





دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

مطالعه ارتباط پارامترهای آکوستیک با سیر آسیب و گسیختگی سنگ

دانشجو

ذکریا رخشانی

استاد راهنما

دکتر مجید نیکخواه

تیر ۱۳۹۸

تقدیم به پدر بزرگوار و مادر مهربانم

آن دو فرشته ای که از خواسته هایشان گذشتند، سختی ها را به جان خریدند و خود را  
سپر بلای مشکلات و نا ملایمات کردند تا من  
به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده ام برسم.

ای پدر از تو هر چقدر می گویم باز هم کم می آورم

خورشیدی شدی و از روشنایی ات جان گرفتم و در نا امیدی ها نازم را کشیدی و لبریزم  
کردی از شوق

اکنون حاصل دستان خسته ات رمز موفقیتیم شد

به خودم تبریک می گویم که تو را دارم و دنیا با همه بزرگیش مثل تو را ندارد.....

و تو ای مادر ای شوق زیبایی نفس کشیدن

ای روح مهربان هستی ام

تو رنگ شادی هایم شدی و لحظه ها را با تمام وجود از من دور کردی و عمری خستگی ها  
را به جان خریدی تا اکنون توانستی طعم

خوش پیروزی را به من بچشانی

## تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم از راهبانی‌های استاد کراتقدر جناب آقای دکتر محمد

نیکخواه که در تمامی مراحل انجام این پایان‌نامه مرا یاری نموده‌اند صمیمانه

پاسکزاری نمایم.

از اساتید عزیز جناب آقای دکتر جلالی و آقای دکتر رمضان زاده که

داوری این پایان‌نامه را بر عهده گرفتند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

در نهایت از اساتید محترم دانشکده‌ی معدن، نفت و ژئوفیزیک

دانشگاه صنعتی شاهرود و همه دوستان عزیز می‌گویم که به سرانجام این پایان‌نامه

یاری نموده‌اند، نهایت تشکر را دارم.

## تعهد نامه

اینجانب ذکریا رخشانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه مطالعه ارتباط پارامترهای آکوستیک با سیر آسیب و گسیختگی سنگ تحت راهنمایی دکتر مجید نیکخواه

متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

## تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

روش‌های مختلفی قادر به بررسی روند شکست و فرآیند تغییر شکل سنگ می‌باشند. یکی از این روش‌ها که به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد کاربرد گسترده‌ای در زمینه مکانیک شکست دارد، روش انتشار آوایی می‌باشد. زمانی که سنگ تحت بار قرار می‌گیرد با آزاد شدن سریع انرژی، امواج الاستیک زود گذر با فرکانس بالا از یک منبع داخلی سنگ منتشر می‌شوند، این پدیده انتشار آوایی نامیده می‌شود. پدیده انتشار آوایی بر اثر رشد و توسعه ریزترک‌ها، انسداد منافذ، جابه جایی سطوح ریزترک‌ها و جابه جایی دانه‌ای رخ می‌دهد. این پدیده، در مهندسی سنگ برای پایداری فضاهای زیرزمینی، چاه‌های نفت و گاز و غیره کاربرد گسترده‌ای دارد. در مکانیک سنگ این پدیده در مبحث رشد و توسعه ریزترک‌ها و آسیب و گسیختگی سنگ به کار می‌رود. هر موج ساطع شده از منبع داخلی سنگ دارای پنج پارامتر (شمارش، انرژی، مدت زمان دوام، زاویه خیز و حداکثر دامنه) می‌باشد. پدیده انتشار آوایی همانند منحنی تنش- کرنش به بررسی روند شکست سنگ می‌پردازد، بنابراین بین این پدیده و تنش اعمالی بر سنگ ارتباط تنگاتنگی وجود دارد. در تحقیق حاضر سعی شده است، ارتباط هر یک از پارامترهای آوایی با آسیب و گسیختگی سنگ بررسی شود. برای این منظور دو نمونه سنگ ژئولیت و گرانیت تهیه شد. سپس هریک از نمونه‌ها تحت آزمایش‌های تک محوره و برزلی همراه با آزمایش آوایی قرار گرفتند. پس از برداشت داده‌ها نمودار تنش-زمان و نمودار هریک از پارامترهای آوایی، بر حسب زمان، رسم و سپس در یک نمودار سه محوره کنار هم بر حسب زمان قرار گرفتند، تا ارتباط هر یک از پارامترهای آوایی با آسیب و گسیختگی سنگ بررسی شود. با توجه به نمودارها نتیجه گرفته شد که پارامترهای آوایی در مراحل اولیه بارگذاری فعالیت ضعیفی دارند و در مرحله آسیب سنگ که ریزترک‌ها با هم ترکیب شده و ترک‌های بزرگ را تشکیل می‌دهند، دارای بیشترین مقدار هستند و می‌توان از پارامترهای شمارش، انرژی و مدت زمان

دوام برای تحلیل آسیب و گسیختگی و از پارامترهای زمان خیز و دامنه برای آنالیز منبع انتشار آوایی استفاده کرد.

**واژگان کلیدی:** انتشار آوایی، مکانیک شکست، آسیب و گسیختگی، تحلیل پارامتری



## فهرست

فهرست مطالب.....	ذ
فهرست اشکال.....	ص
فهرست جداول.....	غ
فصل ۱ کلیات.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ ضرورت و اهداف تحقیق.....	۳
۳-۱ مراحل انجام تحقیق.....	۴
۴-۱ ساختار تحقیق.....	۶
فصل ۲ ادبیات موضوع.....	۷
۱-۲ مقدمه.....	۸
۲-۲ مکانیک شکست.....	۸
۳-۲ مفهوم شکست.....	۹
۱-۳-۲ معیارهای شکست در مکانیک شکست.....	۱۱
۱-۱-۳-۲ معیار تعادل انرژی.....	۱۱
۲-۱-۳-۲ معیار تنش.....	۱۲
۳-۱-۳-۲ معیار باز شدگی ترک.....	۱۴
۴-۲ آسیب و مکانیک آسیب.....	۱۵
۵-۲ روش های بررسی روند شکست سنگ.....	۱۷
۱-۵-۲ منحنی تنش - کرنش سنگ.....	۱۷

- ۲۱.....۲-۵-۲ آزمون های غیر مخرب.....
- ۲۲.....۲-۲-۵-۲ آزمون انتشار آوایی.....
- ۲۳.....۶-۲ رفتار نگاری پایداری سازه و آزمون های غیر مخرب.....
- ۲۷.....۷-۲ اصول بازرسی به وسیله آزمون انتشار آوایی.....
- ۲۸.....۸-۲ تفاوت روش انتشار آوایی با سایر روش های NDT.....
- ۳۰.....۹-۲ انواع نويز.....
- ۳۰.....۱-۹-۲ نويز های مکانیکی.....
- ۳۱.....۲-۹-۲ نويز های دوره ای.....
- ۳۱.....۳-۹-۲ نويزهای الکترومغناطیسی.....
- ۳۱.....۴-۹-۲ نويزهای هیدرولیکی.....
- ۳۱.....۴-۹-۲ نويزهای الکترومغناطیسی.....
- ۳۲.....۵-۹-۲ حذف نويز.....
- ۳۳.....۱۰-۲ انواع امواج انتشار آوایی.....
- ۳۴.....۱۱-۲ انواع سیگنال های انتشار آوایی.....
- ۳۶.....۱۲-۲ تجهیزات.....
- ۳۶.....۱-۱۲-۲ سیستم بارگذاری.....
- ۳۶.....۲-۱۲-۲ سیستم اندازه گیری.....
- ۳۷.....۱-۲-۱۲-۲ سنسور.....
- ۳۸.....۱-۱-۲-۱۲-۲ نصب سنسور انتشار آوایی.....
- ۳۹.....۲-۲-۱۲-۲ تقویت کننده.....
- ۴۰.....۳-۲-۱۲-۲ پردازشگر.....
- ۴۱.....۴-۲-۱۲-۲ ثبت و قرائت.....

- ۴۱.....۱۳-۲ ردیابی سیگنال و شمارش نشر.....
- ۴۲.....۱۴-۲ پارامترهای توصیف سیگنال.....
- ۴۷.....۱۵-۲ کلیاتی در رابطه با اثر کایزر و انتشار آوایی.....
- ۴۸.....۱۶-۲ بعد فرکتال دامنه آسیب.....
- ۴۹.....b-value ۱-۱۶-۲.....
- ۵۰.....۲-۱۶-۲ معیار دانسیته انرژی.....
- ۵۲.....۱۷-۲ انواع تحلیل های روش انتشار آوایی.....
- ۵۲.....۱-۱۷-۲ تحلیل جبهه ی موج سیگنال.....
- ۵۲.....۲-۱۷-۲ تحلیل پارامتری.....
- ۵۲.....۱-۲-۱۷-۲ کاربرد رخداد در رفتار نگاری ترک.....
- ۵۳.....۲-۲-۱۷-۲ کاربرد شمارش ها در رفتار نگاری.....
- ۵۴.....۳-۱۷-۲ تحلیل حالت غالب شکست.....
- ۵۶.....۱۸-۲ مزایای روش انتشار آوایی.....
- ۵۷.....۱۹-۲ محدودیت های روش انتشار آوایی.....
- ۵۸.....۲۰-۲ جمع بندی فصل.....
- ۵۹.....فصل ۳ مروری بر مطالعات گذشته.....
- ۶۰.....۱-۳ مقدمه.....
- ۶۰.....۲-۳ پیشینه تحقیق.....
- ۸۲.....۳-۳ جمع بندی فصل.....
- ۸۵.....فصل ۴ مطالعات آزمایشگاهی.....

۱-۴	مقدمه	۸۶
۲-۴	آماده سازی نمونه ها و آزمون ها	۸۶
۳-۴	دستگاه بار گذاری و مشخصات آن	۹۲
۴-۴	تعیین ویژگی های فیزیکی و مکانیکی سنگ ها	۹۳
۵-۴	دستگاه ثبت امواج آوایی (انتشار آوایی)	۹۴
۱-۵-۴	تحلیل داده ها	۹۶
۲-۵-۴	رفتار نگاری انتشار آوایی	۹۶
۳-۵-۴	تحلیل پارامتری انتشار آوایی	۹۸
۶-۴	آزمایش های تک محوره فشاری همراه با انتشار آوایی (سنگ زئولیت)	۱۰۱
۱-۶-۴	آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره تا شکست کامل نمونه	۱۰۱
۱-۱-۶-۴	ارتباط پارامتر شمارش با آسیب و گسیختگی سنگ	۱۰۲
۲-۱-۶-۴	ارتباط پارامتر انرژی با آسیب و گسیختگی سنگ	۱۰۴
۳-۱-۶-۴	ارتباط پارامتر مدت زمان دوام با آسیب و گسیختگی سنگ	۱۰۶
۴-۱-۶-۴	ارتباط پارامتر زمان خیز با آسیب و گسیختگی سنگ	۱۰۸
۵-۱-۶-۴	ارتباط پارامتر حداکثر دامنه با آسیب و گسیختگی سنگ	۱۰۹
۲-۶-۴	آزمایش تک محوری زئولیت با دو سیکل بارگذاری همراه با انتشار آوایی	۱۱۰
۱-۲-۶-۴	ارتباط پارامتر شمارش با آسیب و گسیختگی سنگ	۱۱۰
۲-۲-۶-۴	ارتباط پارامتر انرژی با آسیب و گسیختگی سنگ	۱۱۳
۳-۲-۶-۴	ارتباط پارامتر مدت زمان دوام با آسیب و گسیختگی سنگ	۱۱۵
۳-۶-۴	تحلیل b-value	
		۱۱۷
۴-۶-۴	تحلیل حالت غالب شکست	۱۲۰

۱۲۱	.....۵-۶-۴ ارتباط پارامترهای آوایی باهم
۱۲۱	.....۱-۵-۶-۴ ارتباط پارامتر شمارش با پارامتر انرژی
۱۲۳	.....۲-۵-۶-۴ ارتباط پارامتر انرژی با مدت زمان دوام
۱۲۳	.....۶-۶-۴ جمع بندی فصل
۱۲۵	.....فصل ۵ نتیجه گیری
۱۲۶	.....۱-۵ مقدمه
۱۲۶	.....۲-۵ نتیجه گیری
۱۲۸	.....۳-۵ پیشنهاد ها

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ منحنی مقاومتی سنگ..... ۱۰
- شکل ۲-۲ حالت های شکست (کششی، برشی و پارگی)..... ۱۵
- شکل ۳-۲ نمایش رابطه تنش- کرنش برای ماده سالم و آسیب دیده و توسعه آسیب بر حسب تغییر شکل تحت بار ثابت..... ۱۷
- شکل ۴-۲ دیاگرام شمانیک تنش- کرنش یک نمونه سنگ تحت فشاری تک محوری. ۱۹
- شکل ۵-۲ مراحل بوجود آمدن ترک..... ۲۰
- شکل ۶-۲ انتشار آوایی بوجود آمده بوسیله تشکیل میکرو ترک..... ۲۴
- شکل ۷-۲ اصول سنسور انتشار آوایی: موج الاستیک تولید شده توسط تنش ..... ۲۵
- شکل ۸-۲ مراحل یک آزمون انتشار آوایی..... ۲۶
- شکل ۹-۲ زنجیره فرآیند اصول بازرسی بوسیله آزمون انتشار آوایی..... ۲۷
- شکل ۱۰-۲ اصول روش سنسور محافظ امواج انتشار آوایی و امواج سیگنال..... ۳۳
- شکل ۱۱-۲ انواع موج انتشار آوایی..... ۳۴
- شکل ۱۲-۲ انواع سیگنال های انتشار آوایی، سیگنال نوع پیوسته (بالا) و سیگنال نوع گذرا (پایین)..... ۳۵
- شکل ۱۳-۲ سنسور  $ISR_6$ ..... ۳۷
- شکل ۱۴-۲ محل نصب سنسور در انتشار آوایی..... ۳۸
- شکل ۱۵-۲ نوعی از تقویت کننده..... ۴۰
- شکل ۱۶-۲ شمارش پالس ها روشی برای تعیین کمیت فعالیت انتشار آوایی..... ۴۲

- شکل ۲-۱۷ پارامترهای انتشار آوایی..... ۴۵
- شکل ۲-۱۸ تحلیل سیگنال بوسیله ارتباط یک پارامتر با پارامترهای دیگر..... ۴۶
- شکل ۲-۱۹ ارتباط انتشار آوایی با بارگذاری مکرر..... ۴۷
- شکل ۲-۲۰ توزیع تجمعی رخدادهای آوایی بر حسب بزرگی سیگنال های آوایی..... ۵۰
- شکل ۲-۲۱ شرایط پایداری سازه تابع ضریب  $\beta t$ ..... ۵۱
- شکل ۲-۲۲ تغییرات نرخ رخداد در یک رفتارنگاری دوره ای..... ۵۳
- شکل ۲-۲۳ توزیع دامنه بر اساس تعداد شمارش ها در نمونه تحت خمش..... ۵۴
- شکل ۲-۲۴ طبقه بندی مراحل مختلف شکست بر اساس مشخصات انتشار آوایی..... ۵۶
- شکل ۳-۱ نمودار نتایج نمونه‌های آزمایش شده (a) بارگذاری در راستای عحات بر لایه-بندی (b) موازی لایه بندی..... ۶۷
- شکل ۳-۲ نمودار متغیر آسیب-زمان نمونه با بارگذاری عحات بر صفحات لایه‌بندی (a) براساس مقاومت الکتریکی (b) براساس پارامتر آوایی..... ۶۸
- شکل ۳-۳ نمودار متغیر آسیب-زمان نمونه با بارگذاری موازی با صفحات لایه‌بندی (a) براساس مقاومت الکتریکی (b) براساس پارامتر آوایی..... ۶۹
- شکل ۳-۴ (a) نمودار نرخ رخدادهای انتشار آوایی (در هر ثانیه) (b) تجمعی رخدادهای انتشار آوایی بر حسب تنش تک محوره اعمال شده ..... ۷۰
- شکل ۳-۵ رابطه بین نرخ بارگذاری و نسبت متناسب..... ۷۳
- شکل ۳-۶ رابطه بین تنش و نرخ شمارش در طول دو سیکل بارگذاری (a) لیمیستون (b) گرانیت (c) سنگ نمک..... ۷۴

- شکل ۳-۷ نمودار اختلاف تنش های محوری و نرخ شمارش با زمان در ازای تنش های جانبی مختلف.....۷۵
- شکل ۳-۸ نمودار تنش بر حسب کرنش در ازای تغییرات نرخ بارگذاری.....۷۶
- شکل ۳-۹ منحنی های نرخ کرنش و پارامترهای آوایی در ازای تغییرات نرخ بارگذاری ۷۷
- شکل ۳-۱۰ نمودار مقاومت برشی بر حسب زاویه صفحات ضعیف با راستای بارگذاری ۷۸
- شکل ۳-۱۱ پنج نوع از انواع حالت های گسیختگی.....۷۸
- شکل ۳-۱۲ رابطه بین شمارش انتشار آوایی، شمارش تجمعی انتشار آوایی و زمان.....۸۲
- شکل ۴-۱ تصویر دستگاه مغزه گیری مورد استفاده.....۸۸
- شکل ۴-۲ تصویر دستگاه برش سنگ.....۸۹
- شکل ۴-۳ نمونه های استوانه ای تهیه شده از بلوک های سنگ گرانیت و زئولیت.....۸۹
- شکل ۴-۴ نمونه های دیسکی تهیه شده از بلوک های سنگ گرانیت و زئولیت.....۸۹
- شکل ۴-۵ نمونه های استوانه ای تهیه شده از بلوک سنگ گرانیت جهت انجام آزمایش های بارگذاری فشاری تک محوره و انتشار آوایی.....۹۰
- شکل ۴-۶ نمونه های دیسکی تهیه شده از بلوک سنگ گرانیت جهت انجام آزمایش های بارگذاری فشاری و انتشار آوایی.....۹۰
- شکل ۴-۷ نمونه های استوانه ای تهیه شده از بلوک سنگ زئولیت جهت انجام آزمایش های بارگذاری فشاری تک محوره و انتشار.....۹۱
- شکل ۴-۸ نمونه های دیسکی تهیه شده از بلوک سنگ زئولیت جهت انجام آزمایش های بارگذاری فشاری و انتشار آوایی.....۹۱
- شکل ۴-۹ نمایی کلی از دستگاه بارگذاری آزمایش.....۹۲
- شکل ۴-۱۰ اجزای اصلی سیستم انتشار آوایی AMSY-6.....۹۶



