

بررسی رابطه طول ترک و پهنای باند فرکانسی ساطع شده از

نمونه سنگ تحت تنش

سید امین موسوی جد

دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، بخش

معدن، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت

مدرس

mousavi@modares.ac.ir

مرتضی احمدی*

گروه مکانیک سنگ، بخش معدن، دانشکده فنی

و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس

moahmadi@modares.ac.ir

زیبا ابراهیمیان

شرکت ره کاو هوشمند بایا، مرکز نوآوری هاب

اصفهان

Ziba.ebrahimiyan@rahkavbaya.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۳

چکیده

اعمال فشار بر سنگ منجر به ایجاد ترک‌های جدید و یا گسترش ترک‌های موجود می‌شود. این امر باعث ایجاد و انتشار امواج صوتی می‌شود. با تحقیق بر روی این امواج، رشد و توسعه ترک بررسی و زمان شکست نهایی نمونه قابل پیش‌بینی است. برای مطالعه این سیگنال‌ها، از روش نشر آوایی استفاده می‌شود. در این روش نمونه سنگ که در اطراف آن تعدادی سنسور قرار دارد بارگذاری می‌شود. سپس در طول آزمایش، سیگنال‌های ساطع شده توسط سنسورها ثبت می‌شوند. با جمع‌آوری و تحلیل این سیگنال‌ها می‌توان در خصوص گسترش ترک مطالعه نمود. در این تحقیق، پهنای باند فرکانسی امواج ساطع شده از سنگ تحت بارگذاری فزاینده بررسی شده است، و از داده‌های به‌دست آمده از یک آزمایش استفاده شد. نمونه سنگ گرانیته به ابعاد $1 \times 3 \times 6$ اینچ تحت بارگذاری تک محوره تا زمان رسیدن به شکست نهایی قرار گرفته و سیگنال‌های صوتی جمع‌آوری شد. برای تحلیل داده‌ها از برنامه متلب بهره گرفته و برای تحلیل سیگنال‌ها از تبدیل موجک استفاده شد. پهنای باند فرکانسی و فرکانس مرکزی سیگنال‌های دریافتی تعیین شد. تحلیل‌ها مشخص نمود که با گذشت زمان و رسیدن به نقطه شکست نهایی پهنای باند فرکانسی سیگنال‌ها و همچنین فرکانس مرکزی آنها کاهش می‌یابد. کاهش پهنای باند فرکانسی خود مبین آن است که با رسیدن به شکست نهایی سنگ، طول ترک‌های ایجاد شده و یا طول قسمت‌های رشد یافته ترک‌های قبلی افزایش می‌یابد. این امر، نتایج تئوریک به‌دست آمده در تحقیقات قبلی را به‌صورت آزمایشگاهی تأیید می‌کند.

واژگان کلیدی: نشر آوایی در سنگ، طول ترک، تبدیل موجک، پهنای باند فرکانسیو طول ترک

۱. مقدمه

می‌باشد و کاربردهای مختلفی برای این روش مشخص شده است که از آن جمله می‌توان به بررسی تغییرات نمونه سنگ تحت تنش اشاره کرد. امواج ساطع شده در اثر تغییر شکل

امروزه روش نشر آوایی^۱ یکی از روش‌های غیرمخرب برای بررسی تغییرات کیفیت جامدات و بررسی ساختار درونی آنها

در سنگ به منظور مکانیزم تغییر شکل مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

هدف بسیاری از این مطالعات تعیین مشخصات منبع موج است. لذا یافتن ارتباطی میان مشخصات موج ساطع شده از سنگ با ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن سنگ، موضوع بسیاری از مطالعات است در یکی از اولین مطالعات، کایزر^۱ دریافت که هرگاه نمونه سنگ تحت تنش قرار گیرد، با گذشتن شدت تنش از یک میزان مشخص، پالس‌های صوتی از سنگ ساطع می‌شود [۱].

کایزر نتیجه گرفت که این حد شدت تنش، در واقع بیشترین شدت تنشی بوده که نمونه سنگی تحت آزمایش، قبلا در تاریخچه خود تجربه کرده است. به عبارت دیگر در یک بارگذاری سیکی فزاینده، مادامی که بار در یک سیکل، به سطح بیشینه بارگذاری در سیکل‌های قبلی نرسیده باشد، هیچ رخداد صوتی از نمونه ساطع نخواهد شد. این نتیجه در آن زمان، پیشرفت مهمی در این راستا محسوب می‌شد و بعدها "اثر کایزر"^۳ نام گرفت [۱].

تئوری کایزر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفت. در همین راستا، کاستین، و آشبای، در پژوهش‌های جداگانه درباره آسیب‌های غیرقابل بازگشت به سنگ، نتیجه گرفتند که می‌توان با استفاده از اثر کایزر درباره میزان آسیب‌های داخلی سنگ اظهار نظر کرد [۲، ۳]. کاستین و هولکامب با فرض غیر قابل بازگشت بودن آسیب‌ها در سنگ، از اثر کایزر نتیجه گرفتند که تنها زمانی آسیب جدید قابل توجه در سنگ رخ خواهد داد که شدت تنش در سنگ از حالت بیشینه تنش قبلی فراتر رود [۴].

البته صحت اثر کایزر در همه موارد قابل اثبات نخواهد بود. به عنوان مثال، استی و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی وستریلی گرانیت^۴ مشاهده کردند که در یک بارگذاری سیکی، انتشارات صوتی در سطوح تنش بسیار پایین‌تر از سطوح تنش سیکل‌های پیشین شروع می‌شود [۵].

