

بررسی روند شکست مصالح ترد با استفاده از پارامترهای روش انتشار آوایی

مرتضی احمدی
استاد بخش مهندسی معدن
دانشگاه تربیت مدرس
moahmadi@modares.ac.ir

محمدحسین عرب‌نژاد*
کارشناسی ارشد مکانیک سنگ
دانشگاه تربیت مدرس
arabnejad.m.h@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۵/۳۱

چکیده

رفتار مصالح تردی چون سنگ و بتن به دلیل وجود ریزترک‌ها همواره تحت تأثیر می‌باشد و در روند بارگذاری استاتیکی و دینامیکی برخلاف نظریه‌های شکست، رفتارهایی از خود نشان می‌دهند. لذا بررسی مکانیک شکست در این‌گونه مصالح به منظور بررسی سازه مهم می‌باشد. در این مقاله رفتارنگاری شکست بتن به‌عنوان یک سنگ مصنوعی به تشریح روش انتشار آوایی بررسی شده است. برای این منظور، نمونه‌های استوانه‌ای و مکعب مستطیلی بتن با یک طرح اختلاط سیمان و آب به منظور تولید نمونه همگن و ایزوتروپ ساخته شد. از نمونه‌های استوانه‌ای بر اساس استاندارد ISRM مقاومت تک‌محوره و برزلی تعیین شد. با استفاده از روش تحلیلی پارامترهای مختلف امواج آوایی به دست آمده به بررسی شکست نمونه‌های مکعب مستطیلی ترکدار تحت آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای پرداخته شد. با استفاده از تغییرات این پارامترها مواردی چون آغاز روند ایجاد ریزترک، توسعه ناحیه شکست و ترکیب ریزترک‌ها مشخص شد. با روش انتشار آوایی می‌توان رفتارنگاری مراحل نهایی شکست از شکل‌گیری ترک اصلی و رشد آن تا گسیختگی نهایی را برداشت و شناسایی کرد. از نتایج تحقیق اینکه تغییرات پارامترهای انرژی آزاد شده و انرژی آزاد شده در لحظه شکست مشخص نمود که بیشترین میزان انرژی آزاد شده در لحظه شکست بوده و انرژی بعد از شکست اولیه به مراتب کمتر از انرژی لحظه شکست اولیه است که نشان‌دهنده رشد ترک اصلی به واسطه وجود ریزترک‌های موجود در نمونه بوده که مطابق با معیارهای انرژی شکست می‌باشد.

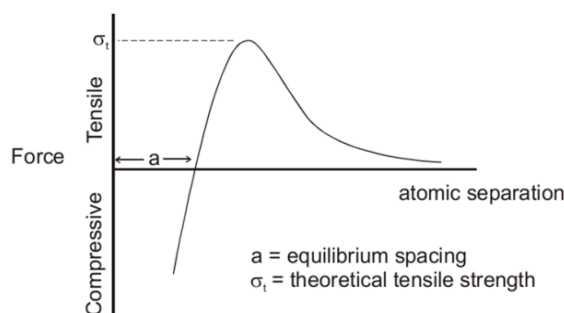
واژگان کلیدی: انتشار آوایی، مکانیک شکست، نمونه مکعب مستطیلی ترکدار بتن، آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای

۱. مقدمه

در نهایت ترک‌ها و شکستگی‌های بزرگ را به وجود می‌آید. براساس نظریه مکانیک شکست ریزترک زمانی به وجود می‌آید که تنش برشی موضعی از میزان مقاومت برشی بیشتر شود. همچنین با افزایش میزان تنش ترک‌های جدید

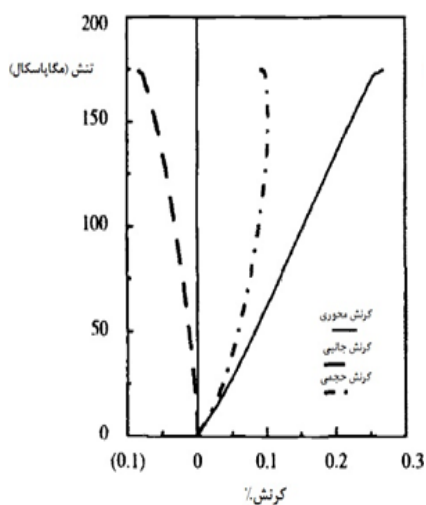
بعضی از سنگ‌ها آنیزوتروپ بوده و مینرالوژی متنوعی دارند. یک سنگ از ترک‌ها، فضاهای خالی و درزه‌ها و دیگر نقص‌ها تشکیل شده است. شکست در سنگ در نتیجه ایجاد، رشد، برهم‌کنش و ترکیب ریزترک‌ها بوده که

به وجود می‌آیند که ناشی از برهم کنش و ترکیب ترک‌های کوچک دیگر می‌باشد. لذا اطلاع از برهم کنش و ترکیب ترک‌ها برای فهم سازوکار شکست در سنگ ضروری می‌باشد [۱]. شکست در سنگ عبارت است از ایجاد جدایش موضعی و تشکیل صفحات جدایش در آن. انرژی لازم جهت شکستن پیوندهای بین ذرات و تشکیل این صفحات جدایش، معرف مقاومت سنگ است؛ لذا مقاومت نظری سنگ می‌تواند به صورت شکل ۱ نشان داده شود [۲].



