالص دارد. همچنین RA متوسط نیز برای نمونه‌های چقرمگی بیشتر از سایر نمونه‌ها است که حکایت از ارتباط مستقیم این پارامتر با چقرمگی دارد.

**واژه‌های کلیدی:** رشد ترک، چقرمگی شکست، اندازه دانه‌بندی، مسیر گسترش ترک، ناحیه صدمه دیده، سیستم انتشار آوایی.

## ۱. مقدمه

عبارت بهتر اگر چند نمونه سنگ یکسان مورد بارگذاری جهت شکست قرار گیرد، مقادیر تنش شکست اندازه‌گیری شده برای نمونه‌ها متفاوت خواهد بود. پس نیاز به پژوهش و بررسی در زمینه مکانیک شکست در سنگ‌ها بسیار مشهود است [۱]. با توجه به اهمیت رفتار سنگ در برابر بارهای وارد شده از جنبه مکانیک شکست، در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در زمینه عوامل موثر بر چقرمگی شکست سنگ‌ها صورت گرفته

زمانی که سنگ‌ها تحت بارگذاری خاصی قرار می‌گیرند در آنها شکست حادث می‌شود. پیش‌بینی این شکست به طور مسلم برای مهندسين مکانیک سنگ مهم است چراکه آن‌ها باید از پایداری و عدم شکست سازه‌های طراحی شده و فوندانسیون آنها اطمینان حاصل کنند. اما مهندسين مکانیک سنگ معترفند که تنش شکست سنگ‌ها غیر قابل پیش‌بینی و اعتماد است. به

پژوهش در زمینه مکانیک شکست با استفاده از مواد شبه سنگی<sup>۳</sup>، در سال‌های اخیر گسترش زیادی یافته است. اینگونه مواد می‌توانند برخی از ویژگی‌های سنگ مانند شکنندگی<sup>۴</sup> و اتساع‌پذیری برشی را به خوبی شبیه‌سازی کنند. ولی با این وجود مدلسازی تمامی پارامترهای سنگ واقعی با آن همه ساختارهای مزو<sup>۵</sup> بسیار مشکل است [۷]. ساگون و بوبت [۸]، اتصال<sup>۶</sup> میکروتُرک‌ها را در نمونه‌های مصنوعی دارای ۱۶ عدد میکروتُرک بررسی کردند و در پایان به این نتیجه رسیدند که، دو نوع ترک کششی و برشی در این نمونه‌ها تولید می‌شود. کوانگ لی و همکاران [۹]، نیز چگونگی رشد ترک را در نمونه‌های گچی بررسی کردند. بر اساس پژوهش‌ها ایشان، بازشدگی ترک اولیه تأثیری در مسیر رشد ترک ندارد در حالی که زاویه و طول ترک اولیه، تأثیر بسزایی در مسیر رشد ترک دارد. به گونه‌ای که با افزایش طول و زاویه ترک اولیه، امتداد مسیر رشد از امتداد ترک اولیه دورتر می‌شود. سازوکار و تنش اتصال ترک‌های کششی و برشی، پژوهش دیگری است که به وسیله‌ی پارک و بوبت [۱۰] انجام شد. طبق این پژوهش، اگر اتصال میان ترک‌های کششی<sup>۷</sup> اتفاق بیافتد و یا ترکیبی از ترک‌های کششی و ترک‌های ثانویه، سیستم پایدار است. اما اگر به هم پیوستن، فقط میان ترک‌های ثانویه باشد سیستم ناپایدار است. همچنین اتصال ترک در حالت ترک‌های برشی نسبت به حالت ترکیبی در تنش به نسبت بالایی صورت گرفت.

مطالعه سازوکار شکست مواد با استفاده از تکنیک انتشار صوت (Acoustic Emission technique)، به صورت گسترده‌ای در حال استفاده است. تکنیک غیر مخرب<sup>۸</sup> انتشار صوتی، سیگنال‌های ساطع شده حاصل از تغییر شکل و یا شکست مواد تحت بارگذاری بحرانی را شناسایی و تحلیل می‌کند [۱۱]. آگاهی از نوع میکروتُرک‌های ایجاد شده در داخل نمونه، می‌تواند در تعیین مرحله‌ای از شکست که نمونه در آن قرار دارد و پیش‌بینی و کنترل آن مفید باشد. بنابراین

است. الشای و همکارانش [۲]، اثر دما و فشار محصور کننده را بر روی چقرمگی مد ترکیبی سنگ آهک مورد بررسی قرار داد. نتایج این پژوهش حاکی از این واقعیت دارد که چقرمگی<sup>۱</sup> مد I با افزایش فشار محصور کننده افزایش قابل توجهی یافته است و این افزایش روند خطی دارد. از سوی دیگر  $K_{Ic}$  با افزایش دما افزایش ناچیزی پیدا می‌کند. چقرمگی مد II نیز با افزایش فشار محصور کننده افزایش می‌یابد. افزایش  $K_{II}$  تحت تأثیر فشار محصور کننده و دما به نسبت  $K_{Ic}$  کمتر است.

تأثیر دماهای زیر صفر روی چقرمگی مد I نیز از دیگر عواملی است که به وسیله‌ی دیوید و همکاران [۳]، بررسی شده است. بر اساس این مطالعه مقادیر چقرمگی برای هر نوع سنگی تحت شرایط دمای زیر صفر (۱۰- درجه تا ۵۰- درجه) به نسبت دمای اتاق (۳۰ درجه) افزایش پیدا می‌کند. همچنین مقادیر چقرمگی سنگ‌های با آب محتوی بالاتر در قیاس با سنگ‌های با آب محتوی کمتر سریعتر افزایش پیدا می‌کند. نتایج حاصل از بررسی‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که افزایش پارامترهایی چون مدول یانگ، مقاومت فشاری تک محوره، وزن مخصوص خشک، سرعت امواج صوتی و سطح تماس دانه‌های سنگ سبب افزایش در چقرمگی شکست سنگ می‌شود. ولی در عوض افزایش تخلخل، نسبت پواسون و اندازه دانه‌های سنگ سبب کاهش مقاومت سنگ در برابر رشد ترک می‌شود [۴].