نوردلند و لی در یک پژوهش مشابه به نوعی اثر کایزر را در آزمایش‌های جداگانه مورد اعتبار سنجی قرار دادند [۶]. آنها دریافتند که در بارگذاری سیکی روی گرانیت درشت دانه، در محدوده مشخصی از بارگذاری اثر کایزر دیده می‌شود.

این درحالی است که برای یک نمونه لپتیت ریزدانه، انتشار صوتی در سطوحی بسیار کمتر از حد تنش سیکل‌های قبلی شروع به انتشار می‌یابند. آنها نتیجه گرفتند که میزان صحت اثر کایزر بستگی به شرایط آزمایش شامل شرایط بارگذاری، جنس نمونه، شامل کانی‌شناسی، اندازه دانه‌بندی و میزان تخلخل دارد.

میکروتورک‌های موجود در ساختار سنگ، به دلایل مختلفی ممکن است به وجود آمده باشند. یکی از دلایل آن مکانیکی بوده و به واسطه اعمال تنش است. ایجاد این ترک‌های ریز^۵ با انتشار سیگنال صوتی همراه خواهد بود. مطالعه این سیگنال‌ها نشان داده که بین نشر آوایی حاصل از ترک در سنگ و امواج لرزه‌ای ارتباط وجود دارد [۷].

موج‌های لرزه‌ای توسط حرکت ناپیوستگی‌ها ایجاد می‌شوند و ویژگی‌های فرکانسی آنها در تحقیقات قبلی، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. ولی تلاش‌های معدودی برای مطالعه ویژگی‌های فرکانسی موج‌های نشر آوایی انجام گرفته است. به علاوه این موج‌ها بیشتر به عنوان موج‌های لرزه‌ای به طور عمومی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

بنابراین ویژگی‌ها و خصوصیات فرکانسی موج‌های لرزه‌ای بر آنها اعمال شده است. موج‌های لرزه‌ای عمدتاً در بین امواج سیگنال پایین گذر دسته‌بندی می‌شوند [۷].

موگی در مطالعه‌ای بر روی امواج الاستیک نتیجه گرفت که بین تعداد امواج الاستیک دریافتی از سنگ و شدت تنش اعمالی بر روی نمونه رابطه وجود دارد [۸]. ویس، و هنکز در مطالعات خود تلاش کرده‌اند تا میان ویژگی‌های منبع و موج P رابطه‌ای بیابند. آنها در این مطالعات یافتند که فرکانس گوشه‌ای^۶ برای امواج P، بالاتر از امواج S است [۹، ۱۰]. با

گذشت زمان، مطالعات تخصصی تری بر روی امواج انجام شد.

لاکتر در مطالعه خود با جمع‌آوری داده‌های AE، رفتار ترک در سنگهای شکننده^۷ را تحت بارگذاری مورد بررسی قرار داد [۱۱].

او نشان داد که از روی داده‌های روش نشر آوایی می‌توان تشخیص داد که ترک در کدام مرحله، ۱- پیش هسته‌زایی^۸ ۲- هسته‌زایی^۹ و ۳- گسترش ترک^{۱۰}، قرار دارد.

لی و همکاران در پژوهش‌هایی با استفاده از روش نشر آوایی نشان دادند که فرایند آسیب قبل از شکست عموماً با سه مرحله فعالیت ریزترک مشخص می‌شود:

به ترتیب فازهای اولیه، ثانویه و هسته‌زایی. فاز اولیه منعکس‌کننده باز شدن یا پارگی اولیه ریزترک‌های از قبل موجود است. فاز ثانویه شامل رشد زیر حد بحرانی دسته جمعی ریزترک‌ها است که به صورت افزایش نرخ رهاسازی انرژی و کاهش پارامتر بی ولیو^{۱۱} است. در نهایت مرحله هسته‌زایی مربوط به شروع و رشد سریع شکستگی نهایی در امتداد یک یا چند صفحه شکستگی است [۱۲، ۱۳].

لی و ساتو با در نظر گرفتن پارامترهایی همچون میزان آزاد شدن انرژی^{۱۲}، بی ولیو لرزه‌ای^{۱۳} و ابعاد شکستگی^{۱۴} قبل از شکست نهایی سنگ توانستند در آزمایش‌های مکانیک سنگی، نزدیک شدن سنگ به لحظه شکست را مشخص نمایند [۱۴]. آنها نشان دادند که هر یک از پارامترهای بیان شده، می‌تواند تابعی از زمان باقی مانده تا نقطه بحرانی باشد. لی و همکاران در یک آزمایش شکست هیدرولیکی بر روی سنگ گرانیت باری^{۱۵} مشاهده کرد که نرخ تک‌ورودی‌های^{۱۶} روش نشر آوایی تا ۸۰٪ اوج فشار آب نزدیک به صفر است و سپس در آن نقطه به‌طور تصاعدی افزایش می‌یابد [۷].

ابراهیمیان با بهره‌گیری از یک روش ریاضی به مطالعه رابطه بین پهنای باند فرکانسی موج ساطع شده از ترک با طول آن ترک پرداخت. او به این نتیجه رسید که بین این دو پارامتر یک رابطه عکس وجود دارد [۱۵].

