

بررسی کارایی روش انتشار آوایی در رفتارنگاری شکست مواد ترد

محمد حسین عرب نژاد^۱، مرتضی احمدی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس Arabnejad.m.h@gmail.com

۲- استاد بخش مهندسی معدن دانشگاه تربیت مدرس moahmadi@modares.ac.ir

(دریافت ۱۷ آبان ۱۳۹۳، پذیرش ۱۷ شهریور ۱۳۹۴)

چکیده

یکی از جنبه‌های جدید مطالعاتی در حوزه مکانیک سنگ تحقیق روی مکانیک شکست و روش‌های تحلیلی آن است. روش‌های مختلفی به منظور رفتارنگاری و بررسی پارامترهای مؤثر در شکست توسعه و کاربردی شده‌اند. یکی از این روش‌ها که در سال‌های اخیر به دلیل ویژگی‌های منحصر بفرود بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته و در حوزه بررسی‌های مکانیک شکست در مواد مختلف کاربردی شده، روش انتشار آوایی است. در این تحقیق با ارائه روش‌های بررسی شکست در مصالح ترد مثل سنگ به تشریح روش انتشار آوایی در این حوزه پرداخته شده است یکی از تحلیل‌های که در روش انتشار آوایی امکان‌پذیر است، تحلیل **Ib-value** است. در این تحقیق کارایی این روش در رفتارنگاری شکست سنگ بررسی شد؛ یک طرح اختلاط سیمان و آب برای تهیه نمونه‌های همگن و ایزوتروپ سنگ مصنوعی در نظر و نمونه‌ها قالب‌گیری شدند. پارامترهای فیزیکی و مقاومتی ملات با آزمایش‌هایی مانند مقاومت تک‌محوره و برزلی بر اساس استاندارد (ISRM) تعیین شد. آزمایش خمش سه نقطه‌ای روی نمونه‌های مکعبی ملات انجام شد. در حین آزمون، داده‌های انتشار آوایی جمع‌آوری شد. سپس با استفاده از کد کامپیوتری نوشته شده تحلیل **Ib-value** انجام گرفت. نتایج تحقیق مشخص کرد، روش انتشار آوایی توانایی بالایی در بررسی مکانیک شکست با استفاده از تحلیل‌های مختلف روی پارامترهای متمایز به‌دست آمده از این روش را دارد. تحلیل **Ib-value** به‌دلیل این‌که یک معیار عددی در بررسی وقوع شکست است، قابلیت کاربردی شدن برای ایجاد یک سیستم اعلام هشدار در سازه‌های بزرگی اعم از سدها، پل‌های بتنی، پلکان‌های سنگی و خاکی و تونل‌ها را دارد.

کلمات کلیدی

مکانیک شکست، روش انتشار آوایی، تحلیل **Ib-value** و آزمایش خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه مکعبی ملات.

۱- مقدمه

بررسی مکانیک شکست سنگ یکی از مباحث تحقیقاتی در علم مکانیک سنگ است که شامل مطالعه موارد زیر است:

- ۱- مدل‌سازی اجزای تشکیل‌دهنده به منظور ارزیابی و بررسی تغییر شکل، شکست و رفتار بعد از شکست سنگ
- ۲- مکانیزم تغییر شکل‌های غیرخطی ۳- ریز ساختارهای سنگ و رابطه آن‌ها با تغییر شکل و مود شکست ۴- مطالعات عددی، تئوری و آزمایشگاهی روی مکانیک شکست و ۵- تأثیر بار دینامیکی و استاتیکی بر رفتار شکست.

رشد ترک در سنگ روندی پیچیده دارد و دانش نحوه ایجاد، ترکیب و توسعه ریزترک یکی از موارد الزامی برای پی بردن به رفتار سنگ‌های شکننده تحت بارگذاری است. در دهه‌های گذشته مطالعات بیشتر محققین در این زمینه متمرکز روی مکانیزم توسعه ترک و به دست آوردن مود شکست و مشاهده ریز ساختارها و رفتار تنش- کرنش در سنگ‌ها بوده است. روش‌های زیادی برای شناسایی و رفتارنگاری روند شکست در سنگ استفاده شده است: روش‌های عکس‌برداری و فیلم‌برداری با فریم بالا، رفتارنگاری التراسونیک، روش‌های لرزه‌ای، روش‌های مقطع نگاری کامپیوتری و روش انتشار آوایی از جمله این روش‌ها بشمار می‌روند [۱]. در جدول ۱ مزایا و محدودیت‌های این روش‌ها ارائه شده است.