- شکل ۴-۱۱ نمونه های دیسکی آزمایش سنگ زئولیت.....۹۹
- شکل ۴-۱۲ نمونه های استوانه ای آزمایش سنگ زئولیت.....۱۰۰
- شکل ۴-۱۳ نمونه های استوانه ای آزمایش سنگ گرانیت.....۱۰۰
- شکل ۴-۱۴ نمونه های دیسکی آزمایش سنگ گرانیت.....۱۰۱
- شکل ۴-۱۵ نمودار تنش و شمارش برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ زئولیت.....۱۰۳
- شکل ۴-۱۶ نمودار تنش و تجمعی شمارش برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ زئولیت.....۱۰۴
- شکل ۴-۱۷ نمودار تنش و انرژی برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ زئولیت.....۱۰۵
- شکل ۴-۱۸ نمودار تنش و تجمعی انرژی برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ زئولیت.....۱۰۶
- شکل ۴-۱۹ نمودار تنش و مدت زمان دوام برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ زئولیت.....۱۰۷
- شکل ۴-۲۰ نمودار تنش و تجمعی مدت زمان دوام برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ زئولیت.....۱۰۸
- شکل ۴-۲۱ نمودار تنش و زمان خیز برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ زئولیت.....۱۰۹
- شکل ۴-۲۲ نمودار تنش و حداکثر دامنه برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ زئولیت.....۱۱۰
- شکل ۴-۲۳ نمودار تنش و شمارش برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ زئولیت.....۱۱۲

- شکل ۴-۲۴ نمودار تنش و تجمعی شمارش برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ زئولیت..... ۱۱۳
- شکل ۴-۲۵ نمودار تنش و انرژی برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ زئولیت..... ۱۱۴
- شکل ۴-۲۶ نمودار تنش و تجمعی انرژی برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ زئولی..... ۱۱۵
- شکل ۴-۲۷ نمودار تنش و مدت زمان دوام برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ زئولیت..... ۱۱۶
- شکل ۴-۲۸ نمودار تنش و تجمعی مدت زمان دوام برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ زئولیت..... ۱۱۶
- شکل ۴-۲۹ تحلیل b-value نمونه  $ZUT_1$ ..... ۱۱۸
- شکل ۴-۳۰ تحلیل b-value نمونه ZBT..... ۱۱۸
- شکل ۴-۳۱ تحلیل b-value نمونه  $GUT_3$ ..... ۱۱۹
- شکل ۴-۳۲ تحلیل b-value نمونه  $GBT_1$ ..... ۱۱۹
- شکل ۴-۳۳ تحلیل حالت شکست رخدادهای آوایی نمونه  $ZUT_1$ ..... ۱۲۱
- شکل ۴-۳۴ نمودار شمارش و انرژی برحسب تنش در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره  $ZUT_1$ ..... ۱۲۲
- شکل ۴-۳۵ نمودار مدت زمان دوام و انرژی برحسب تنش در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره  $ZUT_1$ ..... ۱۲۳

## فهرست جداول

جدول ۱-۴ تعداد نمونه های تهیه شده برای هر یک از سنگ ..... ۹۲

جدول ۲-۴ ویژگی فیزیکی سنگ ها..... ۹۴

جدول ۳-۴ مقاومت نهایی بدست آمده برای هر یک از نمونه های مورد آزمایش..... ۹۴

جدول ۴-۴ برنامه آزمایشات و بارگذاری آن ها..... ۹۷



## فصل اول: کلیات

## ۱-۱ مقدمه

سنگها وقتی تحت بارگذاری و تنش قرار می‌گیرند، سیگنال‌های ناگهانی میکرولرزه‌ای الاستیک زود گذر با فرکانس بالا از خود ساطع می‌کنند که این پدیده انتشار آوایی نامیده می‌شود. این پدیده در سنگ‌ها به واسطه‌ی انسداد ریز ترک‌ها و منافذ، جابه‌جایی بین سطوح ریز ترک‌ها، شروع و توسعه ریز ترک‌ها، جابه‌جایی بین دانه‌ای و ایجاد گسیختگی ایجاد می‌شود. انتشار آوایی در رفتار نگاری فعالیت ریز لرزه‌ای درون اجسام تحت بارگذاری و در کارهای آزمایشگاهی و برجا کاربردهای فراوانی دارد. در مهندسی سنگ این روش برای رفتار نگاری پایداری سازه‌های زیرزمینی و شیروانی‌ها، مغارهای گازی و نفت و تاریخچه تنش استفاده می‌شود. در واقع در مکانیک سنگ برای بررسی ترک و رشد آن در مبحث مکانیک شکست و تخمین تنش‌های برجا می‌توان از انتشار آوایی استفاده کرد. با انجام آزمایش بر روی نمونه‌هایی از سنگ و رفتار نگاری انتشار آوایی روی آن نمونه‌ها اطلاعات مهمی در خصوص میکرو مکانیک مراحل گسیختگی (روند شکست سنگ) بدست می‌آید. اطلاعات در خصوص آغاز انتشار آوایی و شکست در نمونه‌های سنگی در معرض تنش را می‌توان توسط ثبت سیگنال‌های دریافت توسط سنسورهای انتشار آوایی و موقعیت انتشار آوایی حین انجام آزمایش تعیین نمود. امروزه مشابه تعیین منحنی رفتاری تنش کرنش که به منظور بررسی رفتار سنگ توسط آزمایش فشاری تک محوره انجام می‌شود، همزمان با اندازه‌گیری کرنش، رفتار نگاری انتشار آوایی نیز انجام می‌شود. بدین ترتیب بار و تنش اعمال شده بر سنگ و مراحل مختلف رفتاری سنگ شامل انسداد منافذ و ریز ترک‌ها، الاستیک و پلاستیک و شکست با سیگنال‌های انتشار آوایی با دقت بیشتری قابل بررسی است. بنابراین بین پارامترهای انتشار آوایی و روند شکست سنگ ارتباط تنگاتنگی می‌تواند وجود داشته باشد. از طریق انتشار آوایی، می‌توان مکانیزم گسیختگی و سیر شکست سنگ را بررسی کرد.

در طی فرآیند تغییر شکل و شکست سنگ، انرژی کرنش درونی به طور پیوسته منتقل و پراکنده می شود. انتشار آوایی فقط یک واکنش فیزیکی برای تغییر شکل و رفتارهای گسیختگی تحت بارها نیست بلکه یکی از روش های پراکنده کردن انرژی در طی فرآیند تغییر شکل گسیختگی سنگ نیز می باشد. پایش رویداد انتشار آوایی برای پایش زمان واقعی فرآیند شکست مواد اهمیت دارد. رویداد انتشار آوایی یک موج با فرکانس بالا و انرژی پایین است. حرکات در مقیاس دانه ای مانند جابجایی ها، باز چینش دانه ها و اصطکاک و غیره و همچنین حرکات در مقیاس ماکرو مانند مقدار رشد اندازه و انبساط ریزترک ها می توانند به وسیله ی رویدادهای انتشار آوایی هدایت (شناسایی) شوند. تغییر شکل و رفتارهای گسیختگی مواد، سنگ و بتن فرآیندهای پیچیده ای هستند. کشف فرآیند شکست از منظر میکروسکوپی برای بحث مکانیزم گسیختگی ضروری است. پدیده ی انتشار آوایی وسیله ای برای مطالعه ی شکست در مقیاس میکرو با مقیاس دانه ای است. بر اساس فعالیت های انتشار آوایی، اطلاعات و قوانینی در مورد چگونگی جلوگیری از شکست و بار وارد بر سنگ بدست می آید.

با وجود اینکه روش انتشار آوایی پیشرفت های فراوانی در سالهای اخیر داشته است اما هنوز جنبه های مختلف زیادی از ارتباط مکانیزم شکست سنگ و پارامترهای انتشار آوایی ناشناخته مانده است. در این تحقیق با استفاده از روش انتشار آوایی به بررسی روند مکانیزم شکست و آسیب نمونه های سنگ زئولیت و گرانیت تحت آزمون بارگذاری فشاری تک محوره و دیسکی برزلی پرداخته شده است تا بتوان با رفتارنگاری مناسب، مکانیزم شکست و آسیب سنگ با تغییرات پارامترهای مختلف آوایی بررسی شود. در این تحقیق ارتباط پارامترهای آوایی با آسیب و گسیختگی سنگ با استفاده از داده های آوایی ثبت شده مورد بررسی قرار گرفت.

## ۱-۲- ضرورت موضوع و اهداف تحقیق

پایداری پروژه های مهندسی از مهمترین بخش های پروژه ها می باشد که در همان مراحل طراحی و برنامه ریزی پروژه باید مورد بررسی قرار گیرد، لذا با تحقیق درمورد تنشی که ممکن است بر سازه

وارد شود باید مقاومت و رفتار های مختلف این سازه را در برابر تنش وارده ارزیابی کرد. بطوری که از سیر شکست و پایداری سازه اطلاعاتی بدست آورد و پروژه را متناسب با آن طراحی و سپس احداث کرد. مکانیزم شکست سنگ اهمیت زیادی بر عملکرد سازه ها دارد، شکست های سریع و ناگهانی سازه های معدنی و عمرانی بزرگ مقیاس باعث کاهش ایمنی سازه، تخریب مواد و حتی باعث توقف فعالیت های معدنی و عمرانی می شود. توانایی در شناسایی رفتار قبل از شکست سنگ باعث پیش بینی و یا دفع شکست های احتمالی می شود. اهمیت شناسایی رفتار سنگ و یا در واقع بررسی مکانیزم شکست سنگ در برابر تنش وارد شده بر آن در صنایع نفت و استخراج معدن رو به رشد است. در صنایع معدن کاری و نفت، آگاهی از سیر شکست سنگ برای طراحی حفاری ها ضروری است. همچنین ارزیابی قابل اطمینان رفتار سنگ در برابر تنش های وارده یک گام مهم در تحلیل و طراحی فضاهای زیرزمینی، به ویژه برای ارزیابی پایداری ساختارهای زیرزمینی جهت جلوگیری از شکست یا فروپاشی بازشدگی های زیرزمینی است. از اهداف عمده تحقیق پیشنهاد شده بررسی ارتباط بین نوع رفتار سنگ با پارامترهای انتشار آوایی از طریق تنش اعمال شده به سنگ در آزمایش انتشار آوایی می باشد.

پیش بینی شکست به جهت اطمینان از پایداری و عدم شکست سازه های طراحی شده اهمیت خاصی دارد. اما تنشی که سبب شکست سنگ ها می شود غیر قابل پیش بینی و اعتماد است، به عبارت دقیق تر اگر چند نمونه سنگ به طور یکسان و همزمان جهت شکست مورد بارگذاری قرار گیرند مقادیر تنش شکست اندازه گیری شده برای نمونه ها متفاوت خواهد بود. پس نیاز به پژوهش و بررسی در زمینه مکانیک شکست در سنگ ها بسیار مشهود است.

بررسی مکانیک آسیب نمونه های ترد در طول بارگذاری اهمیت زیادی در مسئله تغییرشکل صنعت مهندسی سنگ دارد. روش های مختلفی برای رفتارنگاری آسیب و شکست مصالح توسعه و بسط داده



شده است، از میان این روش ها، روش انتشارآوایی به دلیل داشتن ویژگی های منحصر به فرد و توانایی رفتارنگاری جامع و آنی در سال های اخیر مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته است.

### ۱-۳- مراحل انجام تحقیق

در این پژوهش ابتدا منابع کتابخانه ای در خصوص پژوهش های انجام شده در خصوص ارتباط مشخصه و رفتار سنگ تحت اعمال بار و سیر شکست سنگ و همچنین ارتباط انتشار آوایی با مکانیزم شکست سنگ در آزمونهای آزمایشگاهی مختلف نظیر فشار تک محوره، برزیلین و خمش جمع آوری و مطالعه شدند. پس از مطالعه ی پژوهش های انجام شده و برداشت از آن ها، تجهیزات آزمایشگاهی مربوط که می تواند بهترین نتایج را ارائه کند مورد بررسی قرار گرفت. پس از آن بلوک های سنگ ژئولیت و سنگ گرانیت مغزه گیری شدند و طبق نوع آزمایش مربوطه نمونه های از آن ها آماده سازی شدند. سپس منحنی رفتاری تنش کرنش سنگ و همزمان منحنی تنش انتشار آوایی تحت بارگذاری فشار تک محوره نمونه سنگ آزمایش بدست آمد. بطوریکه نمونه ی سنگ ژئولیت و سنگ گرانیت در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه صنعتی شاهرود، حدود ۲۵ بار مورد آزمایش قرار گرفت و به نمونه بار اعمال شد، همزمان با انجام آزمایش فشاری به نمونه سنسور متصل شد تا آزمایش انتشار آوایی نیز انجام شود و سیگنال ها ثبت شوند سپس منحنی تنش - کرنش ترسیم شد و سیر شکست مورد بررسی قرار گرفت. پس از آن منحنی های بار بحسب هر یک از پارامترهای انتشار آوایی ترسیم شد. از تفسیر منحنی ها، ارتباط پارامترهای مختلف انتشار آوایی (انرژی، دامنه، شمارش، زمان خیز و مدت زمان دوام) با روند شکست سنگ بیان شد. نمونه های سنگی که تحت بارگذاری قرار گرفتند متناسب با میزان تنش اعمال شده در سیر و فرآیند شکست در نواحی مختلف انسداد ترکها، الاستیک و پلاستیک و ایجاد و توسعه ترکها و در نهایت شکست سنگ انتشار آوایی متفاوتی داشتند. در این تحقیق ارتباط و همبستگی پارامترهای مختلف انتشار آوایی و مکانیزمهای ایجاد شکست تحت حالتها و شرایط مختلف آزمایش فشاری تک محوره و برزیلین مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در آزمونهای انجام شده مقدار b-value برای بررسی مکانیزم شکست نیز محاسبه

و نمودار مربوطه ترسیم شد. سپس به تحلیل حالت غالب شکست با استفاده از نمودار مربوط به آن پرداخته شد. در ادامه ارتباط پارامترهای آوایی با هم با استفاده از تحلیل های پارامتری انجام گردید و برای بررسی دقیق تر، نمونه را تحت آزمایش برزیلین و همچنین نمونه هایی که پیشتر بارگذاری شده بودند و تحت بارگذاری مجدد همراه با اندازه گیری انتشار آوایی نیز قرار گرفتند. تمام کارها انجام شده تکرار شد تا در پایان نتایج بدست آمده از آزمایشهای مختلف مقایسه شوند.

#### ۴-۱- ساختار تحقیق

تحقیق حاضر در ۵ فصل تنظیم شده است، که در ادامه به اختصار توضیح داده می شود:

فصل اول شامل بیان کلی مسئله مورد بررسی، ضرورت و اهداف تحقیق است.

در فصل دوم ابتدا تعاریف اولیه ای از مکانیک شکست و مکانیک آسیب و کاربرد آن در مطالعه رفتار مواد ترد مورد آورده شده است. سپس به تشریح کامل روش انتشار آوایی، نحوه داده برداری و رفتارنگاری به وسیله دستگاه انتشار آوایی پرداخته شده است. سپس روش های بررسی تحلیل پارامتری ارائه شده است در پایان به بیان مزایا و محدودیت های روش انتشار آوایی پرداخته شده است.

در فصل سوم به بیان سابقه پژوهش های مرتبط با این تحقیق پرداخته شده است.

در فصل چهارم به بیان شرح روند کار و انجام آزمایشات آزمایشگاهی روی نمونه ها و نتایج حاصل از آزمایش ها پرداخته شده است.

در فصل پنجم با عنوان "نتایج و پیشنهادات" به بیان نتایج قابل توجه هدف این تحقیق پرداخته شده و پیشنهاداتی برای تحقیقات بعدی ارائه شده است.

# فصل دوم: کاربرد آزمون انتشار آوایی در رفتار نگاری شکست سنگ

## ۲-۱ مقدمه

در ابتدا توضیح مختصری از اصول اولیه علم مکانیک شکست و مکانیک آسیب ارائه شده است تا با استفاده از آن نقش عوامل مؤثر در شروع آسیب و گسترش و ترک و شکست مواد ترد مورد بررسی قرار گیرد. در ادامه با ذکر روش‌های رفتارنگاری به توضیح و بررسی روش انتشارآوایی پرداخته و پارامترهای مؤثر در رفتارنگاری با استفاده از این روش مورد بررسی واقع شد.

## ۲-۲ مکانیک شکست

یکی از جنبه‌های جدید مطالعاتی در حوزه مکانیک سنگ تحقیق روی مکانیک شکست و روش‌های تحلیل و بررسی آن است.

بررسی مکانیک شکست شامل موارد زیر است (عرب نژاد، ۲۰۱۶):

- ۱- ارزیابی و بررسی تغییر شکل، شکست و رفتار بعد از شکست سنگ با استفاده از مدل سازی اجزای تشکیل دهنده ساختار سنگ
- ۲- بررسی تغییر شکل‌های غیر خطی
- ۳- بررسی ریز ساختارهای سنگ و ارتباط آن‌ها با تغییر شکل و حالت شکست
- ۴- انجام مطالعات عددی، تئوری و آزمایشگاهی روی مکانیک شکست
- ۵- تحقیق و بررسی میزان تاثیرگذاری بار دینامیکی و استاتیکی بر روند و رفتار شکست

سنگ‌ها همواره بکر و سالم نیستند، بلکه بعضی از سنگ‌ها ناهمسانگرد بوده و کانی‌شناسی متنوعی دارند. یک سنگ ممکن است دارای ترک‌ها، فضاهای خالی و درزه‌ها و دیگر نقص‌ها باشد. براساس نظریه مکانیک شکست زمانی که تنش برشی موضعی بر مقاومت برشی غلبه کند ریزترک به وجود می‌آید. با تولید، گسترش و به هم پیوستگی ریز ترک‌ها، ترک‌ها و شکستگی‌های بزرگ شکل می‌گیرند و در نهایت این ترک‌ها و شکستگی‌ها سبب شکست سنگ می‌شوند. همچنین با افزایش

میزان تنش، ترک های جدید به وجود می آیند که ناشی از برهم کنش و ترکیب ترک های کوچک دیگر می باشد. لذا اطلاع از برهم کنش و ترکیب ترک ها برای فهم سازوکار شکست در سنگ ضروری می باشد (سجادی و سید عبدالکریم، ۲۰۱۴).