ابراهیمیان و همکاران با مطالعه بر روی داده‌های حاصل شده از یک آزمایش تجربی، رابطه ریاضی بین دو پارامتر مذکور را به صورت عملی نیز بیان کردند [۱۶]. طبق یافته‌های این دو پژوهش، رابطه بین طول ترک و پهنای باند فرکانسی موج ساطع شده عبارت است از:

$$L = 2V_c / (\nabla f_s - \nabla f_x) \quad (1)$$

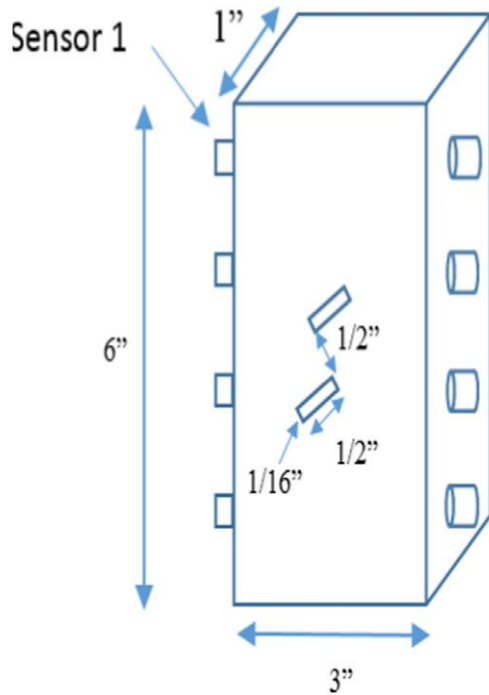
که در آن L طول ترک، V_c سرعت انتشار ترک، f_s پهنای باند فرکانسی سیگنال ایجاد شده ترکی به طول L و f_x پهنای باند فرکانسی سیگنال ناشی از ایجاد ترکی به طول بینهایت است. آنها با توجه به این رابطه، نتیجه گرفتند که طول ترک با پهنای باند فرکانسی موج ساطع شده از آن رابطه معکوس دارد.

۲. روش شناسی

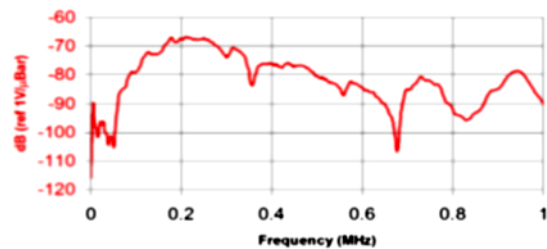
در این تحقیق از روش نشر آوایی برای بررسی برخی خصوصیات مکانیزم شکست در سنگ کمک گرفته شده است. خصوصیات طیف فرکانسی این سیگنال‌ها و ارتباط عملی بین پهنای باند فرکانسی موج ساطع شده از ترک در حال رشد با طول ترک مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۱. آزمایش

در این پژوهش از داده‌های به‌دست آمده از آزمایش انجام شده توسط وونگ و همکاران استفاده شده است [۱۷]. آنها یک نمونه سنگ گرانیت باری به ابعاد $1 \times 3 \times 6$ اینچ را تحت بارگذاری تک محوره قرار دادند. این بارگذاری در راستای طول ۶ اینچ اعمال شد. در شکل ۱ این آزمایش نشان داده شده است. دو شکاف در نمونه توسط واتر جت ایجاد شده است. زاویه شیب شیار و پل سنگ^{۱۷} به ترتیب ۳۰ و ۳۰ درجه بود. طول پل برابر با a اینچ بوده که در آن a نصف طول شیار است.



شکل ۱. هندسه نمونه و محل قرارگیری سنسورها در اطراف آن [۱۷].



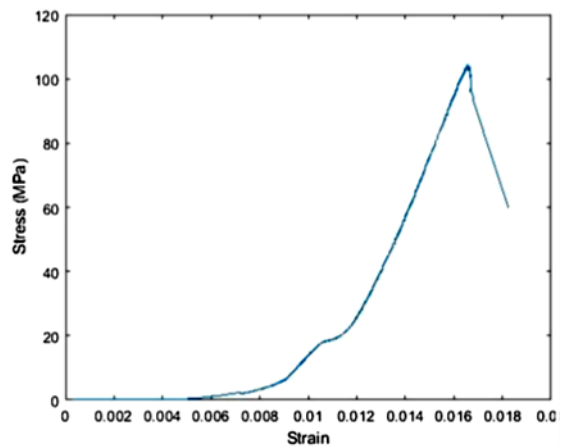
شکل ۳. پاسخ فرکانسی سنسورها [۱۷].

شکل ۴ بیانگر شکل موج در حوزه دامنه-زمان در ثانیه ۵۶.۳۳۵۰۵۸۴ است. همان‌طور که از شکل مشخص است، این موج از دو سیگنال تشکیل شده است که شروع و پایان آنها با نقطه قرمز نشان داده شده است. همچنین حد آستانه در این شکل با خط قرمز نشان داده شده است.

در طول مدت آزمایش، سنسورهای روش نشر آوایی بر روی نمونه نصب شده تا در طول آزمایش اطلاعات ضبط شود. اطلاعات آزمایش انجام شده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. تنظیمات سیستم در آزمایش [۱۷]

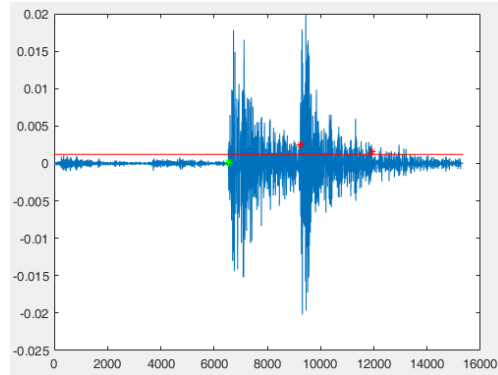
Sampling Rate	۵ (MHz)
Number of sensors	۸
Maximum duration	۳ (msec)
File Length	۱۵ (<i>k</i> samples)
Time/waveform	۳ (msec)
HDT	۰.۸ (msec)
HLT	۰.۳۵۰ (msec)
Threshold	۳۷ (dB)
Pre-amplification	۲۰ (dB)