بعضی از روش‌های دیگر مثل اندازه‌گیری تغییر شکل، روش اشعه ایکس و روش شناسایی انتشار الکترو مغناطیس نیز مورد استفاده قرار گرفته است که به دلیل کاربرد کم در جدول ۱ ارائه نشده است. با توجه به محدودیت‌های روش‌ها ذکر شده در جدول ۱، روش انتشار آوایی روشی مناسب برای بررسی مکانیک شکست در سنگ است [۱]. این روش دارای مزایای منحصر بفردی بوده که در زیر به آن‌ها اشاره شده است:

- ۱- منابع انتشار آوایی در داخل نمونه سنگ است و از داخل نمونه مثل ایجاد ریز ترک‌ها تولید می‌شود و در نتیجه نیاز به منابع محرک خارجی نیست.
- ۲- اندازه‌گیری و یک رفتارنگاری مستمر تا لحظه شکست را می‌توان با این روش انجام داد. با توجه به پیشرفت‌های تجهیزاتی جدید اعم از: سنسورها و سخت

افزارهای کامپیوتری امکان برداشت کامل روند ترک خوردگی و شکست مهیا است.

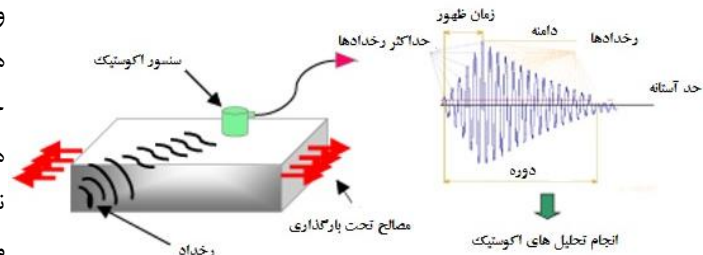
۳- این روش به دلیل نداشتن نیروی محرک هیچ گونه تنش‌ی را در نمونه ایجاد نمی‌کند و در هر اندازه نمونه قابل اجرا می‌باشد. همچنین برای استفاده در اندازه‌های بزرگ مهندسی قابل کاربرد است.

۲- روش انتشار آوایی

روش انتشار آوایی از امواج الاستیک تولید شده و منتشر شده در نتیجه آزادسازی ناگهانی انرژی کرنشی از منابع محلی یا منابع درونی مواد به بررسی امواج دریافتی می‌پردازد. امواج الاستیک منتشر شده از نوع امواج اولیه و ثانویه بوده که از درون مصالح توسط یک یا چند سنسور آوایی که توانایی شناسایی محدوده فرکانسی امواج را دارند، برداشت می‌شوند. سیگنال‌های آوایی تولید شده توسط فعالیت‌های حاصل از اعمال بار مثل: ایجاد ترک جدید، رشد و توسعه ترک‌های موجود، ریزشکست‌های مرتبط با تخلخل مواد، سایش اجزای تشکیل‌دهنده بر روی هم و تغییر شکل پلاستیک به وجود می‌آیند. مشخص کردن نوع مکانیزم کششی و برشی منابع آوایی یکی از جنبه‌های مورد توجه در مطالعات سیگنال‌های آوایی به دست آمده است. بدین منظور محققین روی چندین فاکتور تأثیرگذار و مهم در دریافت سیگنال‌های واضح و بدون تأثیر پذیر از نویزهای محلی مطالعه انجام داده‌اند [۲].

هر ماده بر اساس خصوصیات ذاتی خود تغییر شکل داده و تعدادی از رخدادهای آکوستیک بزرگ و کوچک مطابق با تغییر شکل و شکست، تولید می‌کند. بنابراین رخدادهای منتشر شده از درون مصالح شامل اطلاعاتی هستند که بیان‌کننده روندهای مختلف تغییر شکل است. سیگنال‌های آنالیز شده انتشار آکوستیک اطلاعاتی درباره طبیعت، محل و نوع مکانیزم تغییر شکل را در بر دارند. با آنالیز داده‌ها می‌توان ایجاد ترک، رشد آن، ترکیب و شکل‌گیری ترک‌های بزرگ را بررسی کرد [۳-۵]. سیستم جمع‌آوری داده توسط انتشار آوایی در شکل ۱ نشان داده شده است.