افزایش چگالی و طول میکروتُرک‌ها نیز طبق بررسی‌های صورت گرفته به وسیله‌ی ناصری و همکاران [۵]، بیانگر این واقعیت است که مقدار چقرمگی شکست با افزایش چگالی و طول میکروتُرک‌ها، کاهش می‌یابد. بررسی‌های صورت گرفته روی اثر اندازه دانه‌ها<sup>۲</sup> در چقرمگی شکست سنگ‌ها به وسیله‌ی ابرهاردت و همکاران [۶]، نشان می‌دهد که اندازه دانه‌ها یک نقش ثانویه در روند گسترش ترک پس از مقاومت دانه‌ها دارد. به گونه‌ای که تأثیر اندازه در مراحل اولیه رشد ترک ناچیز است ولی رفتار ترک در حین گسترش و انتشار به شدت متأثر از اندازه دانه‌ها است.

3 Rock like material

4 Brittleness

5 Meso\_structure

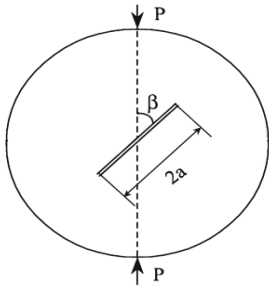
6 Coalescence

7 Wing cracks

8 Nondestructive technique

1 Toughness

2 Grain size



شکل ۲. تصویری شماتیک از نمونه دیسک برزیلی با ترک مستقیم مرکزی (CSCBD).

آتکینسون و همکاران [۱۴]، یک بیان تحلیلی برای محاسبه چقرمگی مد برشی و کششی با استفاده از نمونه‌های برزیلی با ترک مرکزی به صورت زیر ارائه کردند:

$$K_{I} = \frac{P \sqrt{a}}{\sqrt{\pi R B}} N_{I} \quad (۱)$$

$$K_{II} = \frac{P \sqrt{a}}{\sqrt{\pi R B}} N_{II} \quad (۲)$$

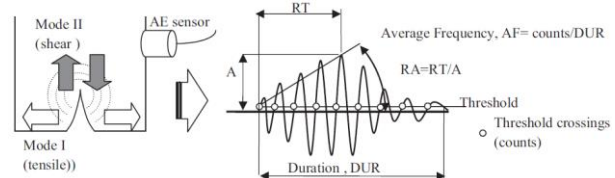
که در آن  $K_{II}$  و  $K_{I}$  فاکتور شدت تنش مد شکست کششی و برشی<sup>۰.۵</sup> متر (پاسکال)،  $P$  بار فشاری در لحظه شکست (نیوتن)،  $a$  نصف طول ترک مرکزی (متر)،  $R$  شعاع نمونه برزیلی (متر)،  $B$  ضخامت نمونه‌های برزیلی (متر) و  $N_{I}$  و  $N_{II}$  ضرایب بدون بعد هندسی که تابعی از نسبت نصف طول ترک بر روی شعاع نمونه‌ها  $\left(\frac{a}{R}\right)$  و زاویه امتداد ترک  $(\beta)$  با امتداد بارگذاری است. محاسبه مقادیر  $N_{I}$  و  $N_{II}$  به عنوان تابعی از  $\frac{a}{R}$  و  $\beta$  بسیار مشکل است [۱۵]. آتکینسون و همکاران روابط زیر را برای نمونه‌هایی با طول ترک نسبتاً کوچک پیشنهاد کرده‌اند  $\left(\frac{a}{R} \leq 0.3\right)$ :

$$N_{I} = 1 - 4(\sin \beta)^2 + 4(\sin \beta)^2 (1 - 4(\cos \beta)^2) \left(\frac{a}{R}\right)^2 \quad (۳)$$

$$N_{II} = [2 + (8(\cos \beta)^2 - 5) \left(\frac{a}{R}\right)^2] \sin 2\beta \quad (۴)$$

بر اساس دو مقدار برای نسبت  $\left(\frac{a}{R}\right)$ ، تغییرات مقادیر  $N_{I}$  و  $N_{II}$  با تغییرات زاویه  $\beta$  در شکل ۳ نمایش داده شده است.

طبقه بندی نوع میکرو ترک‌ها، اخیراً مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. از جمله پارامترهای اساسی در دسته‌بندی میکرو ترک‌ها مطابق شکل ۱، فرکانس متوسط و پارامتر RA است.



شکل ۱. انواع مد ترک و پارامترهای AE.

طبق تعریف، تعداد رویداد به دوره تناوب را فرکانس متوسط<sup>۱</sup> (AF) می‌نامند. RA، خارج قسمت زمان خیز<sup>۲</sup> به بیشینه دامنه تعریف می‌شود [۱۲].

اهنو و اهتسو [۱۱]، بر مبنای آنالیز تانسور گشتاور اقدام به طبقه بندی نوع ترک‌های تولیدی در آزمایش مکانیک شکست پرداخته‌ند. آگلیز [۱۲]، این دسته‌بندی را بر مبنای نسبت فرکانس متوسط کانت‌ها با پارامتر RA انجام داده است. بررسی‌های صورت گرفته در این زمینه نشان می‌دهد که کانت‌های تولیدی در مراحل اولیه بارگذاری دارای فرکانس بالا و مقدار RA پایین است. درحالی که کانت‌های تولیدی در مراحل نزدیک به شکست نمونه از نوع فرکانس پایین و RA بالا است. با توجه به ویژگی‌های امواج برشی و کششی، عمده میکرو ترک‌های تولیدی در مراحل اول شکست نمونه از نوع کششی و سپس برشی و کششی دسته‌بندی شده است [۱۳].

## ۲. چقرمگی شکست سنگ

برای تعیین چقرمگی نمونه‌های سنگی و شبه سنگی روش‌های مختلفی به وسیله‌ی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ ارائه شده است. یکی از این روش‌ها، روش دیسک برزیلی با ترک مستقیم مرکزی (CSCBD) است (شکل ۲). از مزایای این روش می‌توان به محاسبه چقرمگی مد کشش خالص ( $K_{I}$ ) و برش خالص ( $K_{II}$ ) با توجه به زاویه ترک با امتداد بارگذاری اشاره کرد.

1 Average Frequency  
2 . Rise time

شکست مد I و II و اثر آن بر روی مسیر رشد ترک بررسی شود.