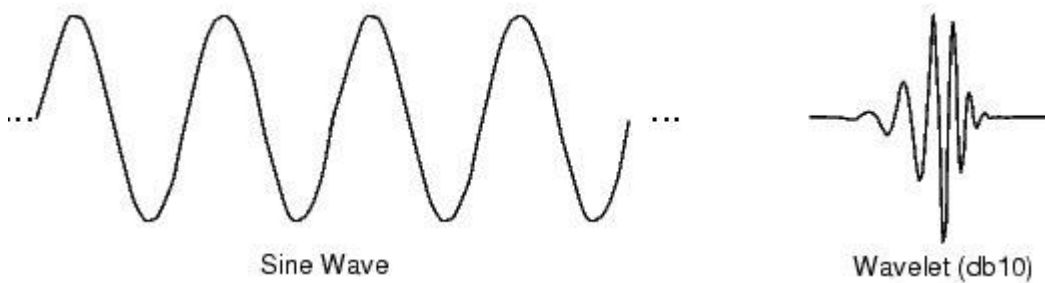
شکل ۲. نمودار تنش-کرنش نمونه مورد آزمایش [۱۷].

همچنین نمودار تنش-کرنش مربوط به آزمون بارگذاری در شکل ۲ ارائه شده است. همان‌طور که در نمودار مشخص است، مقدار مقاومت تک محوره اندازه‌گیری شده حدود ۱۰۵ مگاپاسکال است. نمودار پاسخ فرکانسی سنسورهای به کار رفته در این آزمایش بر حسب دسی‌بل در شکل ۳ نمایش داده شده است.

به منظور تحلیل، داده‌های به دست آمده از این آزمایش، از روش تبدیل موجک بهره گرفته شد. در تبدیل موجک از تعدادی توابع به نام موجک استفاده می‌شود که هر کدام مقیاس متفاوتی دارند. در شکل ۵ تفاوت بین یک سیگنال سینوسی و یک موجک نشان داده شده است.

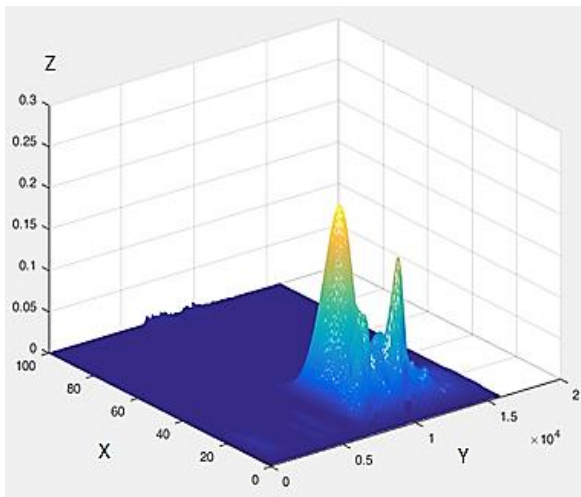


شکل ۴. سیگنالی که توسط سیستم در ثانیه $t=۵۸۴.۳۳۵۰۵۶$ اکتساب شده است.



شکل ۵. شکل موج سینوسی و یک موجک به صورت شماتیکی [۱۸].

و محور Y نماینده زمان است. روند پردازش‌های انجام شده بر روی سیگنال در شکل ۷ ارائه شده است.



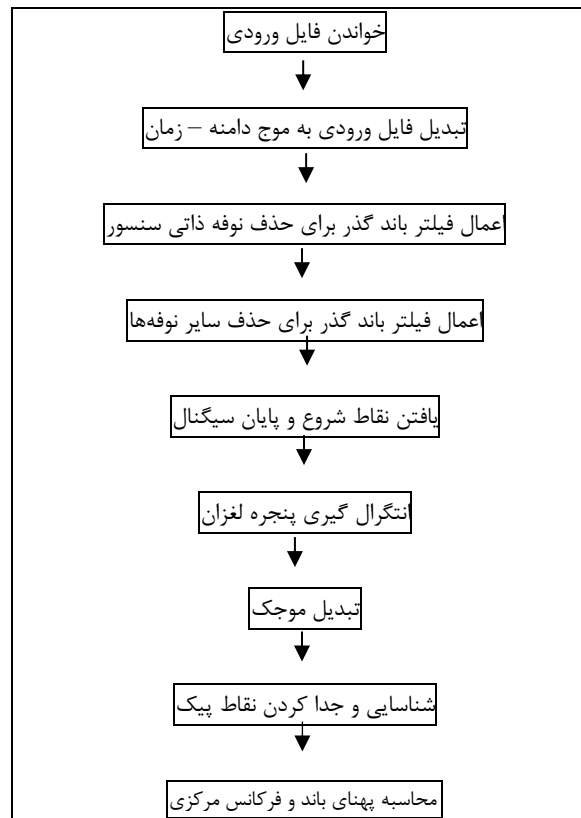
شکل ۶. مقدار مطلق خروجی موجک برای سیگنال نشان داده شده در شکل ۴.

برای انجام تبدیل موجک در گام نخست، از نقاط ابتدایی سیگنال شروع شده و به تدریج موجک به سمت انتهای سیگنال حرکت داده می‌شود. این عمل را هم‌گشت^{۱۸} می‌نامند. بعد از این که هم‌گشت با سیگنال موجک اصلی (موجک مادر) انجام شد، می‌توان آن را به نحوی مقیاس‌دهی نمود که بزرگ‌تر شود و دوباره فرایند تکرار می‌شود. تبدیل موجک طیف وسیعی از کاربردها را دارد. در این پژوهش از این روش برای تفکیک امواج بر اساس فرکانس آنها استفاده شده است.