و میزان انرژی منابع آوایی مهیا کرده که با استفاده از آن-ها می‌توان میزان ترک‌خوردگی و شدت خسارت وارده در حین بارگذاری به نمونه را تعیین کرد. این پارامترها همچنین اطلاعات مفیدی برای تعیین تغییرات حجم نمونه مورد آزمایش، خسارت وارده برای تعیین میزان مقاومت و پایداری مصالح برای ادامه کاربرد سازه در اختیار قرار می‌دهد.



شکل ۱: سیستم جمع‌آوری داده با انتشار آوایی و پارامترهای آن.

جدول ۱: روش‌های کاربردی در بررسی مکانیک شکست سنگ‌ها، مزایا و محدودیت‌ها [۱].

مناسب برای شناسایی شکل‌گیری ترک در سطح نمونه و رفتارنگاری در لحظه اندازه نمونه کوچک محدودیت‌ها: نیاز به برش برای بررسی عمقی و بررسی نمونه پیچیده از لحاظ ساختاری امکان‌پذیر نمی‌باشد	روش‌های عکس‌برداری
مناسب برای بررسی سطح خسارت نمونه میرایی و سرعت موج در نمونه اندازه نمونه‌ها متوسط تا بزرگ مقیاس محدودیت‌ها: نیازمند منبع موج و داده‌های فرکانس سطح متوسط	روش التراسونیک
مناسب برای بررسی صحرایی اندازه نمونه بزرگ مقیاس محدودیت‌ها: نیاز به حفر گمانه، نیازمند منبع موج و تحلیل بعد از جمع‌آوری داده‌های آزمایش	روش لرزه‌ای
مناسب برای مقطع نگاری سه بعدی و با کیفیت اندازه نمونه کوچک مقیاس محدودیت‌ها: اندازه نمونه‌ها و نیاز به بارگذاری اولیه و هزینه بالا	روش مقطع نگاری کامپیوتری
مناسب برای رفتارنگاری در لحظه اندازه نمونه‌ها متوسط تا بزرگ مقیاس محدودیت: مشکلات نویزهای محیطی	روش انتشار آوایی

مطالعات انجام گرفته نشان داده که در حین روند شکست در نمونه‌های تردی مثل سنگ و بتن رابطه‌ای بین نوع ترک و توزیع فرکانس- دامنه آوایی وجود دارد. ایجاد ریز-ترک‌ها میزان زیادی از رخداده‌ها با دامنه پایین تولید می‌کند، در حالی که تبدیل ریزترک‌ها به ترک‌های بزرگ و ترکیب ریزترک‌ها و ایجاد شبکه‌ای به هم پیوسته از ترک‌ها منجر به تولید رخدادهای کمتر با دامنه بالاتر می‌کند. زمانی که ترک‌ها شروع به بازشدگی می‌کنند بیشتر انرژی قبل از در حین ایجاد ریزترک آزاد شده و تعداد

پارامترهای داده‌های انتشار آوایی مثل: ماکزیمم دامنه سیگنال‌ها، انرژی سیگنال‌ها، دوام موج دریافتی و زمان اوج را می‌توان از سیگنال‌های دریافتی تعیین کرده و از آن‌ها در ارزیابی مشخصات و میزان خسارت و دیگر تحلیل‌های مکانیک شکست استفاده کرد. تعیین این پارامترها از شکل موج آوایی منجر به نوعی خاص از تحلیل آوایی می‌شود که به آن‌ها تکنیک‌های تحلیلی پارامتر پایه روش انتشار آوایی گفته می‌شوند. تحلیل پارامترها اطلاعات مهمی برای مشخص کردن شدت موج

$$\log_{10} N(M) = a - b \left(\frac{A_{dB}}{2.0} \right) \quad (1)$$

که در آن N افزایش فرکانس (تعداد رخداد انتشار آکوستیک با دامنه بزرگتر از حد آستانه)، M بزرگی زمین لرزه و یا دامنه ریشتر رویداد، a یک ثابت تجربی و b نیز در انتشار آکوستیک b -value، A_{dB} دامنه اوج رخداد است. رابطه ۲ برای انتشار آکوستیک بر اساس b -value برابر است با:

$$\log_{10} N(M) = a - b_{AE} A_{dB} \quad (2)$$

که در آن b_{AE} انتشار آکوستیک بر اساس b -value، A_{dB} دامنه اوج رخداد AE بر حسب دسی بل است. در واقع dB_{AE} واحد اندازه گیری برای دامنه سیگنال‌های انتشار آکوستیک است.