شکل ۱. نیروی مورد نیاز برای شکست پیوندهای اتمی سنگ در امتداد صفحه شکست [۲]

تحلیل و تقسیم‌بندی کیفی از رشد ریزترک‌ها را با استفاده از نمودار تنش - کرنش و تحلیل مراحل مختلف آن است. این نمودار به صورت شماتیک در شکل ۲ نمایش داده شده است. این روش اطلاعات دقیق و کیفی از مراحل مختلف گسترش ریزترک را فراهم نمی‌کند، بنابراین به نقل از مرجع [۱] استفاده از نمودار کرنش حجمی، که نشانگر حساس‌تری نسبت به گسترش ریزترک است را توصیه نمودند.



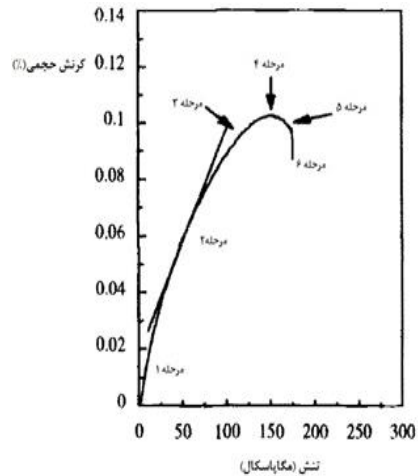
شکل ۲. نمودار تنش - کرنش سنگ تحت بارگذاری [۱]

در شکل ۳ نمودار کرنش حجمی - تنش اصلی ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش تنش، میزان کرنش حجمی نیز افزایش می‌یابد و به میزان حداکثر می‌رسد و بعد از آن کاهش می‌یابد. در مطالعات اخیر توسعه ترک تحت بارگذاری تنش یک‌محوره منحنی کرنش حجمی - تنش به شش مرحله تقسیم‌بندی شده است [۱]، [۳]. مرحله ابتدایی که به صورت غیرخطی (منحنی) است، نشان‌دهنده بسته شدن و رشد ترک‌های موجود در نمونه با جهت‌یافتگی مناسب نسبت به محور بارگذاری می‌باشد. مرحله دوم، که به صورت خطی است، تغییر شکل الاستیک است. مرحله سوم شروع رفتار غیرخطی تغییر شکل الاستیک است که نشان‌دهنده شروع ایجاد ترک می‌باشد.

با توجه به شکل ۱ با اعمال تنش بر نمونه، فاصله تعادلی میان اتم‌های سنگ افزایش می‌یابد تا اینکه مقدار تنش با مقدار تنش بحرانی برابر شود. در این حالت فاصله بین اتمی بدون افزایش در مقدار تنش افزایش می‌یابد. این نقطه معرف نقطه شکست و مقدار تنش بحرانی معرف مقاومت نظری (σ_t) سنگ می‌باشد. براساس بررسی‌های صورت گرفته می‌توان گفت این مقاومت ذاتی تابعی از مدول یانگ ماده مطابق رابطه ۱ است.

$$\sigma_t \cong \frac{E}{2\pi} \quad (1)$$

در اینجا نیز مقادیر محاسبه شده برای مقاومت ذاتی سنگ با نتایج حاصل از آزمایش‌ها اختلاف قابل تأملی دارد که اهمیت تشریح سازوکار شکست در سنگ‌ها و بررسی علل این اختلافات را که به نوعی با وجود میکروتُرک‌ها و گسترش آنها در سنگ در ارتباط است روشن می‌کند [۲]. از جمله روش‌های مرسوم و قدیمی بررسی روند شکست،



شکل ۳. نمودار تنش - کرنش حجمی [۱]

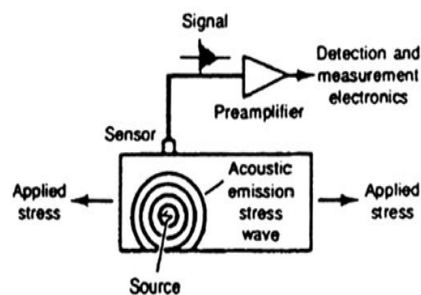
مختلف بارگذاری و رشد ترک منجر به شکست روش های مستقیم و غیرمستقیم مختلفی استفاده می شود. متداول ترین روش رفتارنگاری ریزترکها استفاده از میکروسکوپهای نوری است [۱]. اما این روش مقطع مشخصی را بررسی می کند و تغییرات در حین باربرداری و توسعه ترک را نشان نمی دهد. عدم مشخص کردن پارامترهایی چون تعداد ترکها، نوع و نرخ رشد را نمی توان در این روش به دست آورد و عیب اصلی آن بررسی قسمت کوچکی از نمونه است و درک درستی از کل نمونه را ارائه نمی نماید. همچنین برای بررسی رشد ترک کاربرد ندارد. چندین روش غیرمستقیم برای بررسی رشد ترک و برهم کنش آنها توسعه داده شده است. روش انتشار اکوستیک^۱، که یک روش برداشت همزمان است، برای بررسی ایجاد و رشد ترک مورد استفاده قرار گرفته است. این روش با استفاده از امواج منتشرشده در حین تغییر شکل، کاربردی و توسعه داده شده است. با استفاده از اطلاعات حاصل از این روش می توان تغییرات این پارامترها را مطابق خصوصیات تنش - کرنش هر مرحله از بارگذاری و شکست در حین آزمایش به دست آورد. در این مقاله با بهره گیری از روش انتشار آوایی به بررسی روند شکست سنگ ترد پرداخته شده است. از بتن، که یک سنگ مصنوعی است و ساخت نمونه آن آسانتر از سنگ است، استفاده شده است. نمونه های بتنی که نشان دهنده مواد با رفتار ترد و شکننده اند و با استفاده از پارامترهای آوایی مراحل مختلف گسترش ترک در کنار روند تنش و کرنش مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