## ۳-۲ مفهوم شکست

در مکانیک سنگ، شکست دارای مفاهیم مختلفی می باشد اما مفهوم اصلی آن را می توان بدین صورت تعریف کرد که شکست عبارت از فرایندی است که جسم در آن از یک حالت به حالت دیگر تغییر رفتار می دهد. به طور مثال اگر جسمی از حالت الاستیک به پلاستیک یا بر عکس تبدیل شود نوعی شکست در آن رخ داده است (سجادی و سید عبدالکریم، ۲۰۱۴).

شکست انواع مختلفی دارد که در زیر هر یک از آن ها را شرح خواهیم داد:

۱- تسلیم

۲- ترکیدن

۳- گسیختگی

۴- مقاومت

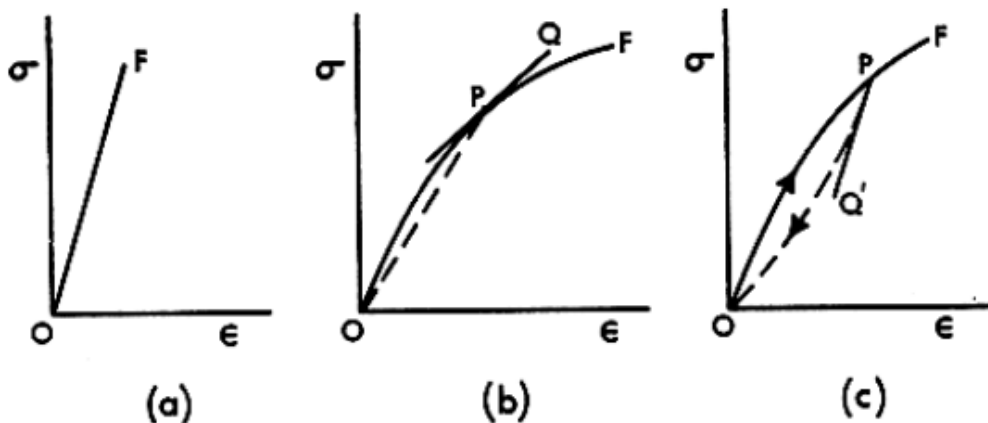
تسلیم: این نوع شکست زمانی اتفاق می افتد که سنگ حالت الاستیک خود را از دست داده باشد و به حالت شکل پذیر تبدیل شود.

ترکیدن: این نوع شکست فرآیندی است که طی آن در ماده صفحات و یا سطوح جدیدی به صورت شکاف و یا ترک تشکیل شود و یا سطوح ترک های موجود افزایش یابد.

گسیختگی: نوعی از شکست است که طی آن سنگ به دو یا چند قسمت مجزا تقسیم می شود.

(سجادی و سید عبدالکریم، ۲۰۱۴)

مقاومت: نوعی شکست است که در آن ظرفیت تحمل بار سنگ و یا نمونه از یک حالت افزایشی تدریجی به کاهش تدریجی تغییر می یابد.



شکل ۱-۲: منحنی مقاومتی سنگ (سجادی و سید عبدالکریم، ۲۰۱۴)

مطابق شکل (۲-۱)، برای بیشتر سنگ های مقاوم منحنی تنش - کرنش سنگ تقریباً خطی بوده (الاستیک خطی) که با شکست و یا گسیختگی در نقطه F به پایان می رسد (شکل a).

در صورتی که منحنی تنش - کرنش ماده ای غیر خطی بوده و مسیر منحنی بار گذاری و باربرداری در آن یکسان باشد آن را ماده الاستیک کامل می نامند (شکل b).

واژه بارگذاری به روند رو به افزایش تدریجی تنش وارده به نمونه سنگ و باربرداری به روند کاهش تدریجی بار به نحوی که در آزمایشگاه صورت می گیرد اطلاق می شود.

بدیهی است در شرایط فوق تمام انرژی ذخیره شده در نمونه در جریان بارگذاری در موقع برداشت بار آزاد می شود و هیچگونه اتلاف انرژی صورت نمی گیرد.

در صورتی که پس از بارگذاری با برداشت بار تا رسیدن تنش به مقدار صفر تغییر شکل های حاصل در نمونه نیز به صفر برسد ولی مسیر منحنی بارگذاری و باربرداری تنش - کرنش در نمودار متفاوت باشد (شکل c).

اینگونه رفتار سنگ به وارفتگی<sup>۱</sup> موسوم بوده که نشان دهنده زیاد بودن کار انجام شده بر روی نمونه در حین بارگذاری در مقایسه با کار انجام شده در باربرداری است. این پدیده نشان دهنده اتلاف و یا استهلاک انرژی در جسم مورد آزمایش است.

بایستی توجه داشت که در تمامی موارد فوق پس از برداشت بار و رسیدن تنش به صفر، تغییر شکل ها نیز به صفر کاهش می یابد (سجادی و سید عبدالکریم، ۲۰۱۴).

### ۲-۳-۱- معیارهای شکست در مکانیک شکست

در رابطه با دیدگاه مطرح شده در زمینه توجیه مکانیزم شکست در مواد با خواص مختلف دو دیدگاه عمده مطرح بوده است اما بعد از مطالعات صورت گرفته در رابطه با ناحیه شکست و توسعه روابط الاستیک غیر خطی معیار دیگری نیز مطرح گردید که در ادامه این معیارها ذکر می گردد: ( قاجار، ۱۳۸۸)

### ۲-۳-۱-۱- معیار تعادل انرژی

بر اساس این معیار وقتی یک ترک شروع به رشد می نماید، افزایشی در سطوح اطراف ترک به وجود می آید. این افزایش سطح برای فائق آمدن بر نیروی پیوستگی ذرات به انرژی نیاز دارد یا به عبارتی دیگر یک افزایش در انرژی سطحی نیاز است. منبع تامین کننده این انرژی سطحی، انرژی کرنشی الاستیکی است که با پیشرفت ترک آزاد می شود. روش تعادل انرژی مطرح شده توسط گریفیث مبنای ارائه و توسعه مکانیک شکست الاستیک خطی<sup>۲</sup> می باشد. گریفیث معیار زیر را برای گسترش یک ترک عنوان کرد:

"ترک وقتی شروع به رشد می کند که کاهش یا آزاد شدن انرژی کرنش الاستیک ماده حداقل برابر با جذب انرژی لازم برای ایجاد سطح ترک جدید باشد". بر اساس این معیار، مواد ترد زمانی دچار شکست می شوند که سرعت آزاد شدن انرژی کرنشی الاستیک حداقل برابر با سرعت جذب انرژی

<sup>1</sup>slaking

<sup>2</sup>- Linear elastic fracture mechanics

سطحی باشد. از این معیار برای تعیین مقدار تنش کششی لازم برای گسترش یک ترک در یک ماده ترد می‌توان استفاده کرد (قاجار، ۱۳۸۸).

## ۲-۳-۱-۲- معیار تنش

اگر چه روش تعادل انرژی دید وسیعی نسبت به فرآیند شکست ایجاد می‌نماید اما روش دیگری نیز وجود دارد که حالت تنش در نزدیکی ریز ترک را مستقیماً بررسی می‌نماید و اثبات شده است که در کارهای مهندسی مفیدتر است. روش شدت تنش بر اساس روابط مکانیک شکست الاستیک خطی توسعه داده شده است اما مبنایی برای ارائه و توسعه مکانیک شکست الاستو پلاستیک یا الاستیک غیر خطی<sup>۱</sup> نیز می‌باشد (قاجار، ۱۳۸۸).

به طور خلاصه بر اساس دو معیار ذکر شده، رشد ترک هنگامی رخ می‌دهد که:

- تنش در نوک ترک به تنش بحرانی  $\sigma_c$  رسیده باشد.

- کرنش در نوک ترک برابر مقدار بحرانی آن شود.

بنابر این دو معیار شدت تنش و تعادل انرژی معادل همدیگر بوده و هر دو به طور همزمان کامل می‌شوند. یعنی اگر یکی از معیارها برقرار شود، معیار دیگری نیز برقرار است. نکته قابل توجه دیگر تفاوت نیروهای مقاوم در برابر رشد ترک در مواد نرم و شکل‌پذیر مانند فلزات با مواد خیلی ترد می‌باشد. به طوری که در مواد ترد انرژی مورد نیاز جهت رشد و گسترش ترک، صرف غلبه بر نیروی سطحی میشود در حالی که در مواد نرم و شکل‌پذیر عمده انرژی، صرف تشکیل ناحیه پلاستیک در نوک ترک می‌شود. لازم به توضیح است که در مواد شکل‌پذیر، مقدار انرژی لازم برای غلبه بر تغییر شکل پلاستیک در نوک ترک، بسیار بزرگتر از انرژی لازم جهت غلبه بر انرژی سطحی می‌باشد به طوری در محاسبات قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد.

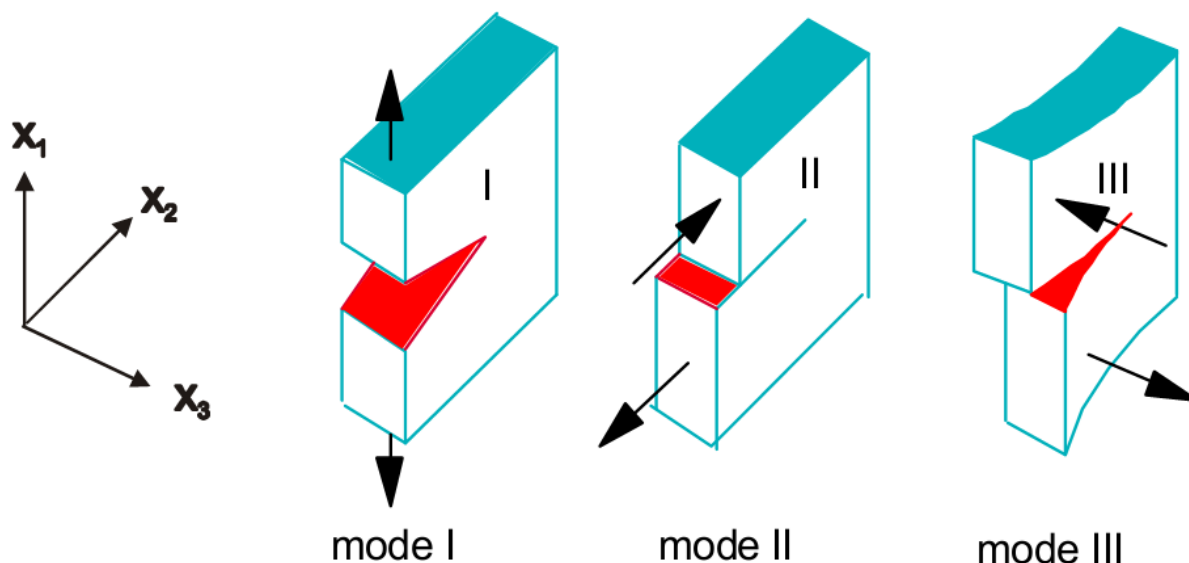
نتایج حاصل از این دو تئوری به قرار زیر می‌باشد:



۱. شکست در یک جسم زمانی اتفاق می‌افتد که فاصله تعادلی میان ذرات یک جسم بر اثر اعمال بار خارجی از حالت تعادلی بیشتر شده و در یک مرحله حتی با ثابت ماندن بار خارجی این روند افزایش فاصله همچنان ادامه یابد.
  ۲. بر اساس تئوری تعادل انرژی، ترک وقتی شروع به رشد می‌کند که کاهش یا آزاد شدن انرژی کرنش الاستیکی ماده حداقل برابر با جذب انرژی لازم برای ایجاد سطح ترک جدید باشد.
  ۳. تئوری تعادل انرژی از آنجا که در گسترش مبنای خود از مفهوم ملموس انرژی بهره می‌برد، در پایه ریزی نظریه‌های دانش نوین در دانش مکانیک شکست بسیار تواناست.
  ۴. بر مبنای تئوری شدت تنش، تمرکز تنش در نوک ترک عامل رشد ترک می‌باشد به شرطی که این تمرکز تنش از یک حد بحرانی که معرف چقرمگی نمونه می‌باشد تجاوز نماید. این حد بحرانی که از ویژگی‌های ذاتی نمونه است از جنس همان تمرکز تنش می‌باشد.
  ۵. رویکرد شدت تنش از آن رو که مستقیماً به میدانهای تنش می‌پردازد، مطلوب تحلیل‌گران سازه بوده و بسیار کاربردی است. با این حال این دیدگاه در پایه ریزی نظریه‌های نوین در دانش مکانیک شکست، چندان توانمند نیست.
  ۶. تغییرات انرژی کرنشی (G) به ازای افزایش طول ترک، رفتار موضعی کلی را توصیف می‌کند. در حالی که ضریب شدت تنش (K) کرنش‌ها و جابجایی‌های اطراف ترک را تعیین می‌کند و لذا یک پارامتر محلی می‌باشد.
- دو معیار ذکر شده در بالا به عنوان معیارهای مکانیک شکست الاستیک خطی معرفی می‌شوند و برای کاربرد در مواد با استحکام بالا که ناحیه پلاستیسیته جلوی ترک در مقایسه با طول ترک کوچک است معتبر می‌باشند اما در مواد با استحکام پایین یا چقرمگی بالا کاربرد ندارند. معیار بازشدگی ترک، برای بررسی این حالت توسعه داده شده است (قاجار، ۱۳۸۸).

## ۲-۳-۱-۳- معیار بازشدگی ترک

این معیار، معیار الاستوپلاستیک یا معیار مکانیک شکست الاستیک غیرخطی نامیده می شود که با استفاده از تعریف دو پارامتر بازشدگی ترک و انتگرال (J) به تشریح شکست مواد می پردازد. در دانش مکانیک شکست از تغییر شکل های موجود در نواحی اطراف ترک به عنوان عاملی برای شناخت نوع شکست و چگونگی گسترش آن بهره برده می شود. تغییر شکل های مزبور را می توان در دو دسته کلی، تغییر شکل های در صفحه ترک و تغییر شکل های عحالتی بر صفحه ترک تقسیم بندی نمود. عوامل تغییر شکل ها در صفحه، در برگیرنده بازشوندگی نوک ترک و لغزش در صفحه ترک می باشند. از سوی دیگر، لغزش خارج از صفحه ترک به عنوان تغییر شکل عحالت بر صفحه فرض می گردد. برای حالات دیگر شکست معیارهای مختلفی با کار بر روی نمونه های سنگی و بتنی توسط افراد مختلف ارائه شده است. در تئوری های شکست حالت ترکیبی، مسئله از دو جنبه مورد توجه قرار گرفته است. در نخستین گام، راستای گسترش ترک مشخص شود. از سوی دیگر، شرط ایجاد ناپایداری و رشد ترک نیز به عنوان دومین عامل کلیدی فرض می شود. بنابراین، شکست حالت ترکیبی، تابعی از دو متغیر مستقل می باشد. باید افزود، در تمامی تئوری هایی که برای ترکیب تغییر شکل های حالت های I و II ارائه شده است، شرط ایجاد ناپایداری و رشد ترک تنها در حالت تغییر شکل I فرض می گردد. دلیل این موضوع را می توان در تعریف  $K_{Ic}$  به عنوان یکی از مشخصه های مصالح جستجو کرد. انواع ترک ها شامل حالت های I، II و III می باشد که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. حالت I، بازشدگی عحالتی است، اما حالت های II و III حالت های لغزشی هستند (قاجار، ۱۳۸۸).



شکل ۲-۲: حالت های شکست (کشش ، برشی و پارگی) (قاجار، ۱۳۸۸)

## ۲-۴- آسیب و مکانیک آسیب<sup>۲</sup>

آسیب در مواد قبل از گسیختگی رخ می‌دهد به طوری که قابل رؤیت نمی‌باشد و شکست به عنوان فرآیندی که مرتبط به مقدار بحرانی بار، تنش، کرنش و زمان بوده و تغییر شکل سنگ یکی از مفاهیم بسیار مهم در مشخصه مکانیکی سنگ است. با توسعه مکانیک آسیب، مطالعه قانون ارزیابی آسیب و مکانیسم گسیختگی به طور موفقیت آمیزی انجام شده و شرح مدل‌های بنیادی از مکانیک آسیب برای مواد ترد و نرم پیشنهاد شده است (Lemaitre, 2012). کمی سازی اثرات آسیب بر روی مشخصه‌های مکانیکی ماده توسط پارامتر آسیب به عنوان علم مکانیک آسیب نامیده شده است. این اثرات شامل کاهش سفتی الاستیک، ایجاد آنیزوتروپی، کرنش غیر الاستیک و کاهش چسبندگی می‌باشد. تئوری آسیب، شرح کاملی از رفتار ماده بین حالت طبیعی و حالت گسیخته شده ناشی از شکست را دارا می‌باشد. مکانیک آسیب کمی سازی را با متغیر حالت داخلی پیوسته که آسیب نام دارد، انجام می‌دهد و به عنوان اندازه گیری پیوسته از وضعیت داخلی ماده در نظر گرفته شود. مفهوم اندازه‌گیری پیوسته از آسیب به طور گسترده برای شرح انواع مختلفی از

1-Damage  
2-damage mechanic

گسیختگی در فلزات و انواع دیگر جامدات استفاده شده است (Lemaitre, 2012). یکی از ساده‌ترین رابطه‌ها قانون آسیب الاستیک خطی تک محوره با فرض تنش معادل می‌باشد، که به صورت معادله ۱-۲ تعریف می‌شود (Lemaitre, 2012):

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{(1-D)E} \quad 1-2$$

$\varepsilon_e$  = کرنش الاستیک یا کرنش مؤثر

$\sigma$  = تنش یک محوره

D = آسیب

E = مدول الاستیک یا مدول یانگ

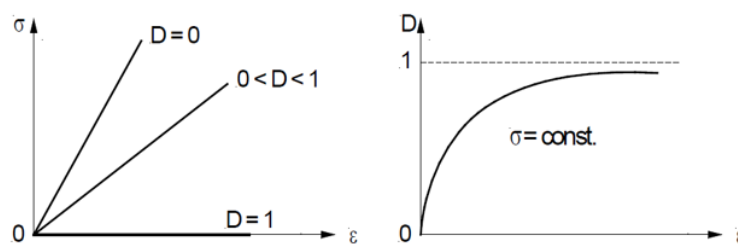
در نتیجه آسیب برای هر نوع سنگ در شکست ترد، تاثیر قابل توجهی بر روی رفتار ماده دارد.