مقدار دامنه رخدادهای آوایی dB_{AE} به صورت رابطه (3) تعریف می‌شود:

$$dB_{AE} = 20 \cdot \log V_p / V_{ref} \quad (3)$$

که در آن V_p حداکثر ولتاژ در میکرو ولت و V_{ref} ولتاژ ورودی پیش تقویت کننده است [7].

آکی رابطه‌ای بر اساس اصول آماری و روش اختصاص وزن مساوی به هر یک از زمین لرزه‌های ثبت شده پیشنهاد نموده و روشی جدیدی برای توزیع فرکانس‌های مجزا و بزرگی رویداد زلزله ارائه کرد [7].

محققان ژئوفیزیک روش آکی را در فرایند شکست در سنگ استفاده کردند. در تکنیک انتشار آکوستیک، مقدار b -value بر اساس روش آکی برای فرکانس مجزا از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$b = \frac{20 \cdot \log_{10} e}{\langle a \rangle - a_c} \quad (4)$$

که در آن $\langle a \rangle$ فرکانس متوسط، a_c مقدار آستانه بزرگی زمین لرزه‌های ثبت شده و e عدد نپر است.

مقدار $\langle a \rangle$ از رابطه ۵ به دست می‌آید:

زیادی رخداد ایجاد شده است که دامنه پایینی دارند. این تفاوت در دامنه دریافتی امواج در حین روند شکست ملاک بسیار مناسبی برای رفتارنگاری در لحظه و ایجاد یک ملاک و معیار مناسب برای ارزیابی پایداری مصالح گردیده است. محققین بسیاری برای توسعه این روش آنالیزی مطالعاتی را انجام داده‌اند. در نهایت با استفاده از روابط لرزه‌نگاری که مرتبط با تغییرات دامنه امواج است، تحلیل مقدار b -value را برای استفاده در مطالعات مکانیک شکست کاربردی ارائه کرده‌اند. تحلیل b -Value می‌تواند تمام ملاحظات شرایط محیطی و بارگذاری را برای داشتن یک بررسی شکست در نمونه‌های ترد فراهم کند [۲].

۳- تحلیل b -value

پارامتر b -value نشان‌دهنده نسبت حوادث ضعیف به قوی است. حالت‌های مختلف شکستگی انواع مختلف سیگنال آکوستیکی را تولید می‌کند که دارای دامنه و فرکانس‌های مختلف است. به طور کلی دامنه و مقیاس شکستگی به انرژی ساطع شده از منبع در باز شدن و یا جابجایی ترک بستگی دارد. جابجایی‌های کوچک امواج کم انرژی ساطع می‌کند، در حالی که جابجایی و یا ترک‌های بزرگ مقدار انرژی بالاتری را تولید می‌کنند [۶،۷].

همان‌طور که گفته شد b -value نشان‌دهنده نسبت حوادث ضعیف به قوی است. میکرو ترک تعداد زیادی رویداد آکوستیک با انرژی کم تولید می‌کند. بنابراین ایجاد میکرو ترک منجر به ترک خوردگی با مقدار b -value نسبتاً بالا می‌شود. ایجاد ماکرو ترک‌ها مقدار b -value کم تولید می‌کند. با افزایش سطح تنش روند شکست از حالت میکرو به حالت ماکرو پیش می‌رود و به این ترتیب با افزایش سطح تنش و با گسترش ترک و نزدیک شدن به مرحله شکست، مقدار b -value کمتر می‌شود [۶].

در مباحث زلزله شناسی، مقدار b -value به صورت منفی و از نمودار لگاریتمی- خطی بین فرکانس زلزله و بزرگی آن به دست می‌آید. در تکنیک انتشار آکوستیک رابطه گوتنبرگ-ریشتر بین فرکانس جمعی و بزرگی زلزله است که از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

۲-۲ تحلیل b-value تصحیح شده

این روش و تغییرات در تحلیل b-value توسط فرهی زاده و همکاران توسعه داده شده است. در این روش با استفاده از تصحیح میان هر دو حالت مکانیزم ایجاد ریزترکها اعم از برشی و کشش در مصالح ترد مثل سنگ و بتن با تفکیک این دو مکانیزم و در ادامه انجام تحلیل b-value برای هر گروه از مکانیزم ترک خوردگی الگوریتمی برای ارزیابی ترک و شدت خسارت برای هر گروه از رخدادهای آوایی را امکان پذیر کرده است [۲،۹].