۲. روش انتشار آوایی

به طور کلی وقتی سنگها تحت تنش قرار می گیرند، میکروتترکهایی در آنها ایجاد می شود. شروع و گسترش این میکروتترکها سبب ایجاد صدا می شود. به این پدیده انتشار آوایی گفته می شود. از این پدیده در علوم گوناگون استفاده های متعددی می شود که از آن جمله می توان به بحث تخمین تنش برجا در علم مکانیک سنگ (مهندسی

در مرحله سوم با افزایش تنش، کرنش حجمی افزایش می یابد و به حداکثر مقدار خود می رسد و سپس کاهش می یابد. ناحیه انتقال، جایی که کرنش حجمی ثابت می ماند، مرحله چهارم است. در مرحله چهارم و با افزایش سطح تنش می باشد که ترکهای جدید ایجاد شده با برهم کنش و ترکیب با یکدیگر منجر به ایجاد مناطق ترک خورده فعال و نواحی با تمرکز تنش موضعی درون نمونه می شود. در مرحله پنجم با افزایش تنش، کرنش حجمی کاهش می یابد و رفتار نمونه تابعی از رفتار ترکها و جابه جایی آنها بوده و کرنش متمرکز شده، نهایتاً منجر به شکل گیری ترکهای بزرگ می گردد. این ترکها از میزان تنش ۹۵ درصد تنش نهایی شکست رخ می دهند. مرحله ششم مطابق تنش حداکثر، ناحیه بعد از تسلیم را به وجود می آورد و با کنترل بارگذاری سنگهای شکننده، شدت شکست بعد از رسیدن به میزان حداکثر تنش که منتج از مقاومت تک محوری فشاری است، می توان رفتار بعد از شکست را به دست آورد. در بین این شش مرحله، مراحل ۳، ۴ و ۵ در شکل گیری ترکهای جدید، رشد و ترکیب آنها نقش مهمی دارند. کاملاً مشخص است که با استفاده از نمودار تنش - کرنش اطلاعاتی در مقیاس بزرگ و کیفی از روند شکست ایجاد می گردد و دریافت اطلاعاتی از هر مرحله بارگذاری و رشد ترک مشکل می باشد. بنابراین برای پی بردن به تأثیر مراحل

سنگ) اشاره کرد. انتشار آوایی، حرکات ناگهانی امواج الاستیک با فرکانس بالا است که توسط شکست محلی (مانند ریزترک‌ها) در سنگ ایجاد می‌شود. در شکل ۴ نمایی شماتیک از پایه و اساس عملکرد روش انتشار آوایی نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به محض رشد ترک نمونه از خود امواج صوتی ساطع می‌کند. حسگرهای دستگاه انتشار آوایی این امواج را دریافت و به دستگاه ارسال می‌کنند و این رخدادها را می‌توان به صورت برخط در رایانه مشاهده کرد.



شکل ۴. پایه و اساس عملکرد روش انتشار آوایی [۴]

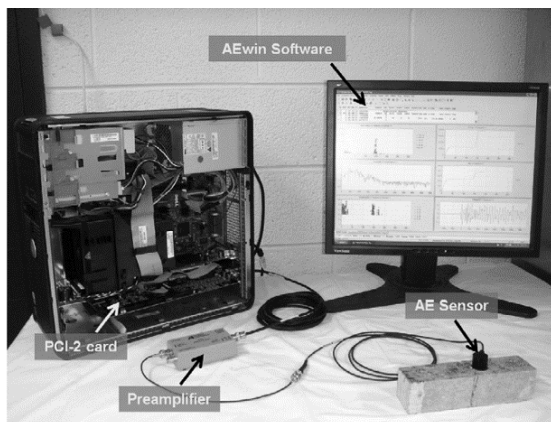
۳. مطالعه مکانیک شکست به کمک انتشار آوایی

امروزه از روش انتشار صوت (آوایی) به‌طور گسترده‌ای برای مطالعه شکست داخلی مواد و سازه‌ها، استفاده می‌شود. تکنیک غیرمخرب^۲ انتشار صوتی، سیگنال‌های ساطع شده حاصل از تغییر شکل یا شکست مواد تحت بارگذاری بحرانی را شناسایی و تحلیل می‌کند [۴]. در سال‌های اخیر مطالعه سازوکار شکست در نمونه‌های سنگی و بتنی توسط سیستم انتشار آوایی توسط محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفته است [۵-۸]. در این مقاله نیز از این سیستم برای مطالعه رفتار شکست نمونه‌های سنگی و شبه‌سنگی ساخته شده در طول آزمایش استفاده شده است. در شکل ۵ قسمت‌های مختلف دستگاه انتشار آوایی همچون حسگر^۳ جهت دریافت امواج، پیش‌تقویت‌کننده‌ها^۴ جهت تقویت امواج دریافتی و سیستم ثبت داده‌ها نمایش داده شده است. در ادامه به برخی از اصطلاحات استفاده شده در انتشار آوایی اشاره می‌شود [۴]:

شمارش^۵: تعداد پالس‌های عبوری از حد آستانه که توسط پردازشگر سیگنال انتشار آوایی دریافت می‌شود. زمان تناوب^۶: فاصله زمانی ورود و خروج سیگنال اکوستیک به آستانه
دامنه^۷: بالاترین دامنه‌ای که توسط انتشار آوایی به دست می‌آید و برحسب ولت یا دسی‌بل بیان می‌شود.
زمان اوج^۸: مدت زمانی که سیگنال انتشار آوایی از حد آستانه گذشته تا به دامنه حداکثر برسد (برحسب ثانیه یا میکروثانیه).