قانون الاستیک در ماده آسیب دیده به صورت معادله ۲-۲ با فرض کرنش معادل نیز تعریف می‌شود (Lemaitre, 2012).

$$\sigma^* = E(1-D)\varepsilon \quad 2-2$$

$\sigma^*$  = تنش مؤثر

شکل ۲-۴ تغییرات مقدار پارامتر آسیب را همراه با منحنی تنش بر حسب کرنش را نشان می‌دهد که برای نمونه کاملاً سالم مقدار پارامتر صفر و برای حالت کاملاً آسیب دیده یک و در آخر برای حالت مزو مقدار پارامتر بین صفر و یک می‌باشد.



شکل ۲-۳: نمایش رابطه تنش- کرنش برای ماده سالم و آسیب دیده و توسعه آسیب بر حسب تغییر شکل تحت بار

ثابت (Lemaitre, 2012)

آسیب در سنگ در یک ناحیه مغشوش شده ناشی از تشکیل و یکپارچگی ریزترکها بیان می‌شود. در طول بارگذاری، ناحیه مغشوش شده از ریز ترکها به ترک اصلی تبدیل شده و به صورت یک ناپیوستگی مجزا در می‌آید. در این مرحله مفهوم مکانیک شکست، به منظور بررسی رفتار سنگ به کار می‌رود. روشی که در ارتباط مکانیک آسیب و مکانیک شکست توسعه یافته است، مفهوم تعادل انرژی می‌باشد. در واقع مکانیک شکست با تعریف پارامترهای تنش-کرنش به مطالعه رفتار شکست مواد در اطراف نوک ترک و در سطح ماکرو می‌پردازد. مکانیک آسیب با تعریف متغیر آسیب در سطح مزو و میکرو نحوه شروع آسیب داخلی را بررسی می‌کند که برای جلوگیری از شکستگی بزرگ مقیاس مفید می‌باشد. در واقع علم مکانیک شکست تنها به بررسی اثرات وجود ترک در سازه می‌پردازد و درباره‌ی نحوه‌ی ایجاد ترک اولیه صحبت نمی‌کند.

## ۲-۵- روش های بررسی روند شکست سنگ

### ۲-۵-۱- منحنی تنش - کرنش سنگ

شکست سنگ یک فرآیند بسیار پیچیده است که با استفاده از منحنی تنش - کرنش تحت آزمون فشاری تک محوره توصیف می‌شود. رفتار واقعی سنگ را می‌توان بشرح زیر و با استفاده از منحنی کامل تنش - کرنش سنگ توصیف کرد.

هنگامی که سنگ تحت بار فشاری قرار می‌گیرد. چهار مرحله‌ی تغییرشکل را برای آن می‌توان بیان کرد. (شکل ۲-۴) : (الف) تغییرشکل شبه‌الاستیک<sup>۱</sup>، ممکن است به مقدار ناچیزی وارفتگی در رفتار سنگ مشاهده شود ولی می‌توان تقریباً رفتار سنگ را الاستیک در نظر گرفت یعنی در جریان بارگذاری و برداشت بار تغییرات غیر قابل برگشت در ساختمان و خصوصیات سنگ صورت نگرفته است. در این مرحله اگر تنش برداشته شود، نمونه به شکل و اندازه ابتدایی خود باز می‌گردد. نمودار تنش- کرنش خطی است. (ب) تغییرشکل الاستوپلاستیک<sup>۲</sup>: در این مرحله هنگامی که تنش از حد الاستیک ( $\sigma_e$ ) عبور می‌کند، اگر بار برداشته شود، فقط بخشی از نمونه به شکل اولیه خود باز می‌گردد. (ج) جریان پلاستیک<sup>۳</sup>؛ تنش بین شکست ( $\sigma_f$ ) که تحت شرایط تنش تک محوری برابر با مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ ( $\sigma_c$ ) است، و تنش مرحله‌ی متلاشی شدن ( $\sigma_d$ ) در مرحله پلاستیک روی می‌دهد. در این مرحله هنگامی که نرخ کرنش در حال افزایش است، تنش زیاد نمی‌شود. (د) متلاشی شدن<sup>۴</sup>؛ اگر بارگذاری ادامه یابد، یک یا بیش از یک شکست بوجود می‌آید و در نهایت ماده با کاهش سریع تنش به مقدار تنش باقیمانده ( $\sigma_r$ )، برابر استحکام باقیمانده‌ی سنگ، گسیخته می‌شود.

با توجه به بحث فوق حال می‌توان به چند تعریف اساسی پرداخت:

الف: حالت شکل پذیری و یا شکل پذیر: به ماده ای اطلاق می‌شود که تحت شرایطی بتواند دگر شکلی پایداری را بدون از دست دادن قابلیت تاب آوری خود در زیر بار تحمل کند.

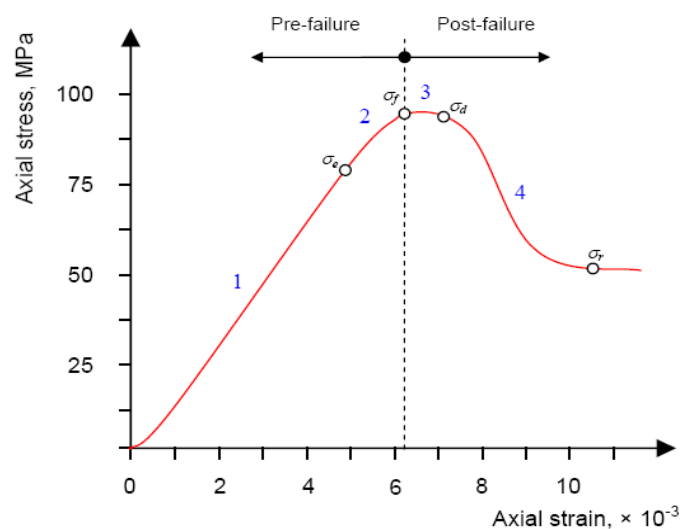
ب: حالت شکننده و یا شکننده: به ماده ای اطلاق می‌شود که تحت شرایطی قابلیت تاب آوری در زیر بار با افزایش دگر شکلی کاهش یابد.

1 - Quasi-elastic deformation

2 - Elasto-plastic deformation

3 - Plastic flow

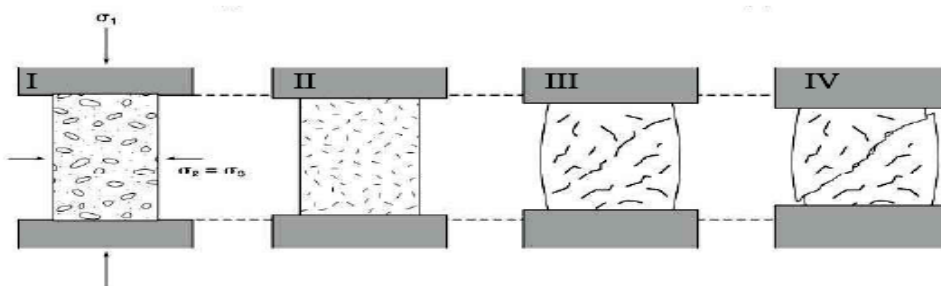
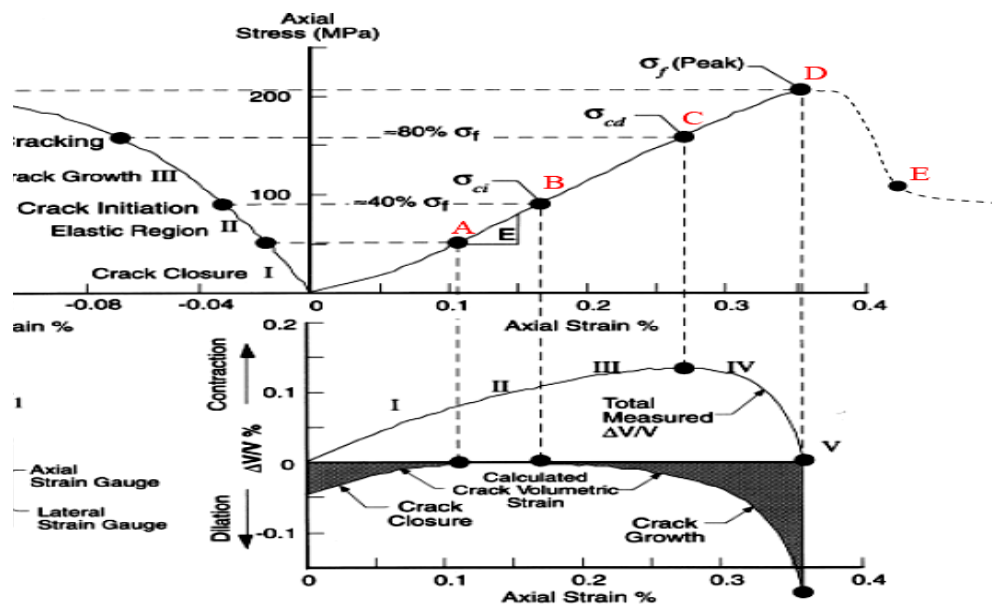
4 - Disintegration



شکل ۲-۴: دیاگرام شماتیک تنش- کرنش یک نمونه‌ی سنگ تحت فشار تک‌محوری (Molladavoodi et al., 2011)

ترد بودن و شکنندگی یک سنگ را می‌توان بوسیله‌ی رفتار آن بین تنش شکست و تنش متلاشی شدن تعیین کرد. بازه‌ی کوچک نمایانگر مواد ترد است درحالی‌که یک سنگ شکل‌پذیر دارای بازه جریان پلاستیک زیاد است. وجود تغییرشکل غیرالاستیک سنگ‌ها به علت ایجاد و رشد ترک‌ها، به‌طور گسترده‌ای مورد پژوهش قرار گرفته است. براساس مطالعه‌های آزمایشگاهی که با رفتار تنش- کرنش مواد سروکار داشته‌اند، فرآیند گسیختگی می‌تواند به یک تعداد از مراحل که با ثبت تغییرات در اندازه کرنش محوری و عرضی در هنگام آزمایش‌های فشاری تک‌محوری (یا چند محوری) مشخص می‌شوند، تقسیم شود. این مراحل به ترتیب شامل بسته‌شدن ترک<sup>۱</sup>، تغییر شکل الاستیک خطی<sup>۲</sup>، شروع ترک<sup>۳</sup> و رشد پایدار ترک، آسیب ترک و رشد ناپایدار ترک و گسیختگی و رفتار بعد از اوج است (Molladavoodi et al., 2011) این مراحل در شکل (۲-۵) ارایه شده‌اند.

1 - Crack closure  
2 - Linear elastic deformation  
3 - Crack initiation



شکل ۲-۵: مراحل بوجود آمدن ترک (Caz et al., 2014)

بسته شدن ترک در ابتدای بارگذاری رخ می‌دهد، هنگامی که ترک‌های موجود که در یک زاویه مناسب نسبت به بار اعمالی جهت‌دهی شده باشند، بسته می‌شوند. در هنگام بسته شدن ترک، پاسخ تنش-کرنش غیرخطی است (مقعر رو به بالا)، که نشانگر افزایش در صلبیت (سختی) است. هنگامی که اکثریت ترک‌ها بسته شده‌اند، تغییر شکل الاستیک رخ می‌دهد (نقطه‌ی A)، که شامل تغییر شکل در خلل و فرج و تراکم ذرات دانه‌ها است. سطح تنش حدود  $\sigma_c$  ۳/۴ - ۰/۰ تا  $\sigma_c$  مقاومت تراکم تک محوری سنگ و نقطه‌ی B، تنش آغاز ترک  $\sigma_{ci}$  است) بوسیله‌ی جوانه‌زنی<sup>۱</sup> ریزترک‌های<sup>۲</sup> جدید در نقاط با بیش‌ترین تنش، در داخل سنگ که معمولاً حوالی وسط نمونه است، مشخص می‌شود (گودمن

<sup>۱</sup> - Nucleation

<sup>۲</sup> - Microcracks



۱۹۸۰). این فرآیند بوسیله‌ی رشد پایدار ریزترک‌ها در جهت عحاتت بر تنش اصلی کوچک‌تر ادامه می‌یابد. پایداری رشد ترک به معنی آن است که با هر نمو در بار اعمالی، ترک‌ها به یک اندازه محدود رشد می‌کنند و سپس رشد ترک متوقف می‌گردد. پس از آن‌که بارگذاری به مرحله‌ی الاستو-پلاستیک رسید (نقطه‌ی C، تنش آسیب ترک  $\sigma_{cd}$ )، ترک‌ها شروع به رشد بصورت غیرقابل کنترل (رشد ناپایدار) می‌کنند تا زمانی که با ترک دیگر، خلل و فرج و یا هر فضای خالی دیگر برخورد کنند. بنابراین شبکه‌ای از ترک‌های متصل شده بوجود می‌آید. با افزایش بار، ترک‌ها به هم متصل شده و یک سطح شکستگی (شکاف) را تشکیل می‌دهند که معمولاً آن را صفحه‌ی شکست می‌نامند (نقطه‌ی D، تنش شکست  $\sigma_f$ ). رفتار پس از شکست با ترک‌های بزرگ که از اتصال داخلی ریزترک‌ها بوجود آمده‌اند، سروکار دارد (بین نقاط E و D) که لغزش اصطکاکی ماده‌سنگ بر روی ترک‌های بزرگ<sup>۱</sup> را به دنبال دارد (از نقطه‌ی E)، شکل (۲-۵). (Cai et al., 2014).

## ۲-۵-۲- آزمون‌های غیرمخرب

به مجموعه‌ای از روش‌های ارزیابی و تعیین خواص ماده، دستگاه و قطعات گفته می‌شود که هیچ تغییری در ساختار آن‌ها ایجاد نکند. با بهره‌گیری از این روش‌ها می‌توان علاوه بر تشخیص بعضی از خواص فیزیکی و شیمیایی، ناپیوستگی‌ها، تغییرات ساختاری درون قطعات و ادوات را بدون نمونه برداری و تخریب، شناسایی و ارزیابی نمود. این نوع آزمایش‌ها با قابلیت‌های خاص در اکثر شرایط جغرافیایی و جوی قابل استفاده می‌باشند. این آزمون‌ها دارای کاربرد وسیعی در بسیاری از صنایع هستند. رشد ترک در سنگ رفتار پیچیده دارد و دانش نحوه ایجاد، ترکیب و توسعه ریز ترک یکی از موارد الزامی برای پی بردن به رفتار سنگ‌های شکننده تحت بارگذاری است. در دهه‌های گذشته مطالعات بیشتر محققین در این زمینه تمرکز بر روی مکانیزم توسعه ترک و به دست آوردن حالت 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 عکس برداری و فیلم

<sup>۱</sup> - Macro-cracks

برداری با فریم بالا، رفتار نگاری التراسونیک، روش های لرزه ای، روش های مقطع نگاری کامپیوتری و روش انتشار آوایی از جمله این روش ها به شمار می روند (Boogaard and van Dijk 2012; Scherbatskoy, 1960).

## ۲-۵-۲-۱- آزمون انتشار آوایی

وقتی که ماده ای جامد تحت تنش باشد، عیوب موجود در آن باعث ایجاد امواج صوتی با بسامد بالا می گردند. این امواج در ماده منتشر شده و می توان توسط حسگرهای خاصی آنها را دریافت کرد و با تجزیه و تحلیل این امواج می توان نوع عیب، مکان و شدت آن را تعیین نمود. آزمون انتشار آوایی یک روش نوین در زمینه آزمون های غیر مخرب است. از این روش می توان برای تشخیص و موقعیت یابی عیوب مختلف در سازه های تحت بار و اجزای آنها استفاده کرد. تخلیه سریع انرژی از یک منبع متمرکز در درون جسم باعث ایجاد امواج الاستیک گذرا و انتشار آنها در ماده می شود. این پدیده را آوایی آوایی (انتشار آوایی) می نامند. با توجه به انتشار امواج از منبع تا سطح ماده، می توان آنها را توسط سنسورهای ثبت کرد و از این طریق اطلاعاتی در مورد وجود و محل منبع انتشار امواج به دست آورد. این امواج می توانند فرکانسهایی تا چند مگاهرتز داشته باشند. برای دریافت سیگنال ها از سنسورهای پیزوالکتریک در محدوده ۲۰ کیلوهرتز تا ۱ مگاهرتز استفاده می شود و فرکانسهای متداول در این روش در محدوده ۱۵۰ - ۳۰۰ کیلو هرتز هستند. دستگاه های مورد استفاده با توجه به نوع کاربردشان می توانند به صورت یک دستگاه کوچک قابل حمل تا یک دستگاه بزرگ ده ها کانال باشند. یک سنسور منفرد به همراه ابزارهای وابسته برای دریافت و اندازه گیری سیگنالهای آوایی تشکیل یک کانال آوایی را می دهد. از سیستم چندکاناله برای اهدافی نظیر موقعیت یابی منابع یا آزمون نواحی که برای یک سنسور منفرد خیلی بزرگ است استفاده می شود. اجزایی که در تمامی دستگاه ها برای دریافت سیگنال وجود دارد عبارتند از: سنسور، پیش تقویت کننده، فیلتر و تقویت کنند. (Tobias, 1976)

## ۲-۶- رفتارنگاری پایداری سازه و آزمون های غیر مخرب

رفتار نگاری پایداری سازه اطلاعات دقیق و به موقعی، درباره ی شرایط فیزیکی و کارایی سازه در هنگام بهره برداری فراهم می کند. هدف از رفتار نگاری تعیین رفتار سازه با شبیه سازی به زمان واقعی و نشان دادن موقعیت تقریبی مشکلات روی سازه و اهمیت آن ها است. روش انتشار آوایی عموماً برای بررسی ترک ها و تغییر شکل پلاستیک در فلزات و همچنین برای مطالعه و تحقیق در زمینه سنگ ها و در محدوده گسترده ای از مواد به کار می رود. استفاده از روش انتشار آوایی اخیراً برای تحقیق مواد بتن به خوبی گسترش یافته است. زمینه کاربرد انتشار آوایی با آزمون های آزمایشگاهی شروع شد، و با آزمون برجا در سازه های بزرگ مقیاس ادامه یافته است. بعضی از مدل های آزمایشگاهی می توانند برای تعیین میزان ایمنی و مقایسه آن با سطوح نیازمند در تعیین عمر باقی مانده سازه استفاده شوند. (Balageas, 2006; Boogaad and van Dijk 2012)

انتشار آوایی برای یک دسته عیب در امواج الاستیک زود گذر که با آزاد شدن سریع انرژی از منابع محلی موجود، معمولاً با توسعه ترک ها در داخل ماده بوجود می آیند. عبارت های دیگر که در ادبیات انتشار آوایی به کار می روند شامل انتشار امواج تنش و فعالیت میکرو لرزه ای می باشند. انتشار آوایی در محدوده های کثیری با عارضه های مختلف رخ می دهند. صدای شکسته شدن مداد یک مثال معمولی از انتشار آوایی در مقیاس کوچک و زمین لرزه یک مثال در مقیاس بزرگ از انتشار آوایی می باشد. مکانیزم تولید انتشار آوایی یکسان بوده که با آزاد شدن انرژی الاستیک داخل امواج آوایی به وسیله ی رشد ترک در مواد جامد ایجاد می شود. در مقایسه با روش های دیگر آزمون های غیر مخرب مانند روش فرا صوت روش انتشار آوایی تنها می تواند فرآیند آسیب را پیش کند زیرا سیگنال ها به وسیله گسترش آسیب تولید می شوند و همچنین ماهیت حقیقی انتشار آوایی با آزاد شدن از خود جسم می باشد. بنابراین انتشار آوایی تنها روشی از آزمون های غیرمخرب است که می تواند برای پیش ترک و عیب در طی فرآیند ساخت استفاده می شود. روش های دیگر آزمون

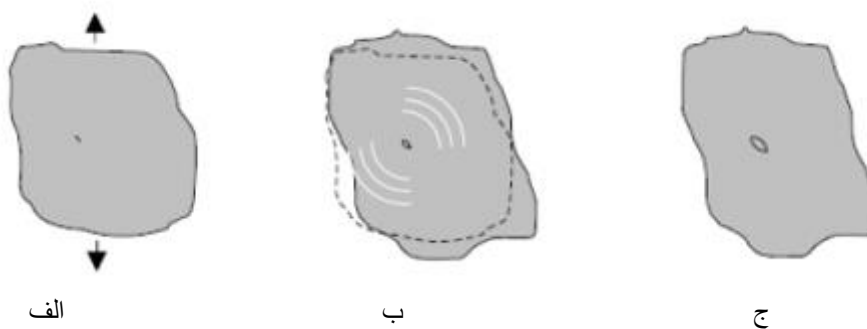
های غیرمخرب نیاز به یک منبع خارجی برای پایش گسیختگی دارند (Boogaad and van Dijk, 2012).