فلوچارت شکل ۲ نشان دهنده الگوریتم آنالیز Sb-value است. مراحل انجام این روش آنالیزی به شرح زیر است:

- ۱- متمایز کردن موده‌های مختلف با استفاده از روش‌های گروه بندی سیستماتیک آنالیز تعیین مود آوایی،
- ۲- محاسبه b-value برای هر گروه و
- ۳- ایجاد فیلتر گوسی برای بزرگ نمایی مراحل تبدیل از ریز ترک به ترک‌های بزرگ در هر مود شکست.

این نکته قابل ذکر است که محققین در گذشته این روش را با استفاده از روندهای احتمالاتی بایسیان پایه و مدل سازی‌های ترکیبی گوسی انجام داده‌اند [۹].

در این تحقیق ارزیابی روش انتشار آوایی در مکانیک شکست و کاربردی بودن تحلیل مقدار b-value در مواد ترد و هموژن بررسی شده است. بدین منظور از نمونه‌های ساخته شده ملات با استفاده از دستکاه انتشار آوایی آزمایش خمش سه نقطه‌ای انجام شده است.

۴- مواد آزمایش

در مطالعه حاضر رفتارنگاری شکست و پارامترهای مختلف روی آن با استفاده از روش انتشار آوایی بررسی شده است. در ابتدا یک طرح اختلاط سیمان و آب برای تهیه نمونه‌های همگن و ایزوتروپ سنگ مصنوعی در نظر و نمونه قالب گیری شد. به منظور تعیین پارامترهای فیزیکی و مقاومتی نمونه‌های ساخته شده آزمایش‌های بر اساس استاندارد (ISRM) مانند مقاومت تک محوره و برزیلی انجام شد. در جدول ۲ طرح اختلاط نمونه‌های ساخته شده و پارامترهای

$$\langle a \rangle = \frac{\sum NA}{\sum N} \quad (5)$$

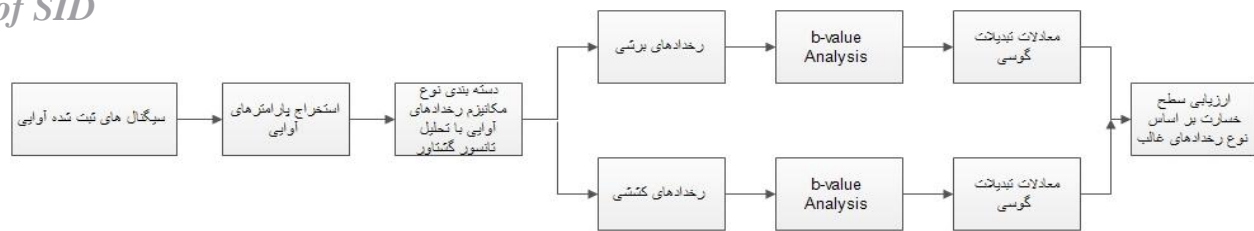
که در آن NA دامنه حوادث آکوستیک و N تعداد حوادث آکوستیک می باشد [۷،۸].

۳-۱ تحلیل b-value بهبود یافته

محاسبه مقدار b-value بر اساس شیب نمودار حداکثر توزیع دامنه فرکانس‌های آوایی می باشد. در ادامه مقادیر آماری توزیع دامنه آوایی برای محاسبه b-value در نظر گرفته می‌شود که این دامنه آوایی در طول زمان بارگذاری و بررسی روند شکست متفاوت می باشد. برای جلوگیری از تغییرات زیاد دامنه تحت تغییرات شرایط محیطی و بارگذاری که منجر به تغییر محدوده تغییرات دامنه رخدادها میگردد، سولیوتی و همکاران با در نظر گرفتن حدودی برای تغییرات دامنه رابطه (Improve b-value) را ارائه دادند. این مقدار بر اساس رابطه (۶) بدست می آید [9].

$$Ib = \frac{\log N(\mu - \alpha_1 \sigma) - \log N(\mu - \alpha_2 \sigma)}{(\alpha_1 - \alpha_2) \sigma} \quad (6)$$