حد آستانه^۹: سطح ولتاژی که پالس‌های بالاتر برای یافتن تحریکات انتشار آوایی در نظر گرفته می‌شوند.
انرژی^{۱۰}: انتگرال سیگنال نسبت به زمان یا سطح زیر منحنی سیگنال نسبت به زمان
فرکانس متوسط^{۱۱}: تعداد رویداد به دروه تناوب را فرکانس متوسط می‌نامند [۵].

در شکل‌های ۶ و ۷ پارامترهای انتشار آوایی در یک رویداد و سایر موارد ذکر شده نمایش داده شده‌اند.

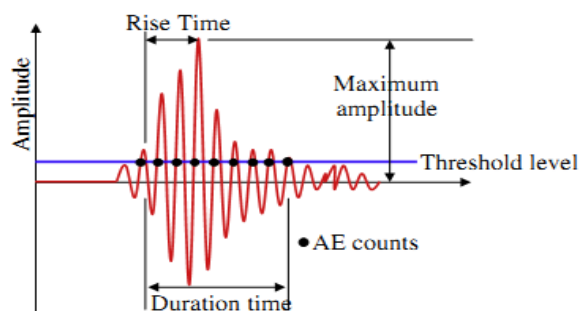


شکل ۵. بخش‌های متنوع دستگاه انتشار صوتی [۴]

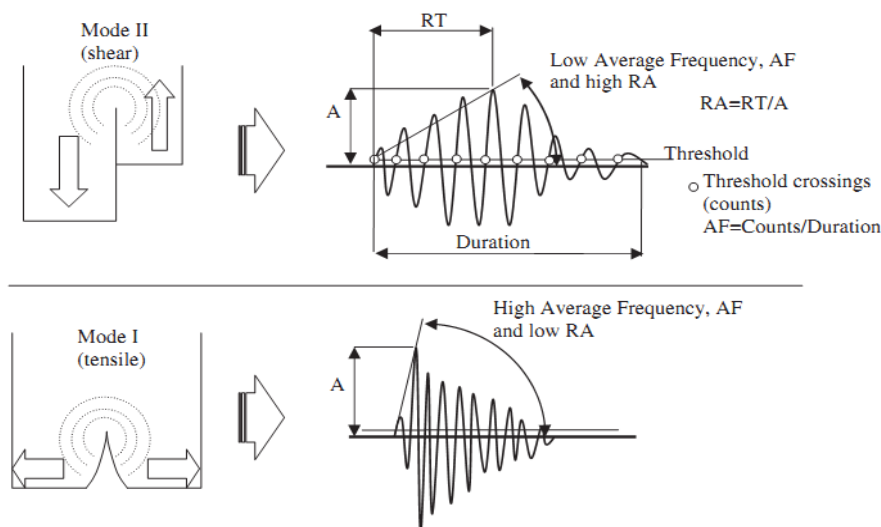
طبقه‌بندی نوع کانت‌های تولیدی در آزمایش‌های مکانیک شکست سنگ و بتن موضوعی است که به‌تازگی مورد توجه محققان قرار گرفته است. آگلیز^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۱) طی مطالعات گسترده‌ای، پارامترهای مختلف انتشار آوایی را برای مراحل مختلف شکست بتن بررسی کرده‌اند [۸]. در حین بررسی‌های مکانیک شکست توسط روش انتشار آوایی

مرتبط با سازوکار رخدادهای آوایی است، مطالعات مؤثری انجام نشده است. در این مقاله، به منظور بررسی تغییر پارامترهای دیگر روش انتشار آوایی نمونه‌های مکعبی برای انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه روند انجام آزمایشات و تحلیل‌های پارامتری آوایی تشریح می‌گردد.

دو پارامتر هیت و کانت که بیانگر تعداد رخدادهای آوایی و منعکس‌کننده ریزترک‌های به وجود آمده در نمونه به واسطه اعمال بار بوده پرداخته شده است و در رابطه با پارامترهای دیگری چون انرژی آزاد شده آوایی در حین بارگذاری و انرژی آزاد شده در لحظه شکست، که بیانگر انرژی آزاد شده توسط ریزترک‌های به وجود آمده و همچنین تغییرات پارامترهای دامنه امواج آوایی و زمام اوج و دوام امواج، که



شکل ۶. پارامترهای انتشار آوایی در یک رویداد [۵]



شکل ۷. منابع انتشار آوایی به همراه شکل موج معادل (برشی و کششی) [۶]

۴. مواد آزمایش

نمونه‌های همگن و ایزوتروپ ساخته شد. سپس براساس استاندارد ISRM به منظور استخراج پارامترهای فیزیکی و مقاومتی طرح اختلاط مورد نظر آزمایش‌ها به منظور تعیین مقاومت تک‌محوره و برزلی نمونه‌ها انجام گرفت [۹].

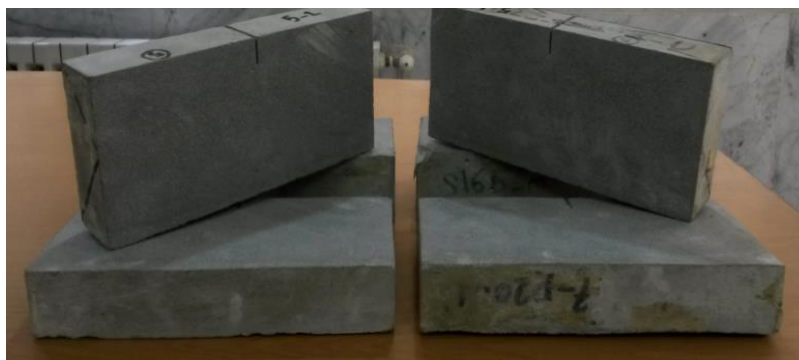
در مطالعه حاضر به منظور رفتارنگاری شکست و بررسی پارامترهای مختلف آن با استفاده از روش انتشار آوایی پرداخته شد. بدین منظور در ابتدا نمونه‌های شبه‌سنگی با توجه به یک طرح اختلاط سیمان و آب به منظور تولید