#### ۴. آماده‌سازی نمونه

برای ساخت نمونه‌های ترک‌دار مطابق شکل ۴ از پروفیل‌های PVC با قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۵۵ میلی‌متر و تیغه‌های فلزی با ضخامت ۱ و عرض ۳۰ میلی‌متر استفاده شده است. نمونه‌ها متشکل از آب، ماسه سیلیسی، گچ و سیمان پرتلند با نسبت‌های وزنی ۰/۴۵، ۱، ۰/۲ و ۰/۸ است.



شکل ۴. قالب‌های PVC برای ساخت نمونه‌های CSCBD و نمونه‌های آزمایش مقاومت تک محوری.

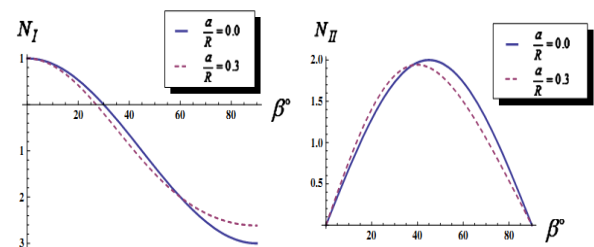
برای اندازه‌گیری سایر پارامترهای مقاومتی نمونه‌ها همچون مقاومت فشاری تک محوره، مدول یانگ و مقاومت کششی غیرمستقیم (برزیلی)، اقدام به ساخت نمونه‌هایی به قطر ۵۴ میلی‌متر با ترکیب یکسان با نمونه‌های CSCBD با استفاده از قالب‌های نمایش داده شده در شکل ۴ شده است.

ماسه سیلیسی از نوع درجه یک دانه‌بندی شده با مقاومت فشاری حدود ۷۰ مگاپاسکال و مدول یانگ ۵۰ گیگاپاسکال می‌باشد (شکل ۵). شماره سرندهای استفاده شده برای حصول دانه‌بندی مورد نیاز مطابق جدول ۱ است.



شکل ۵. شش نمونه از ماسه سیلیسی دانه‌بندی شده با سرند.

در ادامه ۶ سری نمونه با ترکیب و دانه‌بندی ذکر شده تهیه شد. برای اندازه‌گیری چقرمگی مد I و II برای هر دانه‌بندی ۱۲ نمونه ساخته شد که شش عدد تحت بارگذاری با زاویه صفر



شکل ۳. تغییرات  $N_I$  و  $N_{II}$  با زاویه  $\beta$  و  $\frac{a}{R}$  [۱۶].

همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، فاکتور بدون بعد شدت تنش مد I شکست به طور یکنواخت با افزایش زاویه  $\beta$  کاهش می‌یابد. این در حالی است که  $N_{II}$  یک بیشینه موضعی در  $\beta = 45^\circ_40^\circ$  دارد. بعلاوه شکل ۳ تاکید می‌کند که مد کشش خالص در حالت  $\beta = 0$  اتفاق می‌افتد. در حالی که مد II خالص در حالت بارگذاری با زاویه  $\beta = 45^\circ_40^\circ$  بر اساس مقادیر مختلف  $\frac{a}{R}$  اتفاق می‌افتد. با توجه به اینکه نسبت  $\frac{a}{R}$  برای نمونه‌های آزمایش شده در این پژوهش برابر ۰/۳ است. پس بر اساس روابط (۳) و (۴) تحت زاویه بارگذاری ۲۷ درجه، نمونه‌ها تحت بارگذاری مد برش خالص با مقدار  $N_{II}$  برابر ۱/۷۳ و تحت زاویه بارگذاری صفر درجه نسبت به امتداد بارگذاری، مد کشش خالص با مقدار  $N_I$  برابر یک قرار می‌گیرد.

#### ۳. بررسی آزمایشگاهی

بررسی آزمایشگاهی رشد ترک در نمونه‌های سنگ و بتن، قبلاً به وسیله‌ی پژوهشگران زیادی مورد توجه قرار گرفته است. یکی از مهمترین چالش‌ها در این زمینه تهیه نمونه‌هایی مشابه سنگ از لحاظ مقاومتی، همگنی، همسانگردی و سایر پارامترها است. آیت‌اللهی و پیرمحمد [۱۷]، اثر اندازه دانه بر روی چقرمگی شکست مد کشش و برش را روی نمونه‌های آسفالت بررسی کرده‌اند. همچنین مارکوس و همکاران [۱۸]، اثر دانه‌بندی بر روی نمونه‌های بتن تحت بارگذاری چهار نقطه‌ای را تحت آزمایش قرار داده‌اند که نتایج هر دو بررسی حکایت از بالا بودن چقرمگی برای نمونه‌هایی با دانه‌بندی متوسط است. در این پژوهش نیز سعی شده است اثر اندازه دانه‌های تشکیل دهنده نمونه‌های شبه سنگی بر روی چقرمگی

## ۵. نتایج آزمایش‌ها

### ۵-۱. چقرمگی شکست

پس از انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیر مستقیم (برزیلی) و آزمایش تعیین چقرمگی، مقادیر این کمیت‌ها بر اساس روابط موجود محاسبه شده است. جدول ۲ مربوط به پارامترهای مقاومتی نمونه‌ها شامل مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی غیر مستقیم (برزیلی) و شاخص شکنندگی نمونه‌ها است.

جدول ۲. مقادیر حاصل مقاومت فشاری تک محوری و کششی غیر

مستقیم (برزیلی) برای هر شش دانه‌بندی.

نمونه	اندازه دانه (میلی متر)	$(\sigma_c)$ (MPa)	$(\sigma_t)$ (MPa)	$\frac{\sigma_t}{\sigma_c}$
۱	۰/۵۹۵-۱	۱۰/۵۶	۱/۲۴	۸/۵۲
۲	۱-۱/۴۱	۹/۷۷	۱/۱۲	۸/۷۰
۳	۱/۴۱-۲	۹/۴۶	۱/۰۲	۹/۲۴
۴	۲-۲/۳۸	۹/۳۰	۱/۴۹	۶/۲۶
۵	۲/۳۸-۴/۷۵	۸/۷۲	۱/۰۱	۸/۶۲
۶	۴/۷۵-۶/۷۳	۶/۶۵	۰/۸۶	۷/۷۵

مطابق جدول ۲ مقاومت فشاری نمونه‌ها با افزایش اندازه دانه‌ها کاهش می‌یابد. در نتیجه بیشترین مقاومت فشاری تک محوره مربوط به نمونه با اندازه دانه ۰/۵۹۵-۱ میلی متر برابر چقرمگی نمونه‌های شبه سنگی بر خلاف مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها، مطابق شکل ۸ یک رابطه غیر خطی با اندازه دانه‌های نمونه‌ها دارد. به گونه‌ای که بیشترین چقرمگی شکست مد I و مد II مربوط به دانه‌بندی ۲\_۲/۳۸ میلی متر است. مقادیر مربوط به چقرمگی نمونه‌ها در جدول ۳ آورده شده است.