پیشرفت های اخیر در آزمون انتشار آوایی اطلاعاتی در زمان واقعی یعنی زمانی که یک بخش تحت تنش قرار می گیرد و آسیب شروع می شود و همچنین اطلاعاتی در مورد مشخصات کمی و کیفی این مکانیزم ها به ما می دهد.

اثرات بارگذاری زمانی نمایان می شود که ترک های بوجود آمده بر اثر بارگذاری سبب تولید انتشار آوایی شوند. به طور دقیقتر یک میکرو ترک، اتم یا هسته ی تولید شده به وسیله جدایش یک مرز در یک نقطه ضعیف بر اثر تمرکز تنش ها می باشد ( شکل ۲-۶ الف ).

تنش روی مرز زمین به طور ناگهانی از طریق انتشار امواج الاستیک که امواج انتشار آوایی نامیده می شوند، توزیع می شود (شکل ۲-۶ ب ).

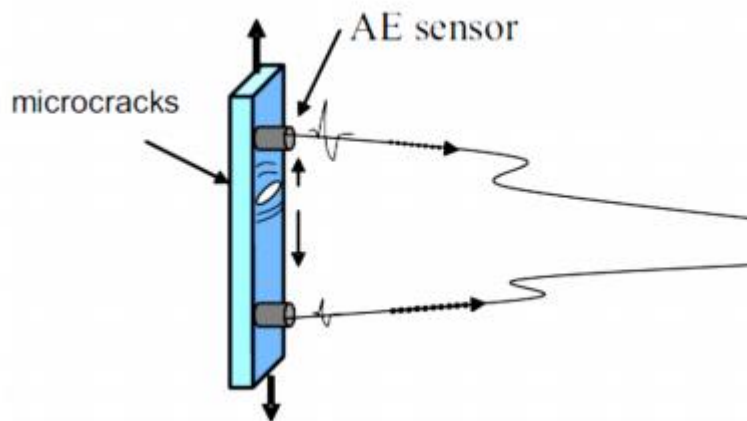
انتهای امواج تنش زود گذر زمانی است که یک وضعیت متعادل در نتیجه فعالیت نیروها در قسمت های ضعیف پدید آید ( شکل ۲-۶ ج ).



شکل ۲-۶: انتشار آوایی بوجود آمده بوسیله تشکیل ریزترک: الف) آغاز ریزترک در یک نقطه

ضعیف ب) باز شدگی ریزترک ج) جلوگیری از انتشار ریزترک (Cartz, 1995).

امواج انتشار آوایی در سرتا سر مواد نزدیک سطح سازه گسترش می یابند و می توان آن ها را به وسیله سنسورهایی که بسته های انرژی کرنشی آزاد شده را به سیگنال های الکتریکی تبدیل می کنند، بررسی کرد. شکل ۲-۷ این اصول را نشان می دهد.



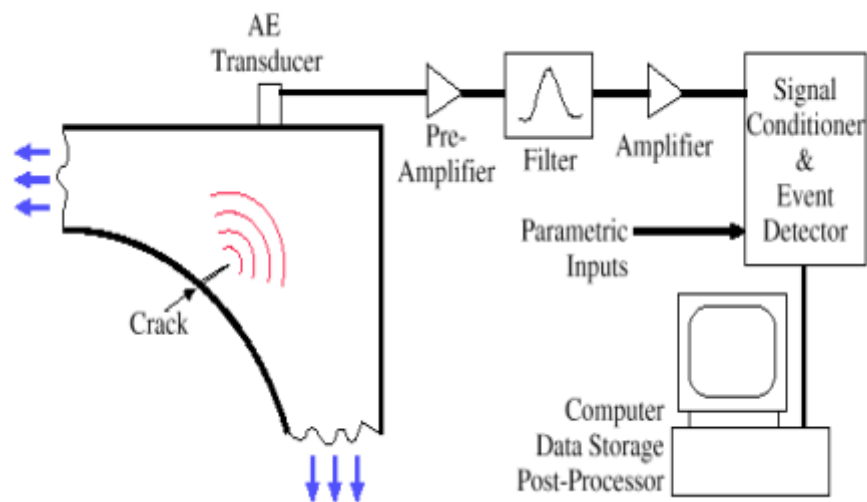
شکل ۲-۷: اصول سنسور انتشار آوایی: موج الاستیک تولید شده توسط تنش مواد (Grosse and Ohtsu, 2008)

انتشار آوایی یک پدیده ی طبیعی است که در محدوده وسیعی از مواد، ساختارها و فرآیندها رخ می دهد. مقیاس بزرگ انتشار آوایی، امواج زمین لرزه ای و مقیاس کوچک آن فرآیندهایی هستند که در طی آزمون های انتشار آوایی مشاهده می شوند مانند جابجایی های کوچکی از مکان ها که بر اثر اعمال تنش به سنگ ها و فلزات رخ می دهند.

انتشار آوایی شبیه به امواج حاصل از زمین لرزه ها که بوسیله ی شکست سنگ در مقیاس مهندسی (انفجار سنگ در معادن) در زمین بوجود می آیند، می باشد. مشخصات عمومی انتشار آوایی همانند موج های حاصل از زمین لرزه ها می باشد، با این تفاوت که دامنه ی آن ها بسیار کوتاه بوده و دارای فرکانس بسیار بالایی هستند. بنابراین رفتار نگاری زمین لرزه ها می تواند کاربرد گسترده ای در انواع مسائل مهندسی سنگ داشته باشد و انتشار آوایی یک روش قدرتمند برای بررسی فرآیند شکست سنگ بوسیله ی تعیین ترک های اولیه با گسیختگی ماکروسکوپی و جستجوی رشد و توسعه ترک ها می باشد. اصول این روش بر این پایه استوار است که با استفاده از یک اوسیلوسکوپ دیجیتالی، شبکه

ای از داده ها کسب می شود و روی تعداد و نرخ رویدادهای انتشار آوایی آنالیزهایی انجام می شود. اغلب اطلاعات ارزشمند انتشار آوایی در منبع قرار دارند که نیاز به ثبت امواج در چند سنسور در هریک می باشد. بنابراین بررسی سیستمی که از چندین شبکه داده کسب شده ابزاری را برای پایش دینامیکی فرآیند شکست فراهم می کند. (Grosse and Ohtsu, 2008)

منبع انتشار آوایی عموماً یک تنش الاستیک در مواد است و بدون تنش، انتشاری وجود ندارد. بنابراین آزمون انتشار آوایی عموماً در طی بارگذاری کنترل شده بر ماده، انجام می شود. مراحل یک آزمون انتشار آوایی در شکل ۸-۲ نشان داده شده است (Mohd, 2013).



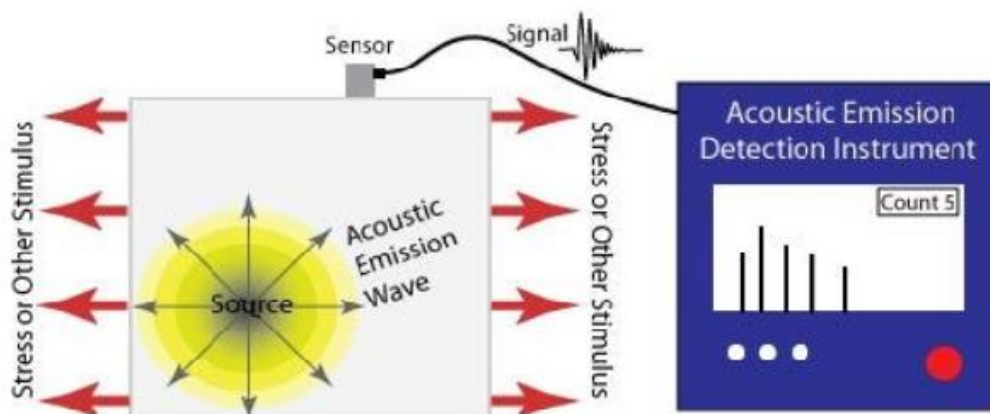
شکل ۸-۲: مراحل یک آزمون انتشار آوایی (Mohd, 2013).

آزمون غیر مخرب روش انتشار آوایی شامل دریافت امواج الاستیک و تحلیل آن ها به منظور برقراری ارتباط بین امواج دریافت شده و تغییرات ایجاد شده بر روی منبع است. با توجه به انتشار امواج از منبع تا سطح ماده، می توان آن ها را توسط سنسور هایی ثبت کرد و از طریق اطلاعاتی در مورد وجود و محل منبع انتشار امواج به دست آورد.

کاربرد این روش تنها برای تحقیق و بررسی خصوصیات و مشخصات مواد، زمین شناسی و تحقیق میکرو ارتعاش ها محدود نمی شود بلکه از این روش می توان برای بازرسی غیر مخرب قطعات، تجهیزات و سیستمهای مختلف و همچنین برای تخمین عمر قطعات و تجهیزات و برای آشکار سازی و مکان یابی تخلیه های جزئی ولتاژ در مبدلهای بزرگ استفاده کرد (Mohd, 2013).

## ۲-۷- اصول بازرسی به وسیله آزمون انتشار آوایی

نیروهای اعمال شده به سنگ باعث تحریک آن و ایجاد تنش های مختلفی می شود. این تنش ها باعث ایجاد منابعی می شود که امواج فراصوتی صادر می کنند. به حوادث فیزیکی که منجر به تولید انتشار آوایی شود رخداد انتشار آوایی گفته می شود. به عنوان مثال می توان به شکل گیری ترک اشاره کرد. مطابق شکل (۹-۲) امواج تولید شده در تمام جهات بدون توقف منتشر می شوند. انتشار این امواج تا سطح سنگ یعنی جایی که سنسورها نصب شده اند ادامه می یابد و به وسیله سنسورها ثبت شده و به سیگنال های الکتریکی تبدیل می شود. به وقوع پیوستن انتشار آوایی و در نتیجه تولید سیگنال های انتشار آوایی است را فعالیت انتشار آوایی می نامند. سیستم انتشار آوایی این سیگنال ها را پردازش می کند و آن ها را به بسته های اطلاعاتی تبدیل می کند. در نهایت اطلاعات آماری نظیر مشخصات و موقعیت منابع، محاسبه شده و به صورت نمودارهای گرافیکی و عددی نمایش داده می شود تا مورد تفسیر قرار گیرند (Scrubby, 1987).



شکل ۲-۹: زنجیره ی فرآیند اصول بازرسی به وسیله آزمون انتشار آوایی (Scrubby, 1987).

می توان این عملیات را طی یک سلسله فعالیت که زنجیره ی فرآیند نام دارد به صورت زیر بیان نمود (Scruby,1987) :

- ۱- قطعه ی آزمون : در اثر بار گذاری های موجود، تنش های مکانیکی در آن شکل گرفته است.
- ۲- مکانیزم منبع : باعث آزاد سازی انرژی الاستیک به صورت امواج می شود.
- ۳- انتشار موج : امواج از منبع تا سنسورهای نصب شده منتشر می شوند.
- ۴- سنسورها : موج مکانیکی را دریافت کرده و به سیگنال الکتریکی انتشار آوایی تبدیل می کنند.
- ۵- قرائت داده : سیگنال های الکتریکی به یک مجموعه داده الکترونیکی تبدیل می شوند.
- ۶- نمایش داده : اطلاعات به دست آمده ثبت می شود بر روی دیاگرام هایی نشان داده می شود.
- ۷- ارزیابی نمایشگر : دیاگرامهای موجود مورد بررسی و تفسیر قرار می گیرند.

## ۸-۲- تفاوت روش انتشار آوایی با سایر روش های NDT<sup>۱</sup>

تفاوت انتشار آوایی با روش های دیگر آزمون های غیر مخرب در دو مورد کلی زیر بیان می شود (Zohora, 2016):

- ۱- سیگنال اصلی آن در خود مواد وجود دارد نه منبع خارجی
- ۲- ردیابی های حرکت نشر صوتی در حالی که بیشتر روش های دیگر ناپیوستگی های هندسی موجود را ردیابی می کنند.

• اغلب در آزمون های غیر مخرب یک روش که قابلیت ارائه ی همه ی راه حل ها را داشته باشد وجود ندارد. برای هزینه ی مناسب، روش مناسب یا هر دو، بهترین راه حل این است

---

<sup>1</sup>Non-Destructive Testing



که از ترکیبی از این روش ها استفاده کنیم زیرا انتشار آوایی خاصیتی دارد که آن را از سایر روش ها متمایز می کند، این خاصیت وقتی مفید است که در ترکیب با آن ها استفاده شود. یک استفاده عمده از بازرسی انتشار آوایی این است که اجازه می دهد تمام حجم سازه بدون دخالت در عملیات بارگذاری بازرسی شود. اسکن ظاهر سازه برای مشخص شدن محدوده ی شکست ضروری نیست فقط ارتباط یک تعداد مناسب از سنسور ها ثابت شده مهم است که معمولاً در فاصله یک تا شش متر از هم به طور جداگانه قرار گرفته اند. معمولاً بازرسی انتشار آوایی برای تشخیص نواحی ای که سازه مشکل دارد مورد استفاده قرار گرفته است و بعد روش های دیگر آزمون های مخرب در تشخیص دقیقتر طبیعت انتشار عیوب استفاده شده است (Finlayson et al., 2001).

- آوایی یک پدیده ی طبیعی است که در محدوده وسیعی از مواد سازه ها و فرآیندها رخ می دهد. بزرگترین مقیاس انتشار آوایی رویدادهای وابسته به زمین لرزه است در حالی که کوچکترین مقیاس فرآیندهایی که با بازرسی انتشار آوایی مشاهده شده حرکات شمار محدودی از ناپیوستگی ها و ترک های موجود در سنگ ها و فلزاتی که تحت تنش قرار گرفته اند، می باشد. در این بین، محدوده وسیعی از مطالعات آزمایشگاهی و آزمون های صنعتی قرار دارد. در آزمایشگاه، بررسی انتشار آوایی یک کمک خوب و نیرومند در آزمون و مطالعه تغییر شکل و شکست مواد است آن یک نشانه ی فوری از پاسخ می گیرد و رفتار یک ماده تحت تنش را در ارتباط با نیرو، عیب و شکست بیان می کند. در حالت کلی بازرسی انتشار آوایی هنگامی که فرآیند تنش های ماده و تولیدات دائمی عیب وجود داشته باشد می تواند مطرح باشد (Finlayson et al., 2001).

- آزمون های انتشار آوایی، هم روی تجهیزات در حال احداث و هم روی تجهیزات در حال سرویس انجام می شود. نوع کاربردها شامل ردیابی ترک، خوردگی، عیوب و جوش و تردی ماده است. در آزمون سازه، موفقیت زمانی بدست می آید که، توانایی ها و کارایی بازرسی

انتشار آوایی به درستی در مفهوم کلی نیازهای بازرسی مشخص شده باشند و روش ها و وسایل مناسب و صحیح در توسعه و روش اجرای آزمون استفاده شده باشند. تجهیزات انتشار آوایی به هر نوع تغییر در مقدار فرکانس عملیات حساسیت بالایی دارند (Finlayson et al., 2001).

- تجهیزات قابلیت علاوه بر ردیابی رشد ترک و تغییر شکل ماده، قابلیت ردیابی فرآیندهایی همچون: انجماد، سایش، ضربه و تبدیل فاز را دارند. هنگامی که این فرآیندها یکسان از قبیل ضربه، فرسایش و مانند آن در جریان یک نمونه بازرسی انتشار آوایی برای ترک یا خوردگی رخ می دهد، آن ها یک منبع نویز ناخواسته تشکیل می دهند. روش های زیادی برای حذف کردن یا گذاشتن تفاوت در مقابل این نویزها و منابع صوتی دیگر توسعه یافته اند که در ادامه آن ها را تشریح خواهیم کرد.

## ۲-۹- انواع نویز

نابع نویز ممکن است داخل یا خارج جسم مورد آزمون باشند و نویزهایی که به طور معمول در محیط های آزمایشگاهی و صنعتی مشکل ساز می باشند شامل موارد زیر می باشند (Basner et al., 2015):

## ۲-۹-۱- نویزهای مکانیکی

در اثر حرکت اجزای مکانیکی که با هم در تماس اند (به عنوان مثال در یاتاقان ها) در ماشین آلات ایجاد می شوند. این نویزها معمولا فرکانس پایین و زمان رشد کوتاهی دارند و به راحتی از امواج اصلی تفکیک می شوند. نوع دیگری از نویزهای مکانیکی در اثر سایش مثلا بین مخزن ها و پایه ها و یا اتصالات دارای پین می باشند که سبب ایجاد نویزهای انفجاری در هنگام بارگذاری می شوند و جداسازی آن ها نسبتا مشکل است.