جدول ۱ طرح اختلاط نمونه‌های ساخته شده و پارامترهای مقاومتی آنها را نشان می‌دهد. نمونه‌ها مورد استفاده در ابعاد (با توجه به استاندارد) $80 \times 100 \times 200$ میلی‌متر ساخته شد و حسگرهای آوایی در فواصل چهار سانتی‌متر از مرکز نمونه‌ها در دو سمت نمونه برای پوشش رشد ترک مرکزی و جلوگیری از تأثیر پدیده میرایی موج در مواد با رفتار ترد قرار داده شد. در شکل‌های ۸ و ۹ نیز ابعاد نمونه‌ها و موقعیت قرارگیری حسگرها روی نمونه نمایش داده شده

است. در مرحله بارگذاری نمونه‌های مورد آزمایش با استفاده از دستگاه بارگذاری^{۱۴} و با نرخ 0.2 میلی‌متر بر دقیقه با نصب حسگرهای آوایی روی نمونه‌ها انجام شد و داده‌های پارامترهای آوایی اعم از دامنه، دوام موج، فرکانس و دیگر پارامترهای مهم با استفاده از دستگاه انتشار آوایی به دست آمد. حسگرهای مورد استفاده دارای پهنای باند فرکانس 100 کیلوهرتز بوده و با در نظر گرفتن حد آستانه 13 هرتز برداشت صورت گرفته است.

جدول ۱. پارامترهای نسبت طرح اختلاط و پارامترهای مقاومتی این طرح اختلاط

زاویه اصطکاک	چسبندگی	مدول یانگ	مقاومت برزیلی	مقاومت فشاری تک‌محوره	وزن مخصوص	نسبت آب به سیمان	وزن حجمی سیمان
۳۰ درجه	۹/۶۲ مگاپاسکال	۱۸/۳ گیگاپاسکال	۳/۷۲ مگاپاسکال	۴۷/۵ مگاپاسکال	۲/۲۵۸	۰/۳۵	۸۷۵ کیلوگرم بر متر مربع



شکل ۸. نمونه‌های به‌کار رفته به‌منظور انجام آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای و انتشار آوایی



شکل ۹. انجام آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای و برداشت هم‌زمان داده‌های آوایی توسط حسگرها

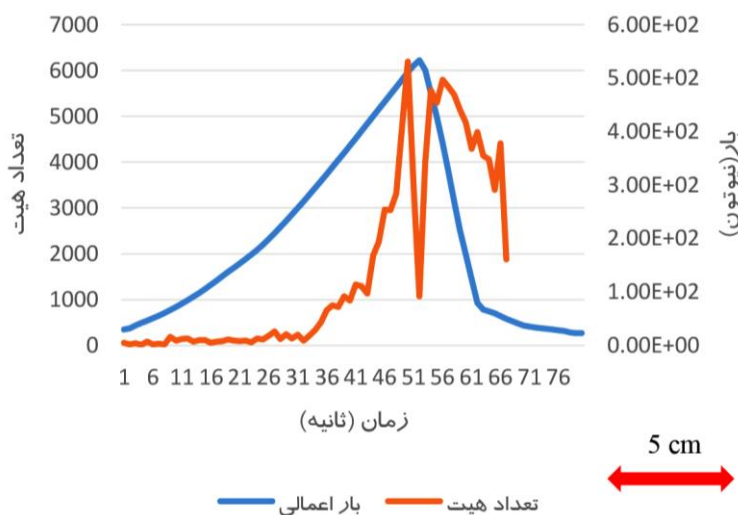
در بررسی انتشار آوایی، روش‌های تحلیلی متفاوتی مربوط به شکست وجود دارد. یکی از موارد پرکاربرد آن تحلیل تغییرات پارامترهای آوایی در حین روند شکست است. از این تحلیل در بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در مکانیک شکست مصالح به‌عنوان مثال بررسی پارامترهای ذاتی مواد مثل تخلخل و هموزنتی، تأثیر تقویت‌کننده‌ها در بتن، تأثیر فرایندهای شیمیایی روی مقاومت سنگ، بتن و جز این‌ها می‌توان استفاده نمود. پارامترهای مختلف داده‌های آوایی در این روش تحلیلی می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. پارامترهایی مثل هیت و کانت که نشان‌دهنده تعداد رخدادهای آوایی و ایجاد ریزترک‌هاست. برای بررسی میزان سطح خسارت در مراحل مختلف بارگذاری و بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر در مقاومت مصالح تا پارامترهایی مثل انرژی آزادشده در حین روند شکست در مراحل مختلف بارگذاری که به‌خوبی منعکس‌کننده خصوصیات مقاومتی و چقرمگی مواد می‌باشد. پارامتر دوام موج و زاویه اوج که به‌طور ویژه نشان‌دهنده روند ترکیب ریزترک‌ها یا به‌عبارت دیگر شکل‌گیری ترک‌های بزرگ است، سازوکار غالب در شکست مصالح مختلف را با این دو پارامتر و تغییرات آنها تجزیه و تحلیل نمود. تحلیل‌های صورت‌گرفته در این روش بر مبنای تغییرات پارامترهای مختلف در طول روند بررسی استوار است و در مواردی معیارهایی برای مواد خاص براساس تغییرات پارامترهای مختلف توسط محققان مختلف ارائه شده است. براساس آزمایشات انجام‌شده روی نمونه‌های مکعبی آزمون خمش سه‌نقطه‌ای داده‌های مختلف آوایی استخراج گردید و این داده‌ها براساس زمان انجام آزمایش ترسیم شد. در کنار این نمودارها نمودار تغییرات نیروی اعمالی برحسب زمان نیز از داده‌های به‌دست آمده از دستگاه بارگذاری استخراج و ترسیم شد تا بتوان براساس تغییرات بار و داده‌های مختلف آوایی برحسب زمان تحلیل‌های اجمالی در شکست نمونه‌ها تحت خمش سه‌نقطه‌ای انجام داد. در مجموع تعداد ۱۲ آزمون خمش سه‌نقطه‌ای روی نمونه‌های ساخته‌شده انجام شد و با توجه