۲-۲. پردازش‌های انجام شده بر روی سیگنال‌ها

برای تحلیل داده‌ها از برنامه متلب^{۱۹} بهره گرفته شده است. پردازش‌های انجام شده توسط یک برنامه در محیط متلب نوشته و اجرا شده‌اند. برای تحلیل سیگنال‌ها از تبدیل موجک و با موجک مورلت^{۲۰} استفاده شده است. در شکل ۶ شکل خروجی تبدیل موجک سیگنال نشان داده در شکل ۴ ارائه شده است. در این شکل محور X بیانگر پهنای باند فرکانسی

همان‌طور که در فلوجارت فوق مشخص است، پردازش‌های مختلفی بر روی سیگنال انجام می‌شود که در ادامه به طور خلاصه توضیح داده می‌شوند.



شکل ۷. فلوجارت پردازش‌های انجام شده بر روی سیگنال.

۳-۲. خواندن فایل ورودی

در این برنامه مانند بسیاری از برنامه‌های تحلیلی دیگر، ابتدا یک فایل ورودی خوانده می‌شود. این فایل، یک فایل اکسل با حدود ۱۵۰۰۰ داده می‌باشد. این داده‌ها طی مدت آزمایش، توسط سنسور موجود در اطراف نمونه و به کمک سیستم جمع‌آوری داده در آزمایشگاه دانشگاه MIT جمع‌آوری شده‌اند [۱۷].

۴-۲. پاکسازی اطلاعات

فایل ورودی علاوه بر داده‌های خام سیگنال‌های رسیده به سنسور، شامل اطلاعات دیگری مانند زمان برداشت داده‌ها و پارامترهای سیستم است. در این مرحله، داده‌های خام

سیگنال، از دیگر داده‌ها جدا می‌شوند و به صورت یک موج در حوزه زمان در می‌آیند. در شکل ۴ یکی از این سیگنال‌های خام ارائه شده است.

۵-۲. اعمال فیلتر باندگذر برای حذف نوفه خارج از محدوده فرکانسی سنسور

از آنجایی که محدودیت فرکانسی سنسورها در بازه ۵۰ تا ۴۰۰ کیلو هرتز بوده است، یک فیلتر میان‌گذر در همین محدوده تعریف شده است تا نوفه‌ها را حذف نماید.

۶-۲. اعمال فیلتر باند توقف (حذف) برای حذف نوفه ذاتی سنسور

یکی از محدودیت‌های آزمایش انجام شده، وجود نوفه ذاتی در سنسور بوده است. این نوفه، یک سیگنال دائمی با فرکانس ۲۴۵ کیلو هرتز بوده است. لذا توسط یک فیلتر میان‌گذر^۱، باند فرکانسی ۲۴۵ کیلو هرتز با پهنای ۱۰ کیلوهرتز بر روی داده‌های مورد تحلیل اعمال شد.

۷-۲. یافتن نقاط شروع و پایان سیگنال

به منظور یافتن نقاط شروع و پایان هر داده ورودی یک حد آستانه معادل $6 \times 10^{-6}V$ بر سیگنال‌ها اعمال می‌شود که تقریباً دو برابر سطح نوفه سیگنال است (چند میکروثانیه اولیه که شامل هیچ تک‌ورودی نبوده به عنوان نوفه در نظر گرفته می‌شود). به منظور شناسایی پایان ورودی، یک زمان پایان، معادل ۵۰ میکروثانیه اعمال شد، به عبارت دیگر، اگر به مدت ۵۰ میکروثانیه، هیچ داده‌ای بیشتر از سطح آستانه برابر $6 \times 10^{-6}V$ دریافت نشود، سیگنال خاتمه یافته تلقی می‌شود. در شکل ۴، نقطه سبز رنگ نقطه آغاز اولین سیگنال این شکل و اولین نقطه قرمز رنگ (از سمت چپ) نقطه پایان این سیگنال است که توسط پردازش‌ها به دست آمده است. به کمک این پارامترها، دوره زمانی سیگنال بدست می‌آید.

۲-۸. انتگرال گیری پنجره لغزان

برای کاهش دادن نوفه خروجی تبدیل موجک، از یک انتگرال گیر پنجره لغزان به اندازه ۱۰ تک‌ورودی استفاده شده و این پنجره انتگرال گیر بر روی تمام فرکانس‌های خروجی تبدیل موجک، حرکت داده می‌شود.

۲-۹. تبدیل فوریه و تبدیل موجک

همان‌طور که پیشتر اشاره شد، در برنامه برای به‌دست آوردن بازه فرکانسی هر سیگنال، از تبدیل موجک بهره گرفته شده است. همچنین، موجک مورد استفاده در پژوهش حاضر، موجک مورلت است. دلیل استفاده از این موجک این بوده است که در بین انواع موجک، موجک مورلت در بعد دامنه-زمان، بیشترین شباهت ظاهری را به سیگنال‌های مورد مطالعه داشته است.

تبدیل موجک^{۲۲} یکی از تبدیلات مهم ریاضی است که در حوزه‌های مختلف علوم کاربرد دارد. ایده اصلی تبدیل موجک این است که بر ضعف‌ها و محدودیت‌های موجود در تبدیل فوریه غلبه کند.

این تبدیل را بر خلاف تبدیل فوریه، می‌توان در مورد سیگنال‌های غیرایستا و سیستم‌های دینامیک نیز مورد استفاده قرار داد.