که در آن μ دامنه مینا σ تغییرات استاندارد و α_1 و α_2 ثابت‌های تعریف شده که نشان دهنده ضریب‌های حدی کمینه و بیشینه برای محدوده دامنه می‌باشد. سولیوتی و همکاران مطالعاتی برای تعریف و کاربرد این روش در سازه‌های بتنی انجام داده‌اند. شرایط هر تست غیر مخرب با توجه به شرایط محیطی متغییر است و با توجه به تعریف و در نظر گرفتن حدود تغییرات دامنه پارامتر Ib-value به عنوان یک پارامتر تأثیرناپذیر از شرایط رفتارنگاری شناخته می‌شود و تنها به سطح خسارت بستگی دارد. سولیوتی با این روش میزان سطح تخریب سازه‌ها تحت شرایط بارگذاری دوره‌ای زلزله را تعیین کرده و نشان داد محاسبه میزان Ib-value بر اساس دامنه رخدادهای آوایی میتواند منجر به تعیین سطح خسارت در سازه گردد [۹،۱۰].



شکل ۲: الگوریتم آنالیز Sb-value [۹].

جدول ۳: اندازه نمونه‌ها و نتایج آزمایش تعیین سرعت صوت.

شماره نمونه	طول L(mm)	قطر D(mm)	زمان دریافت موج (میکرو ثانیه)	سرعت موج (متر بر ثانیه)
۱	۱۱۱	۵۴	۲۴/۹	۴۴۵۷
۲	۱۰۹	۵۴	۲۴/۷	۴۴۱۲
۳	۱۱۳	۵۳	۲۵/۸	۴۳۷۹
۴	۱۲۰	۵۴	۲۷/۴	۴۳۷۹
۵	۱۲۱	۵۳	۲۷/۹	۴۳۳۶
۶	۱۲۱	۵۳	۲۷/۴	۴۴۱۶

مقاومتی ارائه شده است. در مرحله بعد به منظور تعیین سرعت صوت در نمونه‌های مورد نظر آزمایش سرعت صوت طبق استاندارد انجام گرفت [۱۱] و سرعت صوت در نمونه‌ها به دست آمده و سرعت متوسط تعیین شد.

متوسط سرعت ۴۳۹۶٫۵ متر بر ثانیه برای نمونه‌ها به دست آمد که این سرعت مبنای داده‌برداری به نرم‌افزار انتشار آوایی بوده است. در جدول ۳ مشخصات نمونه‌های تحت آزمایش صوت و نتایج ارائه شده است. آزمایش خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌ها بر اساس استاندارد انجام شده است [۱۱].



شکل ۳: نمونه‌های استاندارد برای تعیین سرعت صوت و پارامترهای مقاومتی سنگ مصنوعی مورد آزمایش.

بارگذاری نمونه‌ها از دستگاه بارگذاری (Instron) استفاده شد. نرخ بارگذاری ۰/۲ میلی‌متر بر دقیقه بوده است. سنسورهای آوایی بر روی نمونه در مکان‌های مناسب نصب شد. داده‌های انتشار آوایی اعم از دامنه و دوام موج و فرکانس با استفاده از دستگاه انتشار آوایی در هر آزمایش جمع‌آوری شد.

در ادامه با توجه به طرح اختلاط نمونه‌های مکعب مستطیلی طبق استاندارد ساخته شد [۱۱]. به منظور ایجاد سطح مناسب برای نصب سنسورها نمونه‌ها صاب داده شدند. سپس با استفاده از دستگاه ایجاد ترک اقدام به ایجاد ترک‌های اولیه در میانه و در کنار نمونه شد. ایجاد ترک در

جدول ۲- طرح اختلاط و پارامترهای مقاومتی نمونه سنگ مصنوعی ساخته شده

وزن حجمی سیمان	نسبت آب به سیمان	وزن مخصوص	مقاومت فشاری تک محوره	مقاومت برزیلی	مدول الاستیسیته	چسبندگی	زاویه اصطکاک
۸۷۵ kg/m ³	۰/۳۵	۲/۲۵۸	۴۷/۵ MPa	۳/ ۷۲ MPa	۱۸/۳ GPa	۹/۶۲MPa	۳۰ درجه

دو مکان مختلف به منظور بررسی مکانیزم‌های متفاوت تنشی درون نمونه و شکست نمونه از مکان مناسب بوده است. برای



شکل ۴: نمونه‌های مکعب مستطیلی برای انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای و انتشار آوایی.