به روند مشابه در تغییرات پارامترهای آوایی مورد استفاده در نمونه‌های مورد آزمایش، تحلیل‌ها و نمودارهای نمونه شماره ۵ ارائه شد. نمودار شکل ۱۰ تغییرات هیت در کنار نمودار نیروی اعمال‌شده برحسب زمان روی نمونه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که به‌وضوح مشاهده می‌شود، روند ایجاد ریزترک‌ها از درصدی از نیروی اعمالی (۵۰ درصد نیروی نهایی اعمال‌شده) روند صعودی دارد و پیش از شکست نهایی به حداکثر تعداد رخداد ایجادشده می‌رسد و این به‌معنای روند مداوم ایجاد ریزترک‌ها در نمونه تحت بارگذاری می‌باشد. شیب نمودار هیت تولیدی در ۸۵ درصد نیروی نهایی اعمال‌شده بسیار زیاد است که نشان‌دهنده تمرکز تولید ریزترک‌ها و روند بالای ایجاد ریزترک‌ها در نمونه است و چون نمونه‌ها دارای یک ترک مرکزی اولیه می‌باشند و تمرکز تنش در نوک ترک اولیه و ناحیه تخریب جلوی این ترک می‌باشد، شیب بالای نمودار هیت تولیدی در نتیجه توسعه ناحیه شکست و ترکیب ریزترک‌ها در این ناحیه می‌باشد.

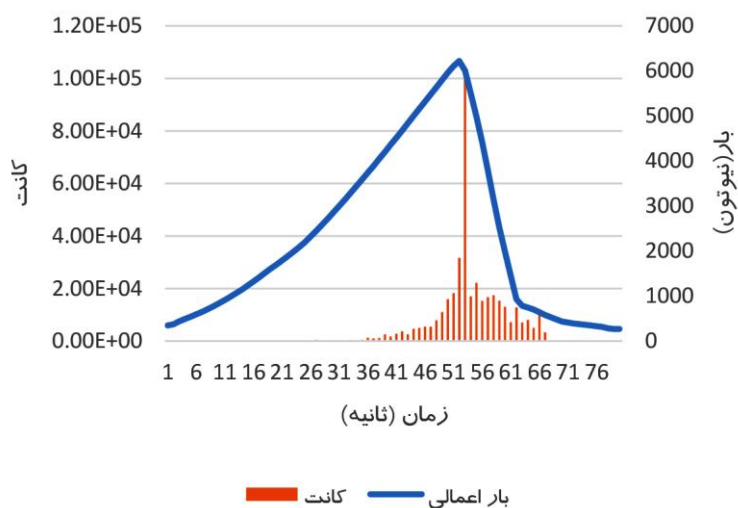
در لحظه شکست به‌دلیل غالب‌شدن ترک اصلی شکست اولیه نمونه با ایجاد رخدادی با فرکانس بالا می‌باشد و در نتیجه کاهش لحظه‌ای در هیت‌های دریافتی به‌خوبی مشاهده می‌گردد. میزان رخدادهای، که نشان‌دهنده ایجاد ریزترک‌ها با یک میزان فرکانس معین که توسط این روش بررسی شده، کاهش را نشان می‌دهد. در این لحظه رخداد شکست در نوک ترک اولیه رخ می‌دهد که دارای فرکانس بالایی می‌باشد و بعد از آن ریزترک‌های درون ناحیه شکست نوک ترک رخدادهای آوایی دیگری را ایجاد می‌کند که این روند تا گسیختگی کامل نمونه ادامه می‌یابد. شیب بالای نمودار هیت ایجادشده بعد از حداکثر بار اعمالی نشان‌دهنده توسعه ناحیه شکست و رشد مداوم ترک اصلی تا گسیختگی نهایی نمونه است که با توجه به روند نیروی اعمالی قابل توجه می‌باشد. پارامتر دیگر در رابطه با ایجاد ریزترک‌ها و رخدادهای آوایی، نمودار تغییرات کانت برحسب زمان است که اگر در کنار نمودار بار - زمان قرار

در لحظه شکست که رخدادهای با انرژی بالایی در نوک ترک اولیه ایجاد می‌گردد، تعداد کانت بالایی حاصل می‌گردد. این میزان تعداد کانت ناشی از همان رخداد بزرگ شکست نمونه از ترک اولیه است. بعد از این لحظه تا گسیختگی کامل نمونه که رخدادها مربوط به ترکیب ریزترک‌ها، توسعه ناحیه شکست و رشد ترک اصلی می‌باشد روند کانت‌ها روند تقریباً مشخص و تا حدودی ثابت دارد که نشان‌دهنده رشد پایدار ترک اصلی و شکست نمونه است.