## ۲-۹-۲- نويزهای دوره ای

در ماشین های دوار و یا در حرکت های تکرار شونده نیز، نويز ایجاد می شود که به صورت متناوب منتشر می گردد. می توان با شناسایی دوره ی تناوب آن و عدم دریافت امواج در لحظاتی که این نويزها وجود دارند از ورود آن ها به سیستم جلوگیری نمود.

## ۲-۹-۳- نويزهای الکترو مغناطیسی

نويزهایی هستند که توسط تجهیزات الکتریکی تولید شده و به صورت القایی یا تابشی بر روی دستگاه های انجام آزمون تاثیر می گذارد. این نويزها می توانند توسط لامپ های فلورسنت و یا مدارهای کنترل موتورهای الکتریکی ایجاد شوند. اقداماتی نظیر رد کردن سیم ها از زیر زمین و یا استفاده از پوشش های عایق در محیط های پر نويز، برای کم کردن آن ها مناسب است.

## ۲-۹-۴- نويزهای هیدرولیکی

مواردی نظیر جوشش مایع در مخازن، جریان های متلاطم و نشتیها نويزهایی به وجود می آورند که به صورت سیگنال های پیوسته با دامنه بلند هستند. ساده ترین روش برای حذف این دسته از نويزها استفاده از محدوده ی فرکانسی بالا می باشد. به عنوان نمونه می توان به سیگنال ها و نويزهای موجود در آزمون انتشار آوایی مخازن بزرگ تحت فشار اشاره نمود. در این بازرسی ها سیگنال های مفید، سیگنال های نوع انفجاری هستند که معمولاً بر اثر شکستگی یا رشد ترک منتشر می شوند. بیشتر سیگنال های پیوسته سیگنال های ناخواسته ای همچون نويز اصطکاک یا جریان هستند. اما حتی سیگنالهای انفجاری هم می توانند ایجاد مزاحمت کنند. مثلاً نويزهای کوچک اصطکاک یا ولتاژ گذرای الکتریکی از این نوع هستند. در بهترین حالت سیگنالهای نويز پس زمینه فقط از نوع الکترونیکی و مربوط به پیش تقویت کننده یا سنسور است (Basner et al., 2015).

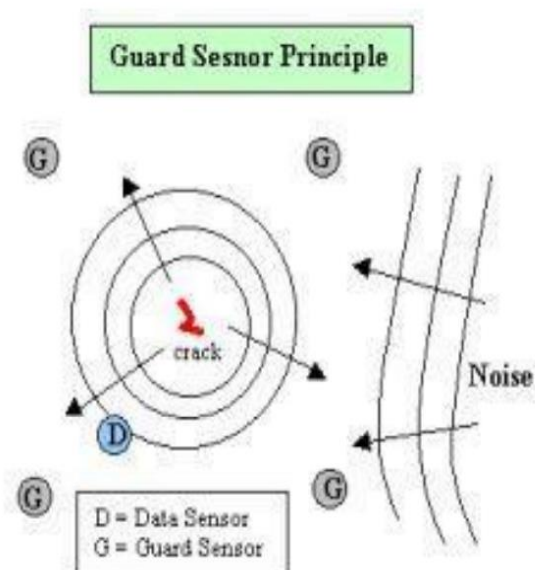
## ۲-۹-۵- حذف نویز

جلوگیری از تداخل نویزها و حذف آن‌ها بخش مهمی از روش انتشار آوایی است. می‌توان با آگاهی از تفاوت بین منابع انتشار آوایی و منابع نویز مانع ورود آن‌ها به سیستم شد و یا از تاثیر نویز بر روی نتایج آزمون جلوگیری به عمل آورد. همچنین می‌توان با شناسایی دقیق مشخصات این سیگنال‌ها، آن‌ها را پس از ورود به سیستم و با استفاده از نرم افزار از سیگنال‌های مفید متمایز کرده و حذف نمود.

از روش‌های متداولی که برای جلوگیری از ورود نویزها به سیستم انتشار آوایی استفاده می‌شود می‌توان به تعیین آستانه تحریک و استفاده از سنسورهای محافظ اشاره نمود. در روش تعیین آستانه تحریک، حداقل مقداری برای دریافت سیگنال‌های ورودی توسط اپراتور تنظیم می‌شود. اگر سیگنال انتشار آوایی از آستانه تحریک تجاوز کند، این معنی را می‌دهد که یک ضربه شروع شده است (یک ضربه یک انفجار شناسایی شده است). مقدار آستانه تحریک با توجه به شرایط آزمون تنظیم می‌شود و اگر مناسب باشد سیگنال‌های مفید از آن فراتر رفته و ثبت می‌شوند ولی نویزهای موجود دریافت نمی‌شوند.

در روش سنسور محافظ منابع خارج از محدوده بازرسی و منابع تولید شده در محدوده‌ی بازرسی از همدیگر تفکیک می‌شوند و از ورود منابع خارجی که نویز هستند به عنوان داده اندازه‌گیری شده جلوگیری می‌شود. در این شیوه سنسورهای نصب شده در محدوده‌ی مورد نظر سنسور داده نامیده می‌شوند و برای شناسایی منابع مربوط به عیوب استفاده می‌شوند. این سنسورها توسط چندین سنسور دیگر که سنسور محافظ نام دارند احاطه اند (Grosse and Ohtsu, 2008).

در صورتی که موجی قبل از سنسورهای محافظ به سنسورهای داده برسد، نشان دهنده ی این مطلب است که منبع آن در محدوده ی بازرسی است و آن موج به عنوان داده آوایی ثبت می شود. ولی اگر موجی قبل از رسیدن به سنسورهای داده، دست کم به یکی از سنسورهای محافظ وارد شود به این معنی است که منبع آن خارج از محدوده بازرسی است و به عنوان نویز شناخته می شود و به سادگی رد می شود. اصول روش سنسور محافظ در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است.

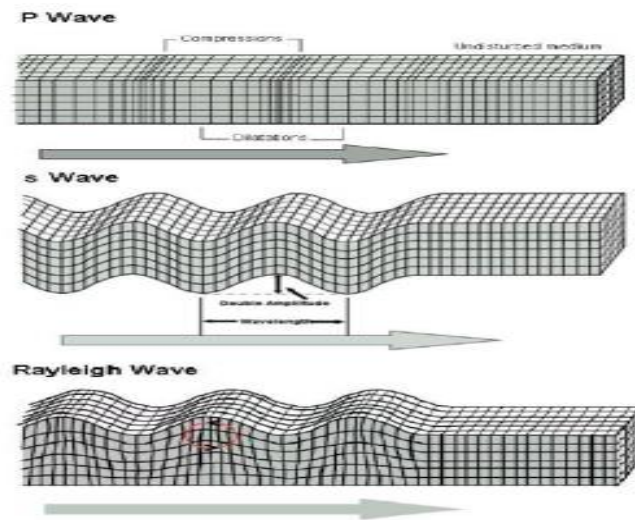


شکل ۲-۱۰: اصول روش سنسور محافظ امواج انتشار آوایی و امواج سیگنال (Ono, 2016).

## ۲-۱۰- انواع امواج انتشار آوایی

یک موج انتشار آوایی با محدوده فرکانسی گسترده ( از یک کیلو هرتز تا تا مگاهرتز ) مشخص می شود و ماکزیمم منتشر شده معادل با زمانی است که ترک حرکت می کند. معمولاً امواج انتشار آوایی شامل امواج P یا امواج طولی، امواج S یا امواج برشی و امواج سطح یا امواج بی پرتو می باشند (شکل ۲-۱۱).

یک موج سیگنال انتشار آوایی، سیگنال الکتریکی خروجی ثبت شده به وسیله ی تجهیزات انتشار آوایی می باشد. سیگنال های خروجی ترکیبی از امواج انتشار آوایی، اثرات مربوط به رشد در مواد و واکنش سنسور هستند.



شکل ۱-۲: انواع موج انتشار آوایی (Ballantine Jr et al., 1996).

## ۱۱-۲- انواع سیگنال های انتشار آوایی

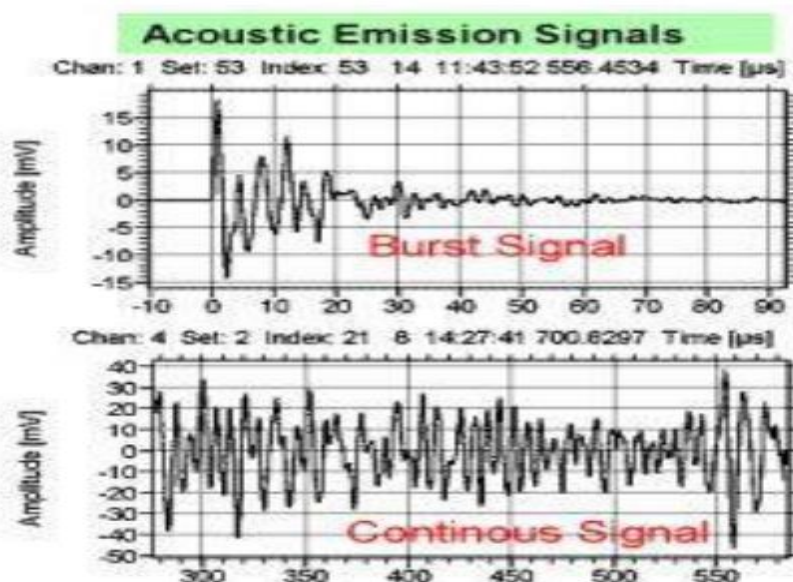
سیگنال انتشار آوایی، سیگنال الکتریکی است که با دریافت موج توسط سنسور تولید شده است. این امواج که توسط سنسورها ثبت شده و به صورت سیگنال های الکتریکی وارد سیستم انتشار آوایی می شوند، به دو دسته تقسیم می شوند. دسته اول مربوط به اتفاقات انتشار آوایی است که برای انجام آزمون ضروری بوده و حاوی اطلاعات مفیدی از حوادث درون قطعه است. دسته ی دوم شامل تمامی امواج ناخواسته ای که نه تنها حاوی اطلاعات مفید نیستند بلکه وجود آن ها انجام صحیح آزمون را مورد تاثیر قرار می دهد. این امواج را اصطلاحاً نویز می نامند. سیگنال های دریافت شده به دو نوع زودگذر و نوع پیوسته تقسیم می شوند (Rao, 1990).

## • سیگنال زود گذر

مطابق شکل (۲-۱۲) این نوع از سیگنالها که سیگنال انفجاری نیز نامیده می شوند به صورت یک سیگنال مستقل که از یک واقعه انتشار آوایی مستقل به وجود می آید مشاهده می شود. انفجار پالس یا بسته موج کوتاهی است و گاهی اوقات ممکن است در زمینه ای از سیگنال های پیوسته و یا نویزها باشد، ولی نقاط شروع و پایان به وضوح از نویزها مشخص می شود. هنگامی که یک انفجار به وسیله سیستم انتشار آوایی شناسایی می شود اصطلاحاً می گویند که یک ضربه وارد شده است.

## • سیگنال پیوسته

چنانچه نرخ وقوع زیاد باشد سیگنال های انفجاری مستقل با یکدیگر ترکیب شده و به صورت پیوسته در می آیند. سیگنال های پیوسته شامل دامنه ها و فرکانس گوناگونی هستند که پایان نمی یابند، شکل (۲-۱۲).



شکل ۲-۱۲: انواع سیگنال های انتشار آوایی، سیگنال نوع پیوسته (بالا) و سیگنال

نوع گذرا (پایین) (Rao, 1990).

## ۲-۱۲- تجهیزات

### ۲-۱۲-۱- سیستم بارگذاری

سیستم بارگذاری شامل ماشین آزمایش، سلول بار، و کنترل کننده است. برای بدست آوردن اطلاعات مورد نیاز برای تعیین تنش، سیستم آزمایش باید دارای یک سیستم اندازه‌گیری جابجایی و دو سیستم اندازه‌گیری کرنش باشد. (Grosse and Ohtsu, 2008)

### ۲-۱۲-۲- سیستم اندازه‌گیری انتشار آوایی

سیستم اندازه‌گیری انتشار آوایی شامل سنسور، آمپلی فایر اولیه و پردازشگر سیگنال انتشار آوایی است.

(a) پردازشگر سیگنال انتشار آوایی، حداقل دارای یک فیلتر، آمپلی فایر، دریافت کننده آستانه و یک شمارشگر است. وظیفه آن اندازه‌گیری پارامترهای انتشار آوایی، مثل رویداد و تعداد سیگنالهای انتشار آوایی پیوسته می باشد. پردازشگر سیگنال انتشار آوایی ممکن است یک سیستم قرائت با قابلیت‌های ذخیره و نمایش پارامتریک سیگنالهای ورودی باشد.

(b) برای حذف نویزهای الکترومغناطیسی و مکانیکی (فرکانس پایین) یک فیلتر بکار می رود که ممکن است، در آمپلی فایر و پردازشگر سیگنال انتشار آوایی نصب شده باشد.

(c) سیگنالهای الکتریکی دریافت شده توسط سنسور انتشار آوایی، از طریق کابل مخصوص هم محور به آمپلی فایر، و از طریق آمپلی فایر خطی با افزایش قابل تنظیم، که ۴۰ تا ۶۰ دسی‌بل افزایش را ایجاد می‌کند، به پردازشگر سیگنال انتشار آوایی منتقل می‌شود. خروجی پردازشگر انتشار آوایی می‌تواند بصورت مجموع مقادیر انتشار آوایی یا شدت رویدادها یا شمارشها، نشان داده شود.

(d) برای بررسی انتشار آوایی ممکن است از یک اسیلوسکوپ دیجیتالی استفاده شود Mohd, (2013).



## ۲-۱۲-۱-۲ سنسور

برای اندازه گیری سیگنالهای انتشار آوایی از سنسورهای حاوی بلور پیزوالکتریک استفاده می شود. سنسور انتشار آوایی معمولا ابزار پیزوالکتریک است که برای تهیه سیگنال مناسب نصب می شود. محدوده فرکانس سنسور تا ۱MHz است. فرکانسهای بالاتر برای تشخیص مناسبتر نویز (نویز منتقل شده توسط هوا) یا نویز مکانیکی بکار می روند. ورود امواج به سنسور باعث مرتعش شدن بلور شده و در اثر این ارتعاش، ولتاژی نوسان کننده از سنسور خارج می شود. فرکانس ولتاژ خروجی با فرکانس موج برابر است و اگر ورودی سنسور دو برابر شود، خروجی نیز دو برابر خواهد شد. در شکل (۲-۱۳) شماتیکی از سنسور نشان داده شده است. در مورد اشیا غیر مغناطیسی از متصل کننده های الاستیکی، نوار چسب، گیره، چسب و غیره استفاده می شود. در نصب سنسورها می توان از وسیله ای که راهنمای موج بر<sup>۱</sup> نامیده می شود استفاده کرد. این وسیله به صورت یک مفتول تک رشته یا یک میله صلب است که از یک طرف به سازه تحت بازرسی متصل شده است و در طرف دیگر آن سنسور قرار می گیرد. این وسیله باعث انتقال انرژی الاستیکی از سازه یا شی مورد آزمون به سنسور نصب شده می شود. اتصال سنسور باید به گونه ای باشد که یک نیروی ثابت نگهدارنده رو به پایین در تمام مدت اندازه گیری تامین شود و باید دقت شود تا از مواردی همچون قطعات شل و لق، برخورد کابل ها و غیره که منجر به تولید نویزهای ناخواسته می شود جلوگیری شود. (شکل ۲-۱۳) نوعی از سنسور را نشان می دهد (Mohd, 2013).



شکل ۲-۱۳: سنسور ISR6 (Grosse and Ohtsu, 2008)

<sup>۱</sup>-Wave guide

## ۲-۱۲-۱-۱-۱- نصب سنسور انتشار آوایی

سنسور انتشار آوایی باید در یک محل مناسب بر روی نمونه بطریقی نصب شود که همگرایی صوتی را که بین سنسور و ساختار اندازه گیری می کند کافی و ثابت باشد. مطابق شکل (۲-۱۴) سنسور باید مستقیماً توسط یک ماده سیال مخصوص که ماده واسط نام دارد به نمونه متصل شود. سپس توسط نوار یا باند چسب مناسب که به عنوان جفت کننده عمل می کند، چسبانده می شود.

بعد از اینکه سنسور نصب گردید و به سیستم اندازه گیری انتشار آوایی متصل شد، سیستم باید توسط آزمایشی بررسی شود (قبل از آغاز آزمایش نمونه).



شکل ۲-۱۴: محل نصب سنسور در سیستم انتشار آوایی (Grosse and Ohtsu, 2008)

### • ملزومات نصب سنسور

۱- برای بهینه سازی آزمایش، باید سنسور صحیح و مناسب انتخاب شود. از جمله پارامترهای سنسور که باید بررسی شوند عبارتند از: اندازه، حساسیت، پاسخ فرکانس، پاسخ جنبش سطحی و قابل انطباق با مواد و محیط.

۲- سطح تماس باید تمیز بوده و در برخی موارد ممکن است بصورت مکانیکی آماده شود. این عمل دریافت امواج صوتی را توسط انتقال مناسب انرژی صوتی از نمونه به سنسور، افزایش میدهد. افتهای احتمالی در انتقال انرژی صوتی، بر اثر انحنای سطح در ناحیه تماس، نیز باید بررسی شوند.

۳- ضخامت ماده واسط بین سنسور و نمونه ممکن است، حساسیت موثر سنسور را تغییر دهد. معمولاً تا حد ممکن این لایه باید نازک باشد. باید دقت شود که در این ماده سیال گونه، حفرات بدام افتاده در آن وجود نداشته باشند. ناهمواریهایی مثل باریک‌شدگی از یک سمت سنسور به سمت دیگر آن، می تواند حساسیت را کاهش دهد و یا هدایت ناخواسته ای را در سنسور بوجود آورد.