۲-۱۰. شناسایی و جدا کردن نقاط اوج

در شکل ۶، قله (نشان داده شده با رنگ زرد روشن) نقطه اوج است. این نقطه، بیانگر فرکانسی است که بیشترین فراوانی را در سیگنال دارد. برای پیدا کردن نقطه اوج سیگنال، یک پنجره مربعی به اندازه ۵ در ۵ نمونه، بر روی خروجی تبدیل موجک حرکت داده شده و خروجی تبدیل موجک در هر مرحله، از میان این پنجره مشاهده می‌شود. در صورتی که در هر مرحله، نقطه وسط این مربع (خروجی تبدیل موجک) از بقیه مقادیر بیشتر بود، به‌عنوان نقطه اوج انتخاب می‌شود.

۲-۱۱. محاسبه پهناهای باند فرکانسی و فرکانس

مرکزی

فرکانس مرتبط با نقطه پیک، همان فرکانس مرکزی موج است. همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، پهناهای باند فرکانسی یک موج در مقاطع مختلف متفاوت است. لذا برای محاسبه این پارامتر می‌بایست از یک معیار مشخص پیروی کرد. در اینجا، پهناهای باند نصف توان که معادل پهناهای باند در نصف ارتفاع نقطه پیک است، به‌عنوان پهناهای باند فرکانسی موج در نظر گرفته شده است.

۲-۱۲. ضریب همبستگی

ضریب همبستگی، یک پارامتر آماری است که بیانگر شدت و همچنین نوع همبستگی (مستقیم یا معکوس) بین دو پارامتر بوده (X and Y) و بصورت رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$\begin{aligned} \text{corr}(X, Y) &= \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \\ &= \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y} \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن E عملگر امید ریاضی، Cov کوواریانس، Corr ضریب همبستگی پیرسون^{۲۳}، μ اندیس دو پارامتر X و Y و σ انحراف معیار است.

همچنین، امید ریاضی برای پارامتر X به‌صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$E[X] = \int x f_X(x) dx \quad (3)$$

که در آن، $f_X(x)$ تابع چگالی احتمال متغیر X است.

۳. مشاهدات

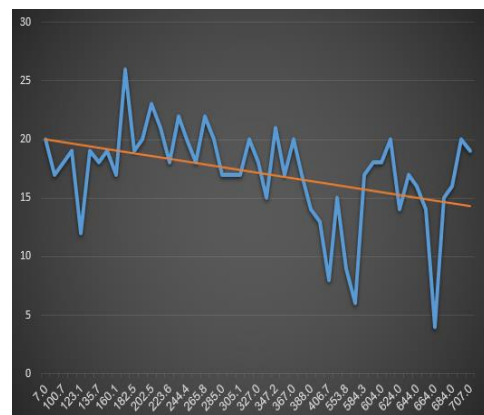
برای بررسی تغییرات پهناهای باند فرکانسی امواج ناشی از ریزترک‌ها با نزدیک شدن به شکست نهایی سنگ، تعداد ۵۰ تک‌ورودی از این سیگنال‌ها، انتخاب شده‌اند. داده‌های مذکور در فواصل زمانی تقریباً مساوی، از ابتدا تا انتهای طول آزمایش انتخاب شده‌اند؛ بدین معنی که در مدت زمان ۱۲ دقیقه‌ای که اعمال بار به نمونه طول کشیده تا به شکست

نهایی برسد، تعداد حدود ۵۰ تک‌ورودی با فواصل زمانی مساوی انتخاب شده‌اند که این بدان معنی است که فواصل سیگنال‌های انتخاب شده در این پژوهش، غالباً حدود ۲۰ ثانیه است. لازم به ذکر است که بسیاری از سیگنال‌های دریافت شده در بازه ثانیه ۷ تا ۱۰۰، دامنه بسیار کمی داشته و بنابراین این سیگنال‌های بسیار ضعیف در فرایند تحلیل حذف شده‌اند.

۳-۱. بررسی تغییرات پهنای باند فرکانسی

همان‌طور که پیشتر توضیح داده شد، در این تحقیق، میزان پهنای باند فرکانسی و همچنین فرکانس مرکزی داده‌های حاصل شده از آزمایش برای نمونه‌های انتخاب شده فوق‌الذکر محاسبه شده است. نمودار شکل ۸، روند تغییرات پهنای باند فرکانسی در طول آزمایش را نشان می‌دهد. در این نمودار، محور قائم بیانگر میزان پهنای باند فرکانسی و محور افقی بیانگر زمان است. همچنین محور افقی از چپ به راست افزایشی است.

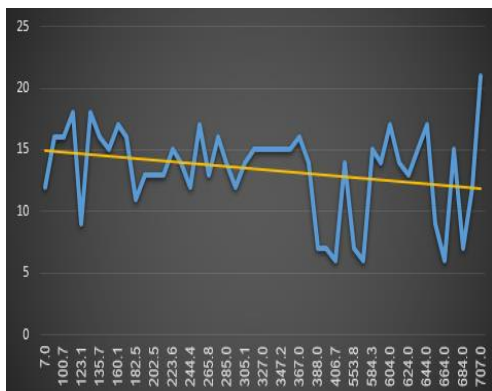
همان‌طور که مشاهده می‌شود، با گذشت زمان و نزدیک شدن به نقطه شکست نهایی سنگ، پهنای باند فرکانسی کاهش می‌یابد. از آنجایی که با گذشت زمان، طول ترک‌ها در مجموع رشد می‌کند، می‌توان نتیجه گرفت که طول ترک با پهنای باند فرکانسی موج ساطع شده از آن نسبت عکس دارد. این نتیجه با پژوهش ابراهیمیان و همکاران [۱۶] انطباق دارد.