گیرد، می‌توان روند شکست و رخدادهای بزرگ و کوچک را بررسی نمود. همان‌گونه که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، تعداد کانت‌ها در حدود حد مشخصی از میزان نیروی اعمالی (۸۰ درصد نیروی نهایی اعمالی) روند صعودی به‌خود می‌گیرد که نشان‌دهنده ایجاد رخداد‌های بزرگتری از لحاظ دوام موج و در نتیجه انرژی بالاتر می‌باشد. این افزایش در نتیجه تولید رخداد‌هایی ناشی از ترکیب ریزترک‌های کوچک و ایجاد ترک‌های بزرگتر و توسعه ناحیه شکست جلوی ترک اولیه می‌باشد. این روند صعودی تا لحظه شکست و غالب‌شده شکست اصلی ادامه می‌یابد



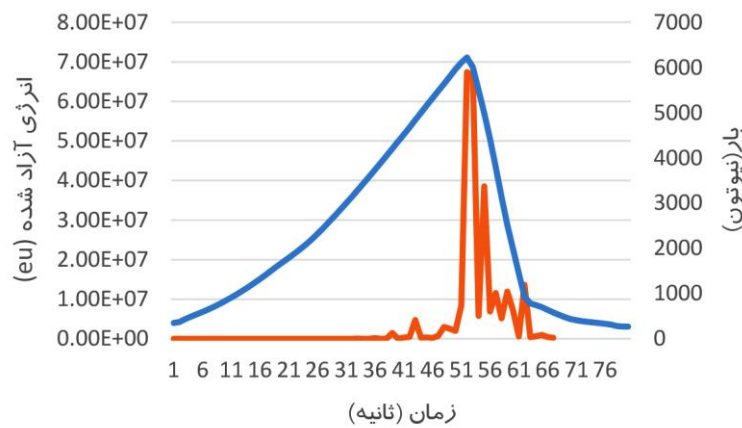
شکل ۱۰. نمودار بار - زمان و هیت - زمان نمونه شماره ۵ (ترک مرکزی)



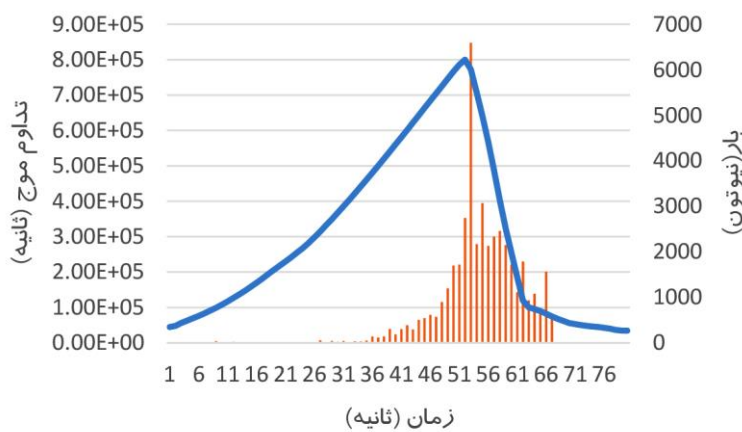
شکل ۱۱. نمودار بار - زمان و کانت - زمان نمونه شماره ۵ (ترک مرکزی)

پارامتر دیگری که در روند شکست تغییرات آن قابل بررسی است و با استفاده از آن روابط و مطالعات گسترده‌ای در رابطه با چقرمگی و شکست نمونه‌های مختلف انجام گرفته است، پارامتر انرژی آزاد شده منتج از رخدادهای آوایی است. همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، روند انرژی آزاد شده در لحظه شکست بالاترین میزان انرژی آزاد شده را دارد. این انرژی در رابطه با آغاز شکست از نوک ترک اولیه ایجاد شده می‌باشد و کاملاً مرتبط با توسعه ناحیه شکست و ترکیب‌ها بوده و می‌توان با استفاده از آن معیار شکستی براساس انرژی شکست برای مصالح مختلف ارائه داد. این

کار منوط به بارگذاری دوره‌ای روی سری‌های مختلف از نمونه‌ها مورد نظر می‌باشد. بعد از لحظه شکست و با رشد ترک اصلی تا گسیختگی کامل انرژی آزاد شده روند نزولی داشته و این نشان‌دهنده رشد پایدار ترک اصلی و همگن و هموزن بودن نمونه است که مانعی برای رشد ترک در مسیر آن وجود نداشته است. رشد پایدار ترک و توسعه ناحیه شکست در حین روند شکست به صرف انرژی کمتر به دلیل وجود ریزترک‌های از قبل ایجاد شده در مسیر گسترش ترک نیاز دارد که مطابق مطالعات گذشته در این زمینه می‌باشد.



شکل ۱۲. نمودار بار - زمان و انرژی - زمان نمونه شماره ۵ (ترک مرکزی)



شکل ۱۳. نمودار بار - زمان و دوام موج - زمان نمونه شماره ۵ (ترک مرکزی)