۴- روش مناسب بکاربردن ماده واسط، قرار دادن مقدار کمی از این مواد در مرکز سطح سنسور و سپس فشردن سنسور به سطح نمونه است، که این عمل باعث می شود ماده واسط<sup>۱</sup> بطور یکنواخت از مرکز سطح سنسور به سمت لبه سنسور، پخش شود. (Grosse and Ohtsu, 2008)

## ۲-۱۲-۲- تقویت کننده

از آنجایی که سیگنال های خروجی سنسور بسیار ضعیف است به همین جهت از یک پیش تقویت کننده برای تقویت سیگنال های انتشار آوایی استفاده می شود. تقویت کننده به منظور تقویت سیگنالها برای حذف اختلالات محیطی و تبدیل آن به مقاومت پایین، برای انتقال به فواصل دور بکار می رود. آمپلی فایر باید حداقل ۴۰dB تقویت را در سیگنال ایجاد کند. پیش تقویت کننده می تواند در داخل سنسور و یا به صورت مجزا باشد. تقویت مناسبی برای آمپلی فایر باید در نظر گرفت، تا باعث شود که ابزار پردازشگر سیگنال، سطح نویز آوایی را در سیستم دریافت کند. آمپلی فایر باید تا حد امکان نزدیک سنسور قرار گیرد تا تداخل الکترومغناطیسی را کاهش دهد.

در صورت استفاده از پیش تقویت کننده مجزا، اتصال آن به سنسور و فیلتر توسط دو کابل انجام می شود. پیش تقویت کننده معمولاً یک افزایش دهنده است و شامل یک فیلتر بالا گذر یا نوار گذر برای حذف مکانیکی نویز پس زمینه که در فرکانس های پایین حاکم است می باشد. در فرکانس های پایین مشکلات با نویز پس زمینه مکانیکی افزایش می یابد. در فرکانس های بالا موج سریعتر ضعیف می

---

۱-Couplant

شود و حوزه ی ردیابی سنسور کوتاهتر خواهد شد. انتخاب فرکانس عملیاتی به منظور یک مقایسه بین نویز و میزان آشکار سازی است. (شکل ۲-۱۵) تصویر نوعی از تقویت کننده را نشان می دهد (Mohd,2013).



شکل ۲-۱۵: نوعی از تقویت کننده (Grosse and Ohtsu, 2008).

## ۲-۱۲-۲-۳- پردازشگر

پردازشگر سیگنال انتشار آوایی، حداقل دارای یک فیلتر، آمپلی فایر، دریافت کننده آستانه و یک شمارشگر است. وظیفه آن اندازه گیری پارامترهای انتشار آوایی، مثل رویداد و تعداد سیگنالهای انتشار آوایی پیوسته می باشد. پردازشگر سیگنال انتشار آوایی ممکن است یک سیستم قرائت با قابلیت‌های ذخیره و نمایش پارامتریک سیگنالهای ورودی باشد.

برای حذف نویزهای الکترومغناطیسی و مکانیکی (فرکانس پایین) یک فیلتر بکار می رود که ممکن است، در آمپلی فایر و پردازشگر سیگنال انتشار آوایی نصب شده باشد. سیگنالهای الکتریکی دریافت شده توسط سنسور انتشار آوایی، از طریق کابل مخصوص هم مرکز به آمپلی فایر، و از طریق آمپلی فایر خطی با افزایش قابل تنظیم، که ۴۰ تا ۶۰ دسی بل افزایش را ایجاد می کند، به پردازشگر سیگنال انتشار آوایی منتقل می شود. خروجی پردازشگر انتشار آوایی می تواند بصورت

مجموع مقادیر انتشار آوایی یا شدت رویدادها<sup>۱</sup> یا شمارش‌ها<sup>۲</sup>، نشان داده شود (Grosse and Ohtsu, 2008).

## ۲-۱۲-۴- ثبت و قرائت

برای بررسی انتشار آوایی ممکن است از یک اسپیلوسکوپ دیجیتالی استفاده شود. به یک سیستم جمع آوری اطلاعات دیجیتالی یا آنالوگ برای ثبت و نمایش لحظه‌ای بار اعمالی و پارامترهای انتشار آوایی برحسب زمان در طول آزمایش، نیاز است (Grosse and Ohtsu, 2008).

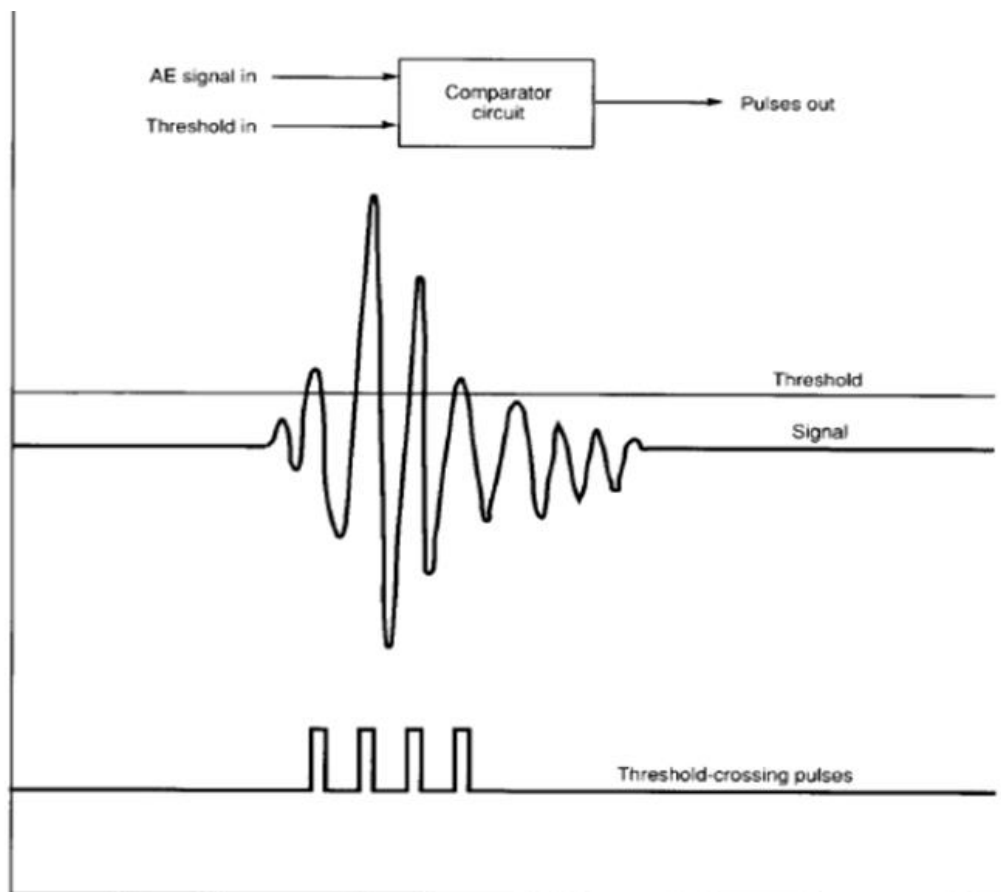
## ۲-۱۳- ردیابی سیگنال و شمارش نشر

سیگنال بعد از دریافت و پیش تقویت شدن، به تجهیزات اصلی ارسال شده، آن جا بیشتر تقویت شده و فیلتر می شود. مرحله بعدی مرحله ی بحرانی برای آشکارسازی سیگنال است این مرحله با یک مدار مقایسه کننده انجام می شود که هنگامی که سیگنال انتشار آوایی از آستانه ولتاژ ثابت شده تجاوز کند یک پالس خروجی دیجیتال تولید می کند. ارتباط بین سیگنال، آستانه و پالسهای آستانه تحریک در شکل (۲-۱۶) نشان داده شده است. سطح آستانه معمولاً توسط اپراتور تنظیم می شود این یک عنصر قابل تغییر است که حساسیت آزمون را تعیین می کند. بسته به طراحی تجهیزات، اغلب ممکن است حساسیت توسط تنظیم مقدار افزایش تقویت کننده کنترل شده باشد. یکی از قدیمی ترین و ساده ترین راه های تعیین فعالیت انتشار آوایی شمارش پالس های آستانه تحریک تولید شده است (Jiao et al., 2004).

---

<sup>1</sup>-Event

<sup>2</sup>-Count



شکل ۲-۱۶: شمارش پالس‌ها روشی برای تعیین کمیت فعالیت انتشار آوایی (Jiao et al., 2004)

## ۲-۱۴- پارامترهای توصیف سیگنال

پنج تا از مهمترین پارامترهای استفاده شده برای توصیف سیگنال عبارتند از: شمارش پالس‌ها، حداکثر دامنه، مدت زمان، زمان خیز و انرژی. برخی از آزمون‌ها با کمترین پارامترها انجام می‌شوند و برخی آزمون‌ها از پارامترهای دیگری مثل انرژی حقیقی (ثابت) یا شمارش اوج متوسط فرکانس استفاده می‌کنند به هر حال پنج پارامتر اصلی به طور مناسب استاندارد شده‌اند و از طریق فرآیندهای عرضه در ده سال اخیر پذیرفته شده‌اند (شکل ۲-۱۷) (Grosse and Ohtsu, 2008).

## • حداکثر دامنه<sup>۱</sup>

بیشترین پیک ولتاژی است که یک موج انتشار آوایی به آن می رسد، این یک پارامتر خیلی مهم است زیرا مستقیماً قابلیت آشکار سازی اتفاقات انتشار آوایی را تعیین می کند. این پارامتر مستقیماً با بزرگی اتفاقی که در منبع رخ داده است، متناسب می باشد. و معمولاً با واحد دسی بل بیان می شود. بالاترین ولتاژ اوج که به وسیله موج انتشار آوایی حاکم می شود. خیلی پارامتر مهمی است زیرا به طور مستقیم قابلیت کشف رویداد انتشار آوایی را تعیین می کند. دامنه های انتشار آوایی به طور مستقیم با بزرگی منبع رویداد مرتبط می شوند و آن ها در محدوده وسیع میکرو ولت تا ولت متنوع هستند.

## • شمارش<sup>۲</sup>

تعداد پالسهایی است که از آستانه تحریک فراتر می رود. این یکی از قدیمی ترین و ساده ترین راه های تعیین کمیت سیگنال انتشار آوایی است. شمارش ها به بزرگی اتفاق منبع بستگی دارند. اما آن ها اغلب شدیداً به خواص آوایی و خواص طبیعی نمونه و سنسور بستگی دارند. پالس های عبوری از آستانه می باشند. شمارش ها به تعداد زیادی به خصوصیات آوایی و طبیعی نمونه و سنسور وابسته هستند. یکی از مهم ترین پارامترهای انتشار آوایی ثبت تعداد دفعاتی است که آوایی منتشر شده، از حد آستانه عبور کرده است. این پارامتر اغلب برای نشان دادن فعالیت انتشار آوایی با شمارش در دوره زمانی به کار برده می شود. شمارش تعداد رویداد نسبت به زمان انجام می شود. شمارش تجمعی به مجموع شمارش ها در سیکل های مختلف اطلاق می شود.

✓ نسبت متناسب: وقوع انتشار آوایی در بارهای کم تر از حداکثر بار قبلی، اثر متناسب نامیده می شود. با استفاده از این پدیده می توان نسبت متناسب را به صورت نسبت بین باری که

---

<sup>۱</sup>Amplitude

<sup>۲</sup> count

در آن آوایی چشم گیری اتفاق افتاده به حداکثر بار مرحله قبل که در آن آوایی اتفاق افتاده  
تعریف شده است (zhang et al., 2017)

### ✓ انرژی<sup>۱</sup>

گاهی اوقات به عنوان شمارش های انرژی شناخته می شود. E ناحیه اندازه گیری تحت پوشش  
سیگنال اصلاح شده است. انرژی از جهات زیادی نسبت به شمارش پالس ها و حتی دامنه برتری  
دارد، چرا که هم به دامنه و هم به زمان پالس بستگی دارد و در عین حال وابستگی کمتری به  
فرکانس کاری و آستانه تعیین شده دارد. فعالیت کلی انتشار آوایی اغلب باید توسط جمع کردن همه  
اتفاقات ردیابی شده بزرگ سنجیده شود.

### • مدت زمان دوام<sup>۲</sup>

فاصله ی زمانی بین اولین و آخرین عبور از آستانه تحریک می باشد. این پارامتر با واحد میکروثانیه  
بیان می شود و به بزرگی اتفاق آوایی و خواص انعکاس ماده وابسته بوده و برای فیلتر کردن نویزها  
بسیار مفید است. آن برای ارزیابی فیلتر نویز استفاده می شود.

### • زمان خیز<sup>۳</sup>

به فاصله زمانی بین اولین عبور از آستانه تحریک و اوج دامنه گفته می شود و به خواص انتشار موج  
در ماده بستگی دارد. از این پارامتر برای انواع مختلف اصلاح سیگنال و در نویزها استفاده می شود.

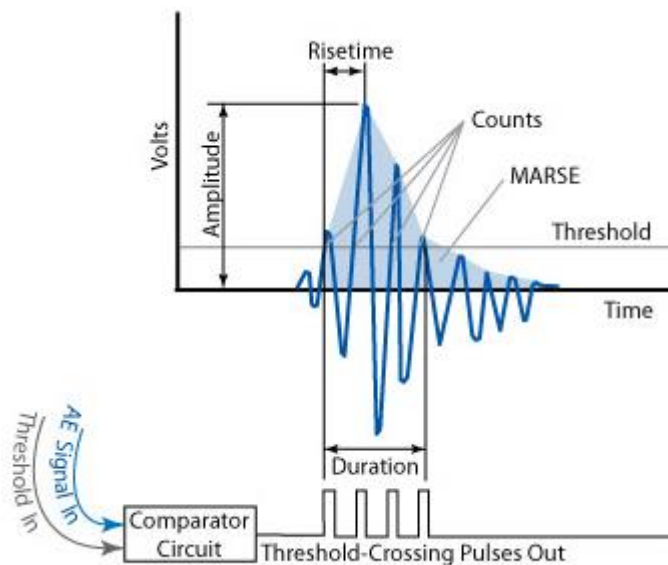
---

<sup>1</sup> Energy

<sup>۲</sup> Duration

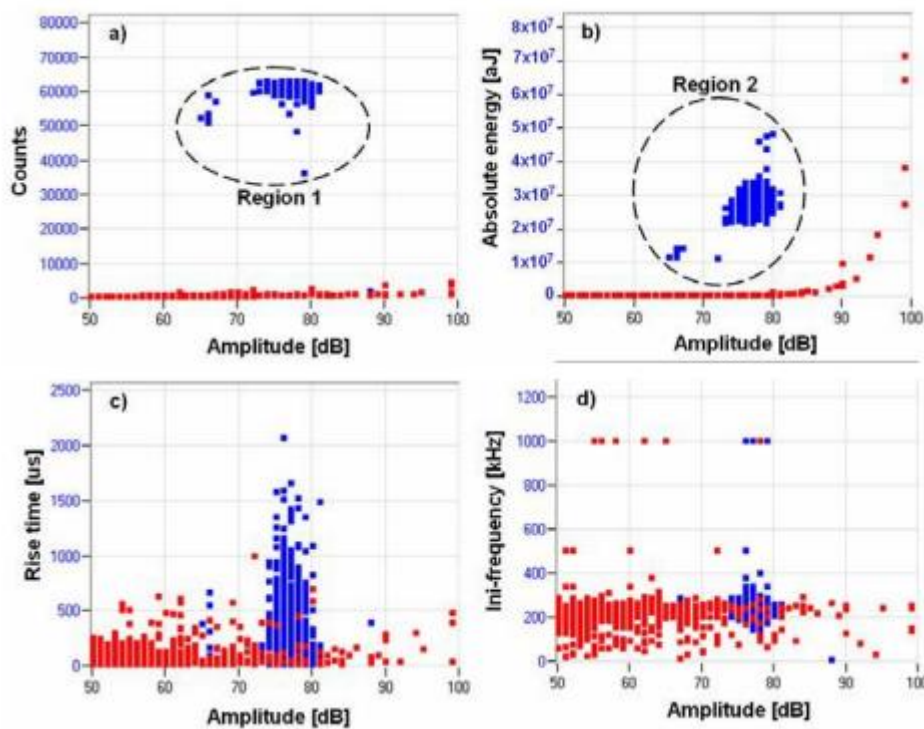
<sup>۳</sup> Raise Time





شکل ۲-۱۷: پارامترهای انتشار آوایی (Grosse and Ohtsu, 2008)

در یک سیستم مدرن انتشار آوایی این پارامترها بوسیله پردازش سیگنال توسط نرم افزار به عنوان داده گرفته می شوند و مقادیر این پارامترها استخراج می شوند. این پارامترها می توانند برای انواع مختلف وضعیت سیگنال و جلوگیری از نویز استفاده شوند و به فرآیند گسترش امواج بین منبع و سنسور بستگی دارند. سیگنال های انتشار آوایی می توانند به وسیله ی ارتباط بین یک خصوصیت انتشار آوایی با خصوصیات دیگر انتشار آوایی و یا با پارامترهای دیگر مانند بار، محل کرنش و زمان تحلیل شوند. شکل (۲-۱۸) زیر نمایش داده های انتشار آوایی را بر اساس ارتباط یک خصوصیت با خصوصیات دیگر نشان می دهد (Mohd, 2013).

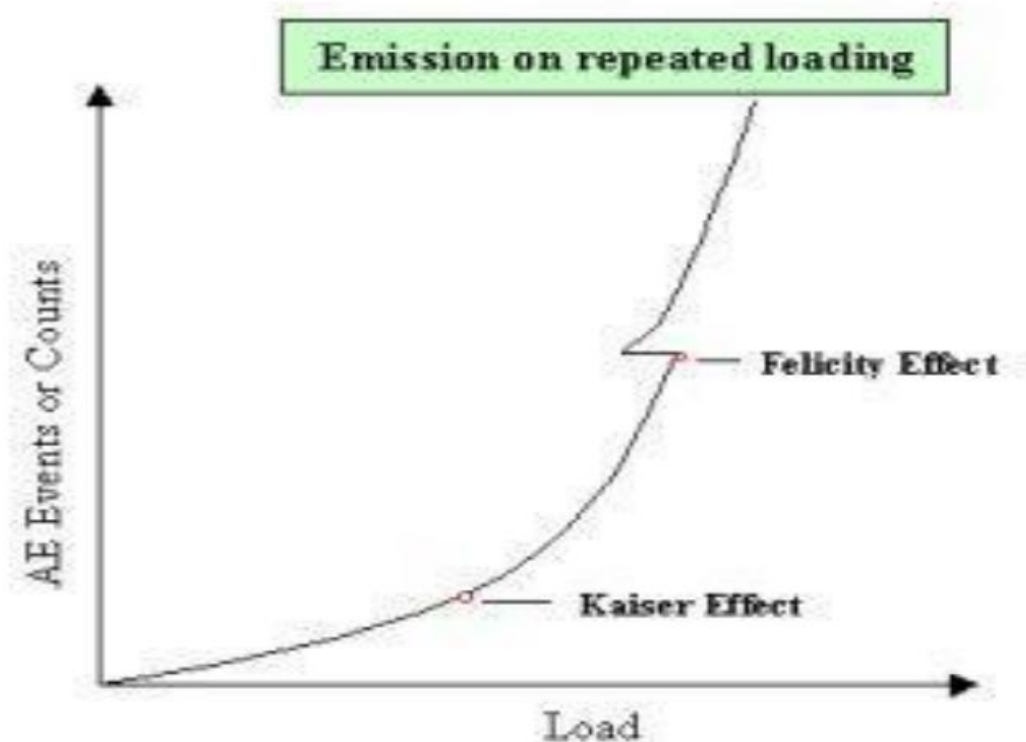


شکل ۲-۱۸: تحلیل سیگنال بوسیله ارتباط یک پارامتر با پارامترهای دیگر (Mohd, 2013).