(کشش خالص) و شش عدد تحت زاویه ۲۷ (برش خالص) و در مجموع ۷۲ عدد نمونه ترک دار تهیه شده است.

جدول ۱. شماره سرندهای استفاده شده برای دانه‌بندی نمونه‌ها.

شماره	شماره مش	اندازه چشمه (میلی متر)
۱	۳۰-۱۸	۰/۵۹۵-۱
۲	۱۸-۱۴	۱-۱/۴۱
۳	۱۴-۱۰	۱/۴۱-۲
۴	۱۰-۸	۲-۲/۳۸
۵	۸-۴	۲/۳۸-۴/۷۵
۶	۴-۳	۴/۷۵-۶/۷۳

همچنین برای اندازه‌گیری پارامترهای مقاومتی نمونه‌ها همچون مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی غیر مستقیم (برزیلی)، برای هر دانه‌بندی ۶ عدد نمونه NX مطابق شکل ۶ ساخته شده است.



شکل ۶. بخشی از نمونه‌های ترک‌دار و بدون ترک با شش دانه‌بندی مختلف.

برای انجام آزمایش‌ها مطابق شکل ۷ از دستگاه بارگذاری INSTRON با دقت بارگذاری ۰/۰۰۴ میکرومتر و نرخ بارگذاری ۰/۳ میلی متر در دقیقه استفاده شده است. همه نمونه‌ها پس از ۱۴ روز آزمایش شده‌اند.

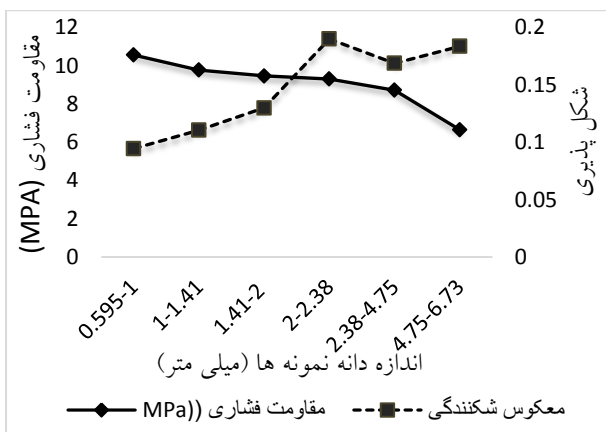


شکل ۷. دستگاه بارگذاری به همراه سنسورهای سیستم ثبت امواج

صوتی.

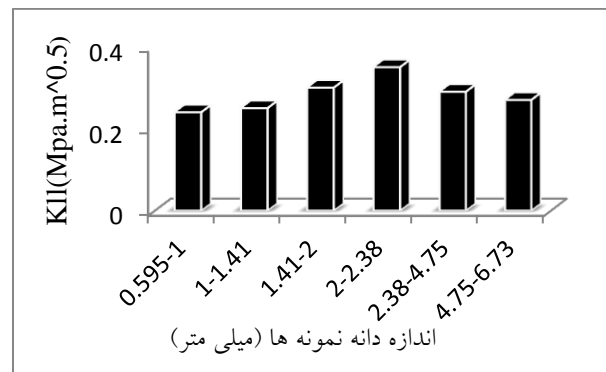
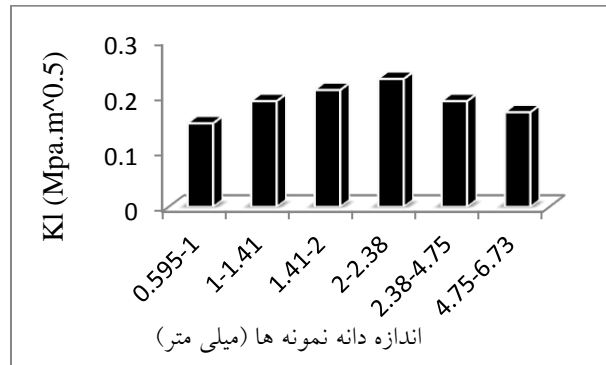
همان‌گونه که اشاره شد چقرمگی در واقع به نوعی مقاومت ذاتی ماده در برابر رشد ترک است. بنابر این طبیعی است که با مقاومت فشاری تک محوری ماده رابطه مستقیمی داشته باشد. از طرفی دیگر، در مواد شکننده به دلیل عدم وجود سازوکار-های اتلاف انرژی کرنشی ذخیره شده در ماده همچون تغییر شکل‌های پلاستیک در نوک ترک، رشد ترک سریعتر صورت می‌گیرد. پس چقرمگی ماده شکننده کمتر از ماده شکل‌پذیر است.

شکل ۹ تغییرات مقاومت فشاری تک محوری با معکوس شکنندگی و چقرمگی مد برش خالص را برای هر شش دانه‌بندی نشان می‌دهد (برای مد شکست کشش خالص نیز وضعیت کاملاً مشابه است). مطابق این شکل، نمونه با اندازه دانه ۲-۲/۳۸ میلی‌متر از لحاظ مقاومتی و شکنندگی در حد قابل قبولی در میان سایر نمونه‌ها است. مقاومتی بیشتر از میانگین مقاومت کلی و بالاترین حد شکل‌پذیری (پایین‌ترین حد شکنندگی) که حاصل دانه‌بندی آن است. در نتیجه بیشترین چقرمگی شکست برش خالص را دارد. بنابر این یکی از دلایل تاثیر تغییرات دانه‌بندی در چقرمگی را می‌توان نتیجه تغییر در شکنندگی و مقاومت نمونه‌ها ناشی از تغییرات میزان همگنی یا ناهمگنی محیط دانست.



شکل ۹. تغییرات مقاومت فشاری تک محوری با عکس شکنندگی و چقرمگی مد کشش خالص و برش خالص.

با ریزتر شدن میانگین اندازه دانه‌ها، محیط همگن‌تر شده در نتیجه شکنندگی نمونه افزایش می‌یابد. در مقابل برای نمونه‌های شامل دانه‌های درشت، محیطی ناهمگن با تغییر



شکل ۸. تغییرات چقرمگی مد I و مد II با تغییرات اندازه دانه‌ها.

جدول ۳. مقادیر چقرمگی مد I و مد II بر اساس اندازه دانه‌ها.

اندازه دانه (میلی متر)	$K_I$ (MPa.m <sup>0.5</sup> )	$K_{II}$ (MPa.m <sup>0.5</sup> )
۰/۵۹۵-۱	۰/۱۵	۰/۲۴
۱-۱/۴۱	۰/۱۹	۰/۲۵
۱/۴۱-۲	۰/۲۱	۰/۳۰
۲-۲/۳۸	۰/۲۳	۰/۳۵
۲/۳۸-۴/۷۵	۰/۱۹	۰/۲۹
۴/۷۵-۶/۷۳	۰/۱۷	۰/۲۷

تغییرات غیر خطی چقرمگی مد کشش خالص و برش خالص با تغییرات دانه‌بندی نمونه‌ها را می‌توان به تغییرات مقاومت فشاری تک محوری و شاخص شکنندگی نمونه‌ها نسبت داد.

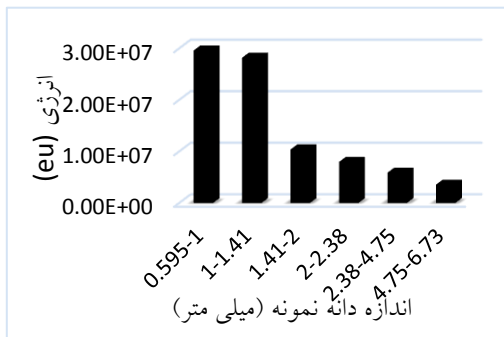


می‌شود. در این نوع شکست نیز تغییرات اندازه دانه سبب تغییر چنداتی در مسیر رشد ترک نشده است و فقط در برخی موارد در نمونه‌های دانه درشت شروع ترک از مرز دانه‌ها بوده است.

### ۳-۵. نتایج انتشار آوایی

#### ۱-۳-۵. انرژی کانت‌ها

انرژی آزاد شده به وسیله‌ی مجموع کانت‌ها در لحظه شکست مطابق شکل ۱۱ نشان می‌دهد که با ریزتر شدن اندازه دانه‌ها، شاهد شکستی سریع با انرژی آزاد شده بالا خواهیم بود. این در حالی است که برای نمونه‌های دانه درشت، مجموع انرژی آزاد شده به نسبت کمتر می‌باشد.



شکل ۱۱. انرژی آزاد شده به وسیله‌ی کانت‌های تولیدی در لحظه شکست برای شش دانه‌بندی.

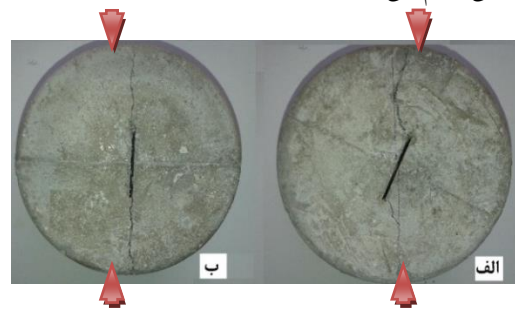
### ۲-۳-۵. تغییرات اندازه ناحیه صدمه دیده نوک ترک

اندازه ناحیه صدمه دیده<sup>۳</sup> در نوک ترک بر اثر تمرکز تنش، عاملی تعیین کننده در رفتار مکانیک شکست مواد است. در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از داده‌های انتشار آوایی، به صورت غیر مستقیم اندازه این ناحیه برای دانه‌بندی‌های مختلف تخمین زده شود. مبنای کار با تکیه بر این اصل استوار است که فرض شود هر کانت تولیدی به وسیله‌ی نمونه، ناشی از تولید یک میکرو ترک در داخل نمونه است [۱۹]. مطابق نمودار بار-جاب‌جایی، شروع میکرو ترک در نمونه‌های تحت بار، از انتهای ناحیه الاستیک تا قبل از شکست نهایی نمونه است. برخی این بازه را بر روی نمودار بار-جاب‌جایی ۴۰ درصد تا ۸۰ درصد مقاومت نهایی فرض می‌کنند [۲۰]. پس در این پژوهش، با توجه به نمودار بار-جاب‌جایی همه‌ی نمونه‌ها، اقدام به محاسبه تعداد جمعیتی

شکل‌ها و جابه‌جایی‌های در حین بارگذاری خواهیم داشت که سبب اتلاف انرژی شکست و کاهش تمرکز تنش در نوک ترک خواهد شد. در نتیجه چقرمگی شکست افزایش خواهد یافت. اما برای دانه‌های خیلی درشت‌تر، کاهش مقاومت غالب شده و چقرمگی نمونه‌ها را کاهش می‌دهد. وجود مرزهای طولانی به دلیل دانه‌بندی درشت‌تر، عامل دیگری در کاهش چقرمگی نمونه‌های دانه درشت است. در این میان بیشترین چقرمگی مربوط به نمونه‌ای با پایین‌ترین شاخص شکنندگی و بیشترین مقاومت خواهد بود.

### ۲-۵. شکل شکست

شکل شکست نمونه‌های تحت بارگذاری مد برش خالص، برای هر شش دانه‌بندی، مطابق شکل ۱۰-الف تقریباً مشابه هم است. در ابتدای بارگذاری، با به وجود آمدن تمرکز تنش در نوک ترک ایجاد شده، یک سری میکروترک‌ها در ناحیه نوک ترک اولیه با عنوان زون شکست<sup>۱</sup> حاصل می‌شوند. در ادامه با گذشت زمان این میکروترک‌ها رشد کرده و به هم متصل شده و تبدیل به یک ترک بزرگ‌تر شده و از نوک ترک اولیه شروع به رشد می‌نمایند. این نوع ترک از نوع کششی بوده<sup>۲</sup> و در امتداد عمود بر تنش کششی گسترش یافته و به محل اعمال بارخارجی ختم می‌شود.



شکل ۱۰. الف) نمونه تحت بارگذاری مد برش خالص (ب) نمونه تحت بارگذاری مد کشش خالص.

شکل ۱۰-ب شکل شکست نمونه‌ها تحت بارگذاری مد کشش خالص را نشان می‌دهد. در این نوع نیز تمرکز تنش به وجود آمده در نوک ترک، سبب رشد ترک از این نقطه در جهت امتداد بارگذاری شده و در نهایت در مرز نمونه متوقف

1 Fracture process zone  
2 Wing crack

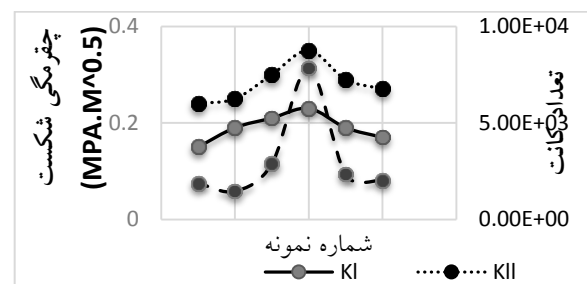
همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، درصد انرژی آزاد شده توسط کانت‌ها در بازه مورد بحث نیز مشابه تغییرات تعداد کانت، کاملاً هماهنگ با تغییرات چقرمگی نمونه‌ها می‌باشد. یعنی بیشترین کانت تولیدی با بالاترین سطح انرژی آزاد شده، مربوط به نمونه‌ای است که بیشترین چقرمگی را در هر دو حالت بارگذاری کششی و برشی دارد. این پدیده را به این ترتیب می‌توان توجیه کرد که، منبع انرژی آزاد شده توسط کانت‌ها در واقع همان انرژی کرنشی ذخیره شده در نمونه‌ها می‌باشد که بر اثر ایجاد میکرو ترک‌ها آزاد می‌شود. در واقع این انرژی باید صرف ایجاد صفحه جدید جدایش و در نهایت شکست نمونه شود ولی به دلیل وجود محیطی ناهمگن با نقاط ضعف متعدد در سراسر نمونه که حاصل تغییرات دانه بندی آن می‌باشد، یک سری میکرو ترک‌هایی به دور از مسیر اصلی شکست حاصل می‌شود که نه تنها سبب تسریع شکست نهایی نمونه نمی‌شود، بلکه سبب اتلاف انرژی کرنشی ذخیره شده در نمونه می‌شود. از این رو شاهد کاهش تمرکز تنش در نوک ترک می‌باشیم که علت اصلی گسترش ترک است.

### ۵-۳-۳. تغییرات فرکانس متوسط و RA

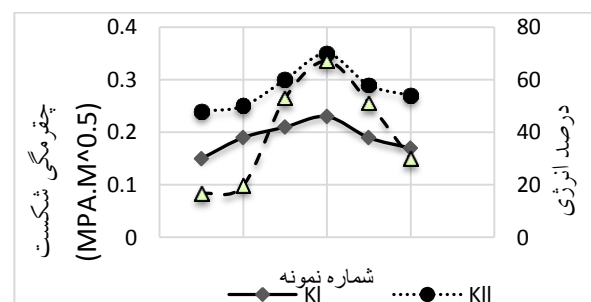
تغییرات فرکانس و RA برای نمونه‌ها، یکی از پارامترهای مهم برای تعیین نوع کانت‌های دریافتی به وسیله‌ی دستگاه ثبت امواج صوتی است. با تشخیص نوع کانت‌ها، می‌توان نوع ترک تولید کننده آن کانت را تعیین کرد. شکل ۱۴ تغییرات RA متوسط برای همه رخدادهای<sup>۱</sup> تولید شده در طول آزمایش برای هر شش دانه بندی در هر دو مد بارگذاری کششی و برشی نشان می‌دهد. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که روند تغییرات مقدار RA متوسط برای هر شش دانه بندی در هر دو حالت بارگذاری مد شکست برشی و کششی، کاملاً مشابه تغییرات چقرمگی شکست ارائه شده در بخش ۵-۱ است. بررسی تغییرات نسبت فرکانس متوسط به RA برای دانه‌بندی-های شش گانه می‌تواند در تشخیص نوع سازوکار داخلی شکست نمونه‌ها مفید باشد. شکل ۱۵ نسبت فرکانس متوسط به مقدار RA را برای هر شش دانه‌بندی مختلف در حالت مد

کانت‌ها برای هر شش دانه بندی شده است. نتیجه کار به صورت شکل ۱۲ ارائه شده است. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که تغییرات تعداد کانت تولیدی در بازه ۴۰ درصد تا ۸۰ درصد مقاومت نهایی هر دانه بندی، کاملاً مشابه تغییرات چقرمگی مد شکست کشش و برش است. به گونه‌ای که دانه‌بندی شماره ۴، بیشترین تعداد کانت را داراست.

نمودار شکل ۱۲ نشان می‌دهد که اندازه ناحیه صدمه دیده نوک ترک برای دانه بندی شماره ۴، بزرگ‌تر از سایر دانه‌بندی‌ها است. و به تدریج با کاهش و افزایش اندازه دانه، مشابه تغییرات چقرمگی، تعداد کانت تولیدی نیز کاهش می‌یابد که به معنای کاهش اندازه ناحیه صدمه دیده نوک ترک برای این نمونه‌ها است. مسئله مهم دیگر، انرژی تولیدی توسط کانت-های تولیدی در این بازه می‌باشد (۴۰ درصد تا ۸۰ درصد بار شکست). شکل ۱۳ تغییرات درصد انرژی آزاد شده توسط کانت‌های تولیدی در تمام طول آزمایش برای هر شش دانه بندی نشان می‌دهد.

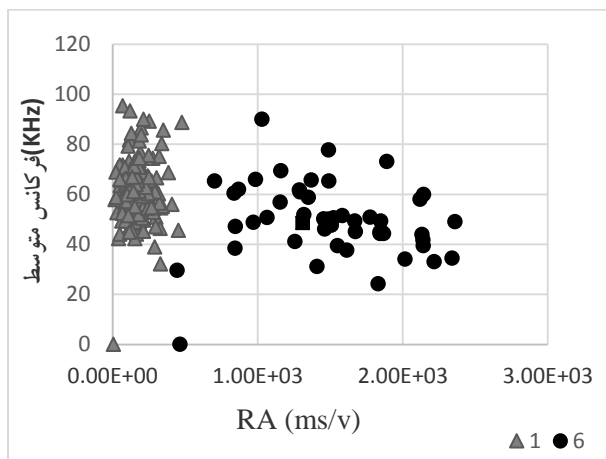


شکل ۱۲. تغییرات تعداد کانت تولیدی برای زون شکست با چقرمگی شکست مد کشش و برش برای دانه بندی شش گانه.

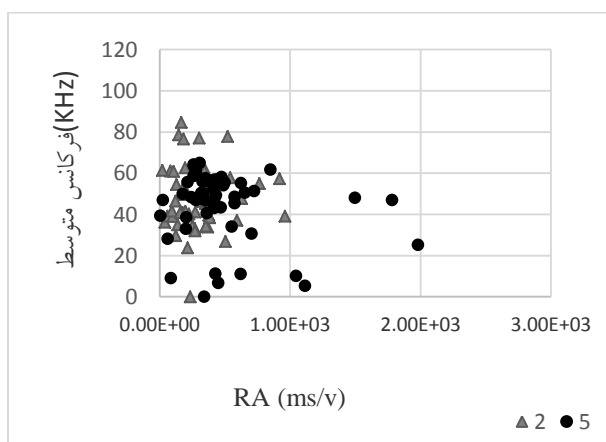


شکل ۱۳. تغییرات چقرمگی مد کشش و برش با درصد انرژی آزاد شده توسط کانت‌های تولیدی در بازه ۴۰ درصد تا ۸۰ درصد بار نهایی.

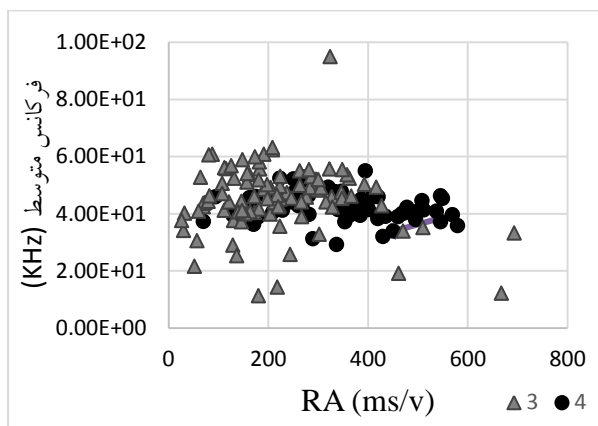




(الف)



(ب)



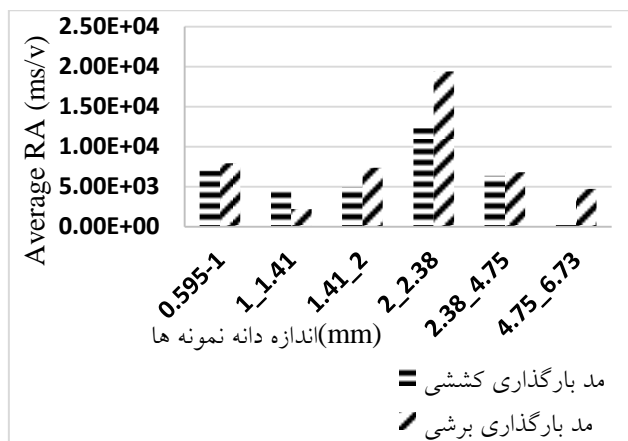
(پ)

شکل ۱۵. مقایسه نسبت فرکانس متوسط به مقدار RA برای شش دانه بندی مختلف در مد بارگذاری برشی.

## ۶. نتیجه گیری

در این پژوهش سعی شد تا اثر تغییرات دانه بندی محیط های ناهمگن نمونه های شبه سنگی، بر چقرمگی مد I و مد II و

بارگذاری برشی به صورت دو به دو مقایسه کرده است (برای مد بارگذاری کششی نیز وضعیت مشابه است).



شکل ۱۴. تغییرات مقدار RA متوسط برای هر شش دانه بندی.

مطابق شکل ۱۵-الف مشاهده می شود نسبت فرکانس متوسط به مقدار RA برای رخدادهای تولیدی نمونه شماره ۱، نزدیک محور عرضی (فرکانس متوسط) تجمع پیدا کرده اند. این در حالی است که این نسبت برای نمونه شماره ۶، در امتداد محور طولی (RA)، توزیع یافته است. به عبارت دیگر، کانت های تولیدی برای نمونه شماره ۱ (ریز ترین دانه بندی)، از نوع فرکانس بالا و مقدار RA پایین است. این در حالی است که برای نمونه شماره ۶ (درشت ترین دانه بندی، کانت ها عمدتاً از نوع فرکانس پایین و RA بالا است. این وضعیت مطابق شکل ۱۵-ب برای نمونه های شماره ۲ و ۵ نیز به همین صورت ولی با شدت کم تکرار می شود. علت کاهش شدت تمایز بین نسبت فرکانس متوسط به مقدار RA برای این دو نمونه، نزدیک شدن اندازه دانه بندی دو نمونه نسبت به نمونه های شماره ۳ و ۴ است. تا اینکه برای نمونه های شماره ۳ و ۴، به دلیل نزدیک بودن اندازه دانه بندی، مطابق شکل مشاهده می شود که این نسبت تقریباً برابر است.

بر اساس شکل ۱۵ می توان نتیجه گرفت که سازوکار شکست در نمونه های دانه ریز بیشتر میکروتکرک های کششی با فرکانس بالا و انرژی پایین است.

شکست نمونه بر اثر رشد میکروتُرک‌ها از نوک ترک اولیه، به شکلی قابل پیش بینی است.

## ۸. منابع

- [1]. H.Scholz, C. (2002). "the mechanics of earthquakes and faulting." Lamont\_Doherty Geological Observatory and Department of Earth and Environmental Sciences, Columbia University.
- [2]. Al-Shayea N.A , Khaqn K, Abduljawwad S.N. (2000). Effects of confining pressure and Rock temperature on mixed-mode (I-II) fracture toughness of a limestone rock International Journal of Mechanics and Mining Sciences 37 629-643.
- [3]. Dwivedi R.D, Soni A.K , Goel R.K , (2000). Fracture toughness of rocks under sub-zero temperature conditions. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 37 1267-1275.
- [4]. Alber M., Brardt A. (2003). Factors influencing fracture toughness KIC from simple screening tests. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 40 779-784.
- [5]. Nasser, M., B. Mohanty, et al. (2005). "Characterization of microstructures and fracture toughness in five granitic rocks." International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 42(3): 450-460.
- [6]. Eberhardt, E., B. Stimpson, et al. (1999). "Effects of grain size on the initiation and propagation thresholds of stress-induced brittle fractures." Rock mechanics and rock engineering 32(2): 81-99.
- [7] Li Y. P., Chen L.-Z., Wang Y.H., "Experimental research on pre-cracked marble under compression," Int. J. Solids Struct., vol. 42, no. 9, pp. 2505-2516, 2005.
- [8]. Sagong, m., and Bobet, A., "Coalescence of multiple flaws in a rock-model material in uniaxial compression," Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol. 39, no. 2, pp. 229-241, 2002.
- [9]. Li, Q., Yang, Q., Jia, J., and Liu, H., "Experimental Research on Crack Propagation and Failure in Rock-type Materials under Compression," Electron. J. Geotech. Eng. J, vol. 13, 2008.
- [10]. Park C. H., Bobet A., "Crack coalescence in specimens with open and closed flaws: a comparison," Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol. 46, no. 5, pp. 819-829, 2009.
- [11]. Ohno K. Ohtsu M., "Crack classification in concrete based on acoustic emission," Constr. Build. Mater., vol. 24, no. 12, pp. 2339-2346, Dec. 2010.
- [12] Aggelis D. G., "Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters," Mech. Res. Co., vol. 38, no. 3, pp. 153-157, 2011.
- [13] Aggelis D. G., Mpalaskas A., Giannoulou P., Matikas T. E., "a study on the identification of different fracture modes in cementitious materials by acoustic emission parameters," University of Ioannina Department of Materials Science and Engineering.

مسیر رشد ترک بررسی شود. بدین منظور اقدام به تهیه شش نوع نمونه با ترکیب یکسان ولی اندازه دانه‌های متفاوت شده است. سپس نمونه‌ها پس از ۱۴ روز در شرایط کاملاً یکسان تحت آزمایش تعیین چقرمگی به روش دیسک برزیلی با ترک مستقیم مرکزی (CSCBD) قرار گرفته است. از سیستم انتشار آوایی نیز برای مطالعه مکانیزم داخلی شکست نمونه‌ها استفاده شده است. نتایج حاصل به صورت زیر است:

۱. اندازه دانه‌ها با چقرمگی مد کششی و برشی رابطه غیرخطی دارد. به گونه‌ای که که بیشترین چقرمگی مربوط به نمونه‌هایی با اندازه دانه‌های متوسط (۲-۲,۳۸) میلی‌متر است و با افزایش و یا کاهش اندازه دانه‌ها از این مقدار، چقرمگی نمونه‌ها در هر دو حالت مد بارگذاری برش خالص و کشش خالص کاهش می‌یابد.
۲. مقاومت و شاخص شکنندگی دو عامل مهم در چقرمگی شکست نمونه‌ها بصورت معکوس هم است.
۳. مسیر رشد ترک در نمونه‌هایی با دانه‌بندی ریزتر منظم‌تر بوده و از نوک ترک اولیه شروع شده و در جهت عمود بر تنش کششی حداکثر گسترش می‌یابد. ولی در نمونه‌هایی با دانه‌بندی درشت‌تر، ترک از مرز دانه‌ها شروع شده و در یک مسیر نامنظم‌تر رشد کرده و ختم ترک در نقاطی با مقاومت کم در محیط نمونه است.
۴. افزایش اندازه ناحیه صدمه دیده در نوک ترک اولیه، سبب افزایش مقاومت شکست نمونه‌ها می‌شود.
۵. نسبت فرکانس متوسط به مقدار RA برای نمونه‌های دانه ریز، دارای توزیعی در امتداد محور فرکانس متوسط است در حالی که برای نمونه‌های دانه‌درشت، این نسبت در امتداد محور RA پراکنده است. پس بیشتر میکرو ترک‌ها در نمونه‌های دانه ریز کششی و در نمونه‌های دانه درشت، برشی است.
۶. ناهمگنی ناشی از دانه بندی درشت، سبب توزیع ناهمگن تنش در داخل نمونه شده و این امر سبب رشد ترک از مرز دانه‌ها و سیمان نمونه می‌شود
۷. دانه‌بندی ریز سبب تولید محیطی همگن با توزیع یکنواخت تنش در داخل نمونه می‌شود. نتیجه این پدیده،

- [18] A. S. Marques, P. M. Amaral, L. G. Rosa, and J. C. Fernandes, "Study of Aggregate Size Effect on Fracture Toughness of Petreous Macrocomposites (Concrete)," in *Materials Science Forum*, 2010, vol. 636, pp. 1342–1348.
- [19] D. G. Aggelis, A. C. Mpalaskas, D. Ntalakas, and T. E. Matikas, "Effect of wave distortion on acoustic emission characterization of cementitious materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, pp. 183–190, 2012.
- [20] M. Cai, P. K. Kaiser, Y. Tasaka, T. Maejima, H. Morioka, and M. Minami, "Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 41, no. 5, pp. 833–847, 2004.
- [14] Khan K., "Fracture toughness investigation of an indigenous limestone rock formation.," *Civ. Eng.*, 1998.
- [15] Whittaker B. N., Singh R. N., Sun G., *Rock fracture mechanics*. Elsevier, 1992.
- [16] Ghazvinian A., Nejati H.R., Sarfarazi V., Hadei M.R., (2013) "Mixed mode crack propagation in low brittle rock-like materials", *Arabian Journal of Geosciences*, 6: 4435 – 4444.
- [17] Ayatollahi M. R., Pirmohammad S., "Experimental Determination of Mode II Fracture Resistance in Asphalt Concretes."