شکل ۸- تغییرات پهنای باند فرکانسی در طول آزمایش.

۳-۲. بررسی تغییرات فرکانس مرکزی

شکل ۹ بیانگر روند تغییرات فرکانس مرکزی امواج ساطع شده از ترک‌ها با گذشت زمان و نزدیک‌تر شدن به نقطه شکست است. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، این روند نیز در مجموع نزولی است. به عبارت دیگر می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که مقدار فرکانس مرکزی امواج ساطع شده از ترک با نزدیک شدن به زمان شکست نهایی سنگ کاهش می‌یابد.



شکل ۹. تغییرات فرکانس مرکزی موج ساطع شده از ترک در طول آزمایش.

۳-۳. همبستگی فرکانس مرکزی موج ساطع شده از ترک در حال رشد با پهنای باند فرکانسی

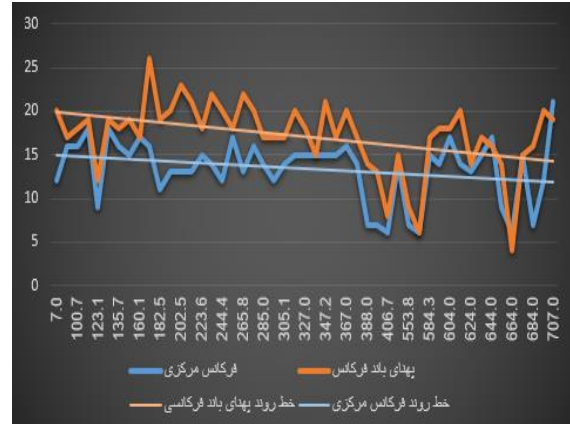
با مقایسه نمودار تغییرات پهنای باند فرکانسی و فرکانس مرکزی موج ساطع شده از ترک، نتیجه می‌شود که یک همبستگی با ضریب همبستگی ۰/۶۵ بین فرکانس مرکزی موج ساطع شده از ترک با پهنای باند فرکانسی آن وجود دارد. شکل ۱۰ دو نمودار مذکور را نشان می‌دهد.

پژوهش با نتایج مرجع [۱۶] مشابهت دارد، ولی این دو پژوهش از حیث روند با یکدیگر متفاوت هستند. در پژوهش مرجع [۱۶] برای اثبات رابطه ۱ یک سیگنال مشخص مورد مطالعه قرار گرفته است، درحالی که در این تحقیق (همان طور که قبل اشاره شد)، یک مطالعه آماری بر روی طیفی از سیگنال‌ها در طی پروسه بارگذاری بر روی نمونه سنگ تا لحظه شکست انجام شده است.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، پهنای باند فرکانسی امواج ساطع شده از سنگ تحت بارگذاری مورد بررسی قرار گرفت. از آزمایش انجام شده روی یک نمونه سنگ که تحت بار تک محوری قرار گرفته و تا شکست ادامه داده شده است، استفاده شد. در زمان آزمایش سنسورهای صوتی برای جمع‌آوری سیگنال‌های صوتی ساطع شده از سنگ به دلیل ایجاد/رشد ترک‌ها و ریزترک‌ها، نصب و اطلاعات آن جمع‌آوری شده است. با استفاده از برنامه متلب تحلیل‌های لازم بر روی اطلاعات سیگنال‌های آوایی آزمایش مذکور انجام شد. روش اصلی به کار برده شده برای تحلیل داده‌ها، استفاده از روش تبدیل موجک بوده است. با استفاده از تبدیل موجک، سیگنال‌های دریافتی از حوزه زمان به حوزه فرکانس-زمان برده شده و تجزیه و تحلیل‌های لازم انجام شدند. نتایج تحقیق عبارت است از:

- ۱- پهنای باند فرکانسی سیگنال‌ها با نزدیک شدن به شکست نهایی سنگ کاهش می‌یابد. این امر خود به نحوی تأییدی عملی بر نتایج تئوریک یعنی رابطه ۱ است.
- ۲- کاهش پهنای باند فرکانسی سیگنال‌ها با رسیدن به نقطه شکست، مبین این است که طول ترک‌های جدید ایجاد شده و یا قسمت‌های رشد یافته ترک‌های قبلی، با رسیدن به نقطه شکست نهایی سنگ، افزایش می‌یابد. پهنای باند فرکانسی، می‌تواند معیاری برای اندازه‌گیری طول



شکل ۱۰. مقایسه فرکانس مرکزی موج ساطع شده از ترک

در حال رشد با پهنای باند فرکانسی.

همان‌طور که در شکل مشخص است علی‌رغم یکسان نبودن دو نمودار، یک نوع شباهت بین آنها مشاهده می‌شود. از طرف دیگر، روند کلی دو نمودار بسیار شبیه بوده و شیب تغییرات کلی روند آنها به یکدیگر نزدیک است. بنابراین با رسیدن به نقطه شکست نهایی سنگ (ایجاد ترک‌های بزرگ‌تر) فرکانس مرکزی سیگنال‌های ناشی از این ترک‌ها کاهش می‌یابد.