همانطور که در شکل ۲-۱۹ نشان داده شده است، انتشار آوایی در مقابل نیروی اعمالی رسم شده است. در این نمودار طی سه مرحله نیرویی اعمال شده و سپس حذف می گردد و در هر مرحله سطح بار اعمال شده نسبت به حالت قبل افزایش می یابد. در حین افزایش اول بار، سیگنالهایی منتشر می شود. به محض اینکه بار اعمال شده کاهش می یابد و حذف می شود و تا زمانی که سطح بارگذاری دوم از میزان اول آن تجاوز نکند، سیگنالی مشاهده نمی شود. اثر کایزر<sup>۱</sup> پدیده ای را توصیف می کند که یک ماده تحت بار تنها زمانی که سطح بار حداکثر مقدار قبلی آن فراتر رود امواج آوایی منتشر می کند. در طول بارگذاری مجدد و قبل از رسیدن به حداکثر بار قبلی، مواد به صورت الاستیکی رفتار می کنند و اگر اثر کایزر برای این مواد ثابت باشد، قبل از رسیدن سطح تنش به میزان حداکثر قبلی هیچ سیگنالی ثبت نخواهد شد و یا مقدار اندکی ثبت می شود. در تمامی بارگذاری های مجدد نیز تنها زمانی که سطح نیرو از حداکثر میزان قبلی آن تجاوز کند سیگنالهای انتشار آوایی منتشر می

<sup>1</sup>Kaiser effect

شوند. ظاهر شدن قابل توجه انتشار آوایی در سطح بار پایین تری از حداکثر بار اعمال شده قبلی اثر متناسب نام دارد و نسبت بین بار اعمال شده ی بعدی که به واسطه ی آن انتشار آوایی ظاهر شده است و حداکثر بار اعمال شده قبلی را نسبت متناسب<sup>۱</sup> می نامند این حالت ممکن است اشاره به یک عیب داشته باشد (Gostautas et al., 2005).



شکل ۲-۱۹: ارتباط انتشار آوایی با بار گذاری مکرر (Gostautas et al., 2005).

## ۲-۱۵- کلیاتی در رابطه با اثر کایزر و انتشار آوایی

مقدار تنش برجا از پارامترهای مهم در طراحی سازه های زیرزمینی است. روش های متداول اندازه گیری تنش برجا مانند روش شکست هیدرولیکی دو ضعف عمده الف) زمان زیاد ، ب) هزینه بر دارند. از این رو اندازه گیری تنش برجا به روش های غیرمستقیم در حال گسترش است. از جمله روش های

<sup>۱</sup> Felicity ratio

غیرمستقیم اندازه گیری تنش برجا روش انتشار آوایی است که بر مبنای تئوری اثر کایزر استوار است (Zhang et al., 2017).

به طور کلی سنگ ها وقتی تحت تنش قرار می گیرند، ریزترک هایی در آن ها ایجاد می شود که شروع و گسترش این ریزترک ها باعث ایجاد صدا می شود. به این پدیده انتشار آوایی یا انتشار آوایی گفته می شود. از این پدیده در علوم مختلف، استفاده های متعددی می شود که از آن جمله می توان به بحث تخمین تنش برجا در علم مکانیک سنگ اشاره کرد. سنگ به طور پیوسته از تنش کم به زیاد به وسیله میکرو درزه ها در حال آسیب دیدگی است. شکست یا ضعف در سنگ قابل بازسازی نیست و اثر کایزر در واقع ضعف ها و شکستگی هایی که در بارگذاری قبلی اتفاق می افتد را ذخیره می کند یا به حافظه می سپارد. تا زمانی که مقدار بارگذاری مجدد از مقدار بار قبلی فراتر رود، هیچ ترک جدیدی در سنگ ایجاد نمی شود. اثر کایزر در سنگ و موادی که تحت بارگذاری سیکلی قرار دارند مشاهده می شود. در ساده ترین حالت سیکلی، مقدار تنش در بارگذاری سیکلی به صورت مرحله ای افزایش می یابد. در مرحله بعدی تا زمانی که مقدار تنش به مقدار قبلی نرسیده فعالیت صوتی صفر یا نزدیک صفر است، اما به محض این که تنش از بیش ترین مقدار تنش قبلی بالاتر می رود، فعالیت انتشار آوایی به صورت چشم گیری افزایش می یابد. فرضیه اصلی تئوری کایزر این است که افزایش انتشار آوایی فقط بیشترین تنش قبلی را در جهت محوری بارگذاری مشخص می کند (Lavrov and Sciences, 2003).

## ۱۶-۲- بعد فرکتال<sup>۱</sup> دامنه آسیب

دو نظریه مختلف برای بدست آوردن جهت یا مسیر تخمینی بعد فرکتال فیزیکی دامنه ی آسیب برای اوج بارگذاری مواد شکننده مانند سنگ و بتن وجود دارد. روش اول یک روش مکمل بر اساس آنالیزهای b-value رویدادهای انتشار آوایی است. b-value مستقل از اثر مقیاس می باشد و آن ارزیابی شبیه سازی فرآیند آسیب در سازه و فعالیت لرزه ای در یک ناحیه از پوسته زمین است روش دوم

---

<sup>1</sup> fractal

دانشیته انرژی موجود است که بر اساس تاثیرات سائز انرژی آزاد شده به وسیله روش انتشار آوایی تعیین می شود (Main, 1992).

## ۲-۱۶-۱ b-value

پارامتر b-value نشان دهنده نسبت تعداد رخدادهای ضعیف به قوی می باشد. حالت های مختلف شکستگی انواع مختلف سیگنال های آوایی را تولید می کند که دارای دامنه و فرکانس های مختلف می باشد. به طور کلی دامنه و مقیاس شکستگی به انرژی ساطع شده از منبع در باز شدن و یا جابجایی ترک بستگی دارد. جابجایی های کوچک امواج کم انرژی ساطع می کند در حالی که جابجایی و یا ترک های بزرگ مقدار انرژی بالاتری را تولید می کنند (Rao and Lakshmi, 2005).

در تکنیک انتشار آوایی معادله گوتنبرگ - ریشتر بین فرکانس تجمعی و دامنه سیگنال است که از معادله

۳-۲ محاسبه می شود:

$$\log_{10} N = a - b \left( \frac{A_{dB}}{20} \right) \quad 3-2$$

N افزایش فرکانس (تعداد رخدادهای آوایی با دامنه بزرگتر از حد آستانه) a یک ثابت تجربی و b نیز در انتشار آوایی b-value،  $A_{dB}$  دامنه اوج رخداد می باشد.

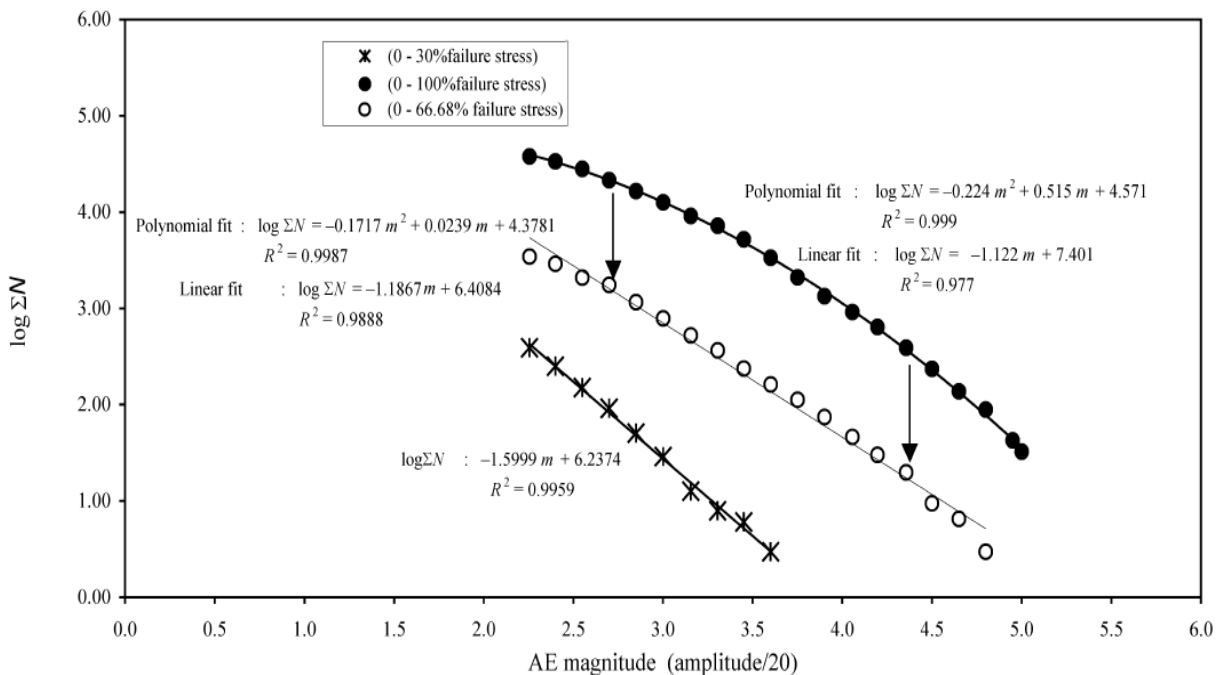
دامنه بر حسب دسی بل با فرمول ۴-۲ به دست می آید:

$$dB = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{V_0}{V_i} \right) \quad 4-2$$

$V_0$  ولتاژ خروجی،  $V_i$  ولتاژ خروجی

شکل ۲-۲۰ تغییرات توزیع تجمعی پارامتر آوایی را بر حسب بزرگی سیگنال های آوایی در محدوده- ای از تنش وارده نشان می دهد. با توجه به شکل ذیل ریزترک تعداد زیادی رخداد آوایی و با انرژی

کم تولید می‌کند. بنابراین ایجاد ریزترک منجر به ترک خوردگی با مقدار  $b$ -value نسبتاً بالایی می‌شود. ایجاد ماکروترک‌ها مقدار  $b$ -value کم تولید می‌کند. با افزایش سطح تنش و با گسترش ترک و نزدیک شدن به مرحله شکست، مقدار  $b$ -value کمتر می‌شود.



شکل ۲-۲۰: توزیع تجمعی رخدادهای آوایی بر حسب بزرگی سیگنال‌های آوایی (Rao and Lakshmi, 2005)

## ۲-۱۶-۲- معیار دانسیته انرژی

داده‌های انتشار آوایی به وسیله‌ی تحلیل‌های فرکتال و آماری که پدیده ترک را از جنبه چند مقیاس در نظر می‌گیرند تفسیر می‌شوند. معیار چندگانه برای ارزیابی فرآیند آسیب فرمول‌هایی را ارائه کرده است (Carpinteri et al., 2007).

توسعه‌های اخیر در تئوری‌های خردایش (خرد شدن سنگ) نشان می‌دهد که در طی گسترش ریزترک‌ها انرژی  $W$  در سراسر دامنه فرکتال که در برگزیده بین سطح و حجم  $V$  نمونه می‌باشد پراکنده می‌شود (Carpinteri, 2002).

قانون مقیاس سایز در طی فرآیند آسیب به صورت رابطه (۵-۲) فرض شده است:

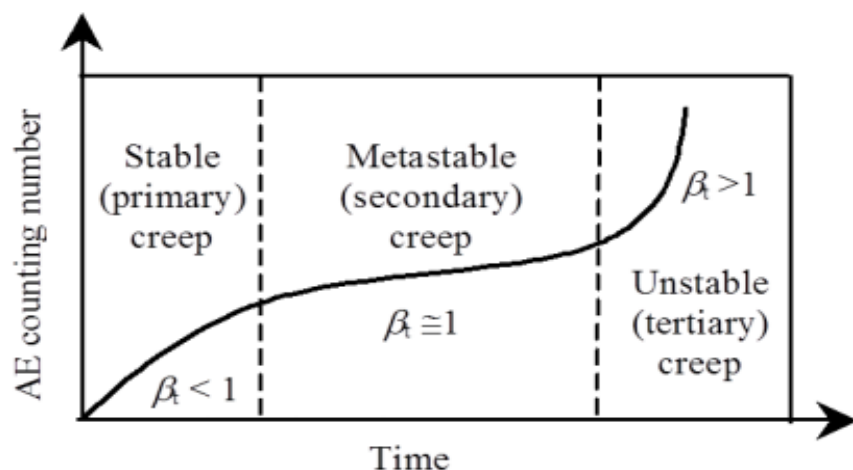
$$W \propto N \propto V^{\frac{D}{3}} \quad (5-2)$$

D بعد فرکتال نامیده می شود که مقدار آن بین ۲ و ۳ می باشد و N تعداد تجمعی رویدادهای انتشار آوایی می باشد که سازه را در طی پایش آسیب آماده می کند (Weiss, 2001).

قانون دیگری که پراکندگی انرژی را با استفاده از روش انتشار آوایی در طی فرآیند آسیب نشان می دهد قانون مقیاس زمان است که به صورت رابطه (۶-۲) نشان داده می شود (Xiao et al., 2016).

$$W \propto N \propto t^{\beta t} \quad (6-2)$$

$\beta T$  مقدار مقیاس زمان برای پراکندگی انرژی در رنج (۳ و ۰) و N تعداد رویدادهای انتشار آوایی است. با کار روی توان از  $\beta t$  از داده ها بدست آمده در طی مشاهدات دوره شرایط پایداری سازه را همانطور که در شکل (۲۱-۲) مشاهده می شود، می توان پیش بینی کرد (Xiao et al., 2016).



شکل ۲-۲۱: شرایط پایداری سازه تابع ضریب  $\beta t$  (Xiao et al., 2016)

اگر  $\beta t$  کوچکتر از ۱ باشد، فرآیند آسیب کند و آهسته است زیرا پراکندگی انرژی کم است (Xiao et al., 2016).

اگر  $\beta t$  بزرگتر از ۱ باشد، فرآیند ناپایدار است (Xiao et al., 2016).

اگر  $\beta t$  برابر ۱ باشد، فرآیند کم ثبات است. سازه می تواند تحت شرایط پایدار یا ناپایدار باشد (Xiao et al., 2016).

## ۲-۱۷-۱- انواع تحلیل های روش انتشار آوایی

### ۲-۱۷-۱-۱- تحلیل جبهه موج سیگنال

خوشبختانه با پیشرفت های اخیر سنسور ها و پیشرفت های پردازشگرهای کامپیوتری توانایی ثبت داده های خام جبهه موج سیگنال در سنسورهای چندگانه فراهم شده است. مهمترین مزیت تحلیل های جبهه موج در برابر روند تحلیل های پارامتری عملکرد بهتر در متمایز کردن داده های نویز از داده های اصلی و در نتیجه تفسیر بهتر در این موارد می باشد. اگر چه در بیشتر سازه های سنگی و بتنی استفاده از روندهای تحلیل پارامتری راحت تر می باشد (Evans and Fu, 1985).

### ۲-۱۷-۲- تحلیل پارامتری

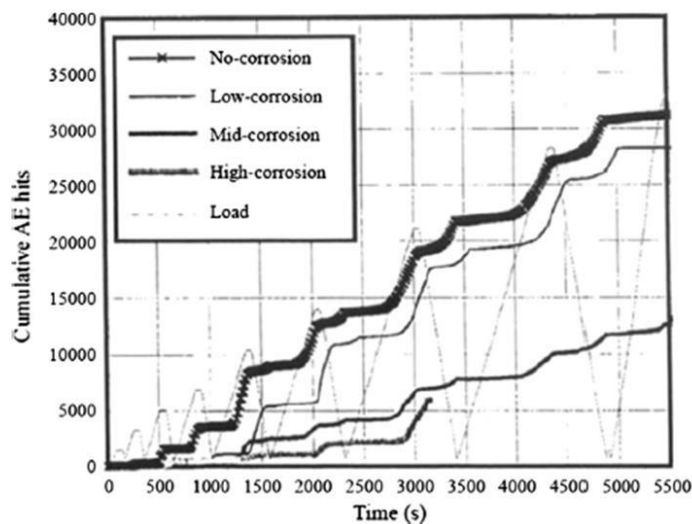
به منظور تفسیر داده های انتشار آوایی جمع آوری شده، مبتنی بر همبستگی، زمان و ویژگی های پارامتری انتشار آوایی مرسوم مبتنی بر پارامترهای خارجی، از نرخ وقوع یا روند تجمعی آنها استفاده می شود. به علاوه، مقادیر آماری پارامترها و برخی ترکیب پارامترهای انتشار آوایی که پارامترهای خارجی هستند، به طور گسترده برای ارتباط مقیاس شکستگی یا درجه ای از آسیب در مواد یا سازه ها، مورد مطالعه قرار گرفته است.

### ۲-۱۷-۲-۱- کاربرد رخداد در رفتارنگاری ترک

همان گونه که بیان شد این روش پتانسیل بالایی در رفتارنگاری ترک از مراحل اولیه شکل گیری ریزترک ها تا مراحل نهایی ترک های بزرگ را دارا می باشد. افزایش آن نشان دهنده بالارفتن سطح



خسارت، خوردگی می‌باشد. شکل‌گیری ریز ترک‌ها و ترک‌های بزرگ توسط راو و همکاران<sup>۱</sup> با استفاده از نرخ رخدادها و تنش اعمالی در مواد شبه شکننده مورد مطالعه قرار گرفته است. نتیجه این مطالعه که در حین شکل‌گیری ترک‌ها رخدادهای آوایی به آرامی و پیوستگی افزایش می‌یابد و می‌توان با استفاده از این روند یک شاخص مناسب برای ارزیابی آسیب ایجاد کرد (Behnia, Chai et al., 2014), (Rao, Lakshmi et al., 2009) شکل ۲-۲۲ تغییرات نرخ رخداد در یک رفتارنگاری دوره-ای را نشان می‌دهد.