در رابطه با پارامتر دوام موج که نشان‌دهنده رخدادهایی با تداوم زمانی بالاتر می‌باشد، نشان‌دهنده رخداد‌های بزرگتر از لحاظ انرژی آزاد شده و بزرگ‌بودن ریزترک می‌باشد. همان‌گونه که شکل ۱۳ مشخص شده است، از مقداری از نیروی اعمال شده (۷۵ درصد) رخداد‌های بزرگتری ایجاد می‌شود. این افزایش در دوام موج مرتبط با ترک ریزترک‌ها و رشد این ریزترک‌ها و توسعه ناحیه شکست مقابل ترک اولیه است. در لحظه شکست با غالب‌شدن ترک اصلی بیشترین میزان دوام موج حاصل می‌شود. این حداکثر دوام موج منتج از رخدادی است که در آن شبکه‌ای از ریزترک‌ها با به هم پیوستن سبب رشد ناحیه شکست و در نتیجه آغاز شکست نمونه می‌گردد. بعد از لحظه شکست نیز دوام موج میزان بالایی را نشان می‌دهد که مستقیماً با رشد ترک اصلی و توسعه ناحیه شکست تا گسیختگی کامل نمونه مرتبط است. تغییرات دو پارامتر انرژی و دوام موج تقریباً مشابه می‌باشد. این تشابه به دلیل ارتباط این دو پارامتر با روند ترکیب ریزترک‌ها و توسعه ناحیه شکست و رشد ترک اصلی است. این در حالی است که دو پارامتر هیت و کانت ایجاد ریزترک‌ها را منعکس می‌کند.

۶. نتیجه‌گیری

بررسی و شناخت عوامل مؤثر بر شکست مصالح تردی چون سنگ و بتن در طراحی‌های مهندسی از جمله موارد الزامی است. رفتارنگاری شکست و آگاهی از تغییرات آن می‌تواند در جلوگیری از شکست‌های بزرگ و ایجاد خسارات مالی و جانی کمک شایانی داشته باشد. در این مقاله با بررسی مراحل مختلف شکست در مصالح ترد مثل

۷. مأخذ

سنگ با تشریح روش انتشار آوایی، که روشی نوین است و به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد اخیراً در بررسی مکانیک شکست مواد در رشته‌های گوناگون بسیار مورد توجه قرار گرفته، پرداخته و با استفاده از تحلیل پارامترهای مختلف حاصل از رفتارنگاری این روش در حین انجام آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای نمونه‌های شبه‌سنگی ساخته شده، به بررسی تغییرات این پارامترها در حین روند شکست پرداخته شد. در این مقاله از پارامترهای هیت و کانت، که معرف تعداد ریزترک‌های ایجاد شده در حین روند بارگذاری هستند، استفاده و مشخص شد که ایجاد ریزترک‌ها تقریباً در میانه حدود رفتار الاستیک سنگ به وقوع می‌پیوندد. حدود ۸۵ درصد بار نهایی شیب نمودار هیت و کانت تولیدی بسیار زیاد بود که نماینده توسعه ناحیه شکست و ترکیب ریزترک‌ها و تولید ترک‌های بزرگ و رشد آنها می‌باشد. تغییرات پارامترهای انرژی آزاد شده و انرژی آزاد شده در لحظه شکست نشان داد که بیشترین میزان انرژی در لحظه شکست می‌باشد و انرژی بعد از شکست اولیه به مراتب کمتر از انرژی لحظه شکست است که نشان‌دهنده رشد ترک اصلی به واسطه وجود ریزترک‌های موجود در نمونه و مطابق با معیارهای انرژی شکست موجود می‌باشد. تغییرات پارامتر دوام موج نشان می‌دهد که از ۷۵ درصد بار نهایی اعمالی رخداد‌های از لحاظ دوام بیشتر که دارای انرژی و دامنه بیشتر و زمان اوج کوتاه‌ترند بیشتر در نمونه ایجاد می‌گردد که نشان‌دهنده ایجاد ترک‌هایی با سازوکار برشی در نمونه تحت بارگذاری خمشی می‌باشد. همچنین ترکیب ریزترک‌ها و ایجاد شبکه‌ای از ریزترک‌ها منجر به ایجاد رخداد‌هایی با دوام موج بالاتر می‌گردد.

[1] Rao, G., C. Murthy, N. Raju. "Characterization of micro and macro cracks in rocks by acoustic emission." *Acoust. Emiss. Stand.*, 1999, pp. 141–155.

[2] Lawn, B., *Fracture of Brittle Solids*, Cambridge University, 1993.

[3] Lockner, D. "The role of acoustic emission in the study of rock fracture." *Int. J. Rock Mech. Min.*, Vol. 30, No. 7, 1993, pp. 883-889.

- [4] Dai, Q., K. Ng, J. Zhou, E. L. Kreiger, T. M. Ahlborn. "Damage investigation of single-edge notched beam tests with normal strength concrete and ultra high performance concrete specimens using acoustic emission techniques." *Constr. Build. Mater.*, Vol. 31, 2012, pp. 231-242.
- [5] Ohno, K., M. Ohtsu. "Crack classification in concrete based on acoustic emission." *Constr. Build. Mater.*, Vol. 24, No. 12, 2010, pp. 2339-2346.
- [6] Aggelis, D. G., D. V. Soulioti, N. M. Barkoula, A. S. Paipetis, T. E. Matikas. "Influence of fiber chemical coating on the acoustic emission behavior of steel fiber reinforced concrete." *Cem. Concr. Compos.*, Vol. 34, No. 1, 2012, pp. 62-67.
- [7] Soulioti, D., N. M. Barkoula, A. Paipetis, T. E. Matikas, T. Shiotani, D. G. Aggelis. "Acoustic emission behavior of steel fibre reinforced concrete under bending." *Constr. Build. Mater.*, Vol. 23, No. 12, 2009, pp. 3532-3536.
- [8] Aggelis, D. G. "Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters." *Mech. Res. Commun.*, Vol. 38, No. 3, 2011, pp. 153-157.
- [9] Ulusay, R., 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.

پی نوشت

-
1. acoustic emission
 2. nondestructive technique
 3. sensor
 4. preamplifier
 5. count
 6. duration
 7. amplitude
 8. rise time
 9. threshold
 10. energy
 11. average frequency
 12. Aggelis
 13. Hit
 14. Instron