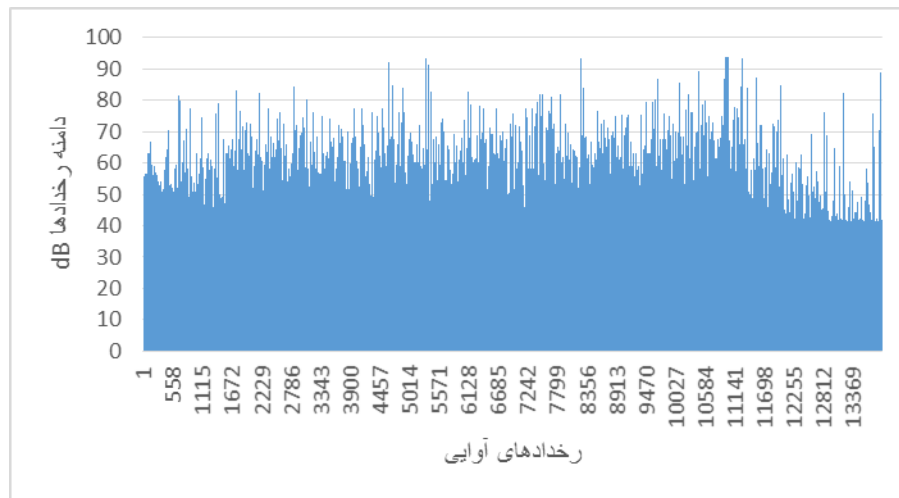
تا ۱,۲ می باشد که با توجه به تقسیم بندی انجام شده توسط شیتوانی [8] در حین بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای یک روند تقریباً صعودی می باشد که نشان دهنده ایجاد ریز ترک‌ها در نمونه می باشد. در ادامه بارگذاری، افزایش لحظه ای در مقادیر **Ib-value** مشاهده شد که نشان دهنده اتصال ریز ترک‌ها و ایجاد ترک‌های بزرگتر می‌باشد. نزولی دارد که نشان دهنده رشد ترک اصلی می باشد. لحظه مقدار **Ib-value** در مراحل بعدی با توجه به نمودار روند نزولی دارد که نشان دهنده رشد ترک اصلی است. لحظه شکست نمونه بر اساس نمودار، کاهش مقدار **Ib-value** از مقدار یک است که در شکل به وضوح مشاهده می‌شود.

در سنگ مصنوعی با استفاده از داده‌های انتشار آوایی و با بهره‌گیری از تحلیل مقدار **Ib-value** بوده است. این پارامتر

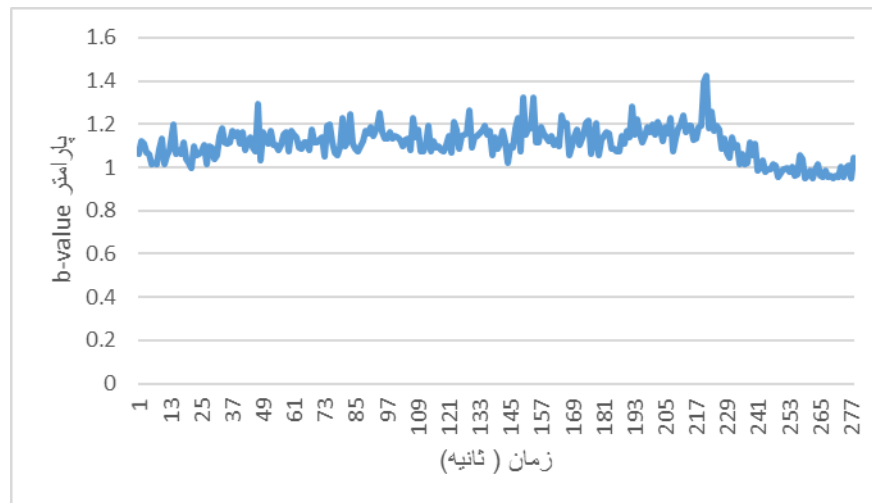
به‌عنوان یک شاخص ارزیابی خسارت در سازه‌های بزرگ همچون سدها و سازه‌های بتنی نگهدارنده در تونل‌ها استفاده شده است. برای تعیین مقدار **Ib-value** از نرم‌افزار متلب (MATLAB) استفاده شد. در این نرم افزار روابط ریاضی به‌صورت کد محاسباتی نوشته شد، به‌طوری‌که با وارد کردن داده‌های دامنه رخدادها در مراحل مختلف بارگذاری و شکست حاصل از دستگاه آوایی، مقدار **Ib-value** محاسبه شد.