همان‌طور که در قبل گفته شد، ابراهیمیان و همکاران [۱۶] نشان دادند که پهنای باند فرکانسی سیگنال با طول ترک ایجاد شده و یا طول قسمت توسعه یافته ترک، نسبت معکوس داشته و از رابطه ۱ تبعیت می‌کند. بنابراین، کاهش پهنای باند فرکانسی سیگنال‌ها می‌تواند نشانه‌ای از بزرگ‌تر شدن این طول باشد. از آنجایی که شکل ۸ نشانگر کاهش پهنای باند فرکانسی با نزدیک شدن به نقطه شکست نهایی سنگ می‌باشد، این خود دلالت بر آن دارد که طول ترک‌های جدید ایجاد شده و یا قسمت‌های گسترش یافته ترک‌های قبلی، با نزدیک شدن به نقطه شکست نهایی سنگ، افزایش می‌یابد. از آنجایی که بزرگ‌تر شدن طول ترک با نزدیک شدن به نقطه شکست نهایی سنگ در تحقیقات قبلی نیز مشاهده شده است، این امر به نوبه خود می‌تواند تأییدی آزمایشگاهی (عملی) بر نتیجه تئوریک مرجع [۱۶] یعنی رابطه ۱ باشد. لازم به ذکر است که هرچند نتایج به دست آمده در این

۴- بین فرکانس مرکزی موج ساطع شده از ترک در حال رشد با پهنای باند فرکانسی یک همبستگی با ضریب ۰/۶۵ وجود دارد.

ترک‌های جدید ایجاد شده و یا قسمت‌های گسترش یافته ترک‌های قبلی باشد.

۳- در آزمایش بارگذاری تک محوره با نزدیک‌تر شدن به شکست، میزان فرکانس مرکزی امواج ساطع شده از ترک‌ها، در مجموع یک روند کاهشی را نشان می‌دهد.

۵. مآخذ

- [1] J. Kaiser, "An Investigation into the Occurrence of Noises in Tensile Tests or a Study of Acoustic Phenomena in Tensile Tests", Munich: Tech. Hosch. Munchen, 1950.
- [2] Costin, Laurence S., "Time-dependent deformation and failure", *Fracture mechanics of rock*, 1987, Vol.167, p.215.
- [3] Ashby, M. F., and C. G. Sammis., "The damage mechanics of brittle solids in compression", *Pure and applied geophysics*, 1990, Vol.133, no.3, pp.489-521.
- [4] Holcomb, D. J., and L. S. Costin, "Detecting damage surfaces in brittle materials using acoustic emissions", 1986, pp.536-544.
- [5] Sondergeld, Carl H., and Louis H. Estey, "Acoustic emission study of microfracturing during the cyclic loading of Westerly granite", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1981, Vol.86, no.B4, pp.2915-2924.
- [6] Nordlund, Erling, and Chunlin Li, "Acoustic emission and the Kaiser effect in rock materials", In *The 31st US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, OnePetro, 1990.
- [7] Li, Bing Q., Bruno Gonçalves da Silva, and Herbert Einstein, "Laboratory hydraulic fracturing of granite: acoustic emission observations and interpretation", *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, Vol.209, pp.200-220.
- [8] Kiyoo, M. O. G. I., "Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relations to earthquake phenomena", *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*: Tokyo, Japan, 1962, pp.125-173.
- [9] Wass, Max, and Thomas C. Hanks, "The source parameters of the San Fernando earthquake inferred from teleseismic body waves", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1972, Vol.62, no.2, pp.591-602.
- [10] Hanks, Thomas C., and Max Wyss, "The use of body-wave spectra in the determination of seismic-source parameters", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1972, Vol.62, no.2, pp.561-589.
- [11] Lockner, David A., and James D. Byerlee, "How geometrical constraints contribute to the weakness of mature faults", *Nature*, 1993, Vol.363, no.6426, pp.250-252.
- [12] Lei, X. L., K. Masuda, O. Nishizawa, L. Jouniaux, L. Liu, W. Ma, T. Satoh, and K. Kusunose, "Three typical stages of acoustic emission activity during the catastrophic fracture of heterogeneous faults in jointed rocks", *Jou. Struct. Geol.*, 2004, Vol.26, pp.247-258.
- [13] Lei, Xinglin, "Typical phases of pre-failure damage in granitic rocks under differential compression", *Geological Society, London, Special Publications*, 2006, Vol.261, no.1, pp.11-29.
- [14] Lei, Xinglin, and Takashi Satoh, "Indicators of critical point behavior prior to rock failure inferred from pre-failure damage", *Tectonophysics*, 2007, Vol.431, no.1-4, pp.97-111.
- [15] Papadarakakis, M., and M. Fragiadakis, "Relation of Frequency Bandwidth to Crack Length in Stressed Rocks", 2017.

- [16] Ebrahimian, Z., M. Ahmadi, S. Sadri, B. Q. Li, and Omid Moradian, "Wavelet analysis of acoustic emissions associated with cracking in rocks", *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, Vol.217, p.106516.
- [17] Wong, L. N. Y., and H. H. Einstein, "Crack coalescence in molded gypsum and Carrara marble: part 1. Macroscopic observations and interpretation", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2009, Vol.42, no.3, pp.475-511.
- [18] Gupta, Samta, and A. Prabhakar Rao, "Fingerprint based gender classification using discrete wavelet transform & artificial neural network", *International Journal of Computer Science and mobile computing*, 2014, Vol.3, no.4, pp.1289-1296

پی نوشت

-
1. Acoustic Emission (AE)
 2. Kaiser
 3. Kaiser Effect
 4. Westerly Granite
 5. Micro Crack
 6. Corner frequency
 7. Brittle
 8. Pre-nucleation
 9. Nucleation
 10. Fault Propagation
 11. b-value
 12. Energy release
 13. Seismic b-value
 14. Fractal dimension
 15. Barre Granite
 16. Hits
 17. Bridging
 18. Convolution
 19. MATLAB
 20. Morlet
 21. Stop Band Filter
 22. Wavelet Transform
 23. Pearson Correlation Coefficient