شکل شماره ۵ نشان‌دهنده میزان دامنه هر کدام از رخدادهای به‌دست آمده در حین روند شکست در آزمایش خمش است. داده‌های به‌دست آمده از دامنه رخدادها مبنای انجام تحلیل **Ib-value** است. با استفاده از داده‌های دامنه و روابط ۳ و ۴ میتوان تحلیل مقدار **Ib-value** را برای زمان کل آزمایش و مراحل مختلف روند شکست انجام داد.

شکل ۶ نشان دهنده تغییرات پارامتر **Ib-value** در حین بارگذاری و آغاز روند شکست در طول مدت بارگذاری را نشان می‌دهد. میزان تغییرات این پارامتر در حدود مقادیر ۱



شکل ۵: تغییرات دامنه رخدادهای آوایی.



شکل ۶: تحلیل b-value.

نتایج تحقیق نشان داد روش انتشار آوایی توانایی بالایی در بررسی مکانیک شکست با استفاده از تحلیل‌های مختلف بر روی پارامترهای متمایز به دست آمده از این روش را دارد. تحلیل مقدار **Ib-value** به دلیل اینکه یک معیار عددی در بررسی وقوع شکست است، قابلیت کاربردی شدن برای ایجاد یک سیستم اعلام هشدار در سازه‌های بزرگی اعم از سدها، پل‌های بتنی، پلکان‌های سنگی و خاکی و تونل‌ها را دارد.

۶- نتیجه‌گیری

به منظور مطالعه شکست بر روی سنگ روش‌های متنوعی ارائه شده است. در این تحقیق روش‌های بررسی شکست با بیان مزایا و محدودیت‌های آن‌ها ارائه شد. روش انتشار آوایی به عنوان روش منحصر بفرد که دارای مزایا و کاربردهای متنوع است، توضیح داده شد. این روش دارای توانایی بررسی در لحظه، تعیین نوع مکانیزم ایجاد ریزترک‌ها را داشته به منظور بررسی شکست سنگ از نمونه‌های مکعبی ملات برای انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای استفاده شد.

مراجع

- [7]. E. Azad, M. Ahmadi, "Investigation of rock behavior in cycling loading with B-value parameter," *Sec International Iranian Acoustic & Vibration*, 1391, in Persian.
- [8]. R. V. Sagar, B. K. R. Prasad, and S. S. Kumar, "An experimental study on cracking evolution in concrete and cement mortar by the b-value analysis of acoustic emission technique," *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 8, pp. 1094–1104, Aug. 2012.
- [9]. A. Behnia, H. K. Chai, and T. Shiotani, "Advanced structural health monitoring of concrete structures with the aid of acoustic emission," *Constr. Build. Mater.*, vol. 65, pp. 282–302, Aug. 2014.
- [10]. R. V. Sagar and B. K. R. Prasad, "A review of recent developments in parametric based acoustic emission techniques applied to concrete structures," *Nondestruct. Test. Eval.*, vol. 27, no. 1, pp. 47–68, 2012.
- [11]. R. Ulusay and J. A. Hudson, "The blue book; the complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006," *Comm. Test. methods ISRM. Int. Soc. Rock Mech. (ISRM), Turkish Natl. Group, Ankara, Turkey*, 2007.
- [1]. H. Liu, "Acoustic emission and crack development in rocks," *Univ. Hong Kong*, 2000.
- [2]. A. Farhidzadeh, S. Salamone, B. Luna, and A. Whittaker, "Acoustic emission monitoring of a reinforced concrete shear wall by b-value-based outlier analysis," *Struct. Heal. Monit.*, vol. 12, no. 1, pp. 3–13, Sep. 2012.
- [3]. D. Lockner, "The role of acoustic emission in the study of rock fracture," *Int. J. Rock Mech. Min. ...*, vol. 30, no. 7, pp. 883–889, 1993.
- [4]. S. Hu, J. Lu, and F. Xiao, "Evaluation of concrete fracture procedure based on acoustic emission parameters," *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 1249–1256, Oct. 2013.
- [5]. D. G. Aggelis, "Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters," *Mech. Res. Commun.*, vol. 38, no. 3, pp. 153–157, 2011.
- [6]. D. G. Aggelis, D. V. Soulioti, N. Sapouridis, N. M. Barkoula, A. S. Paipetis, and T. E. Matikas, "Acoustic emission characterization of the fracture process in fibre reinforced concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 11, pp. 4126–4131, 2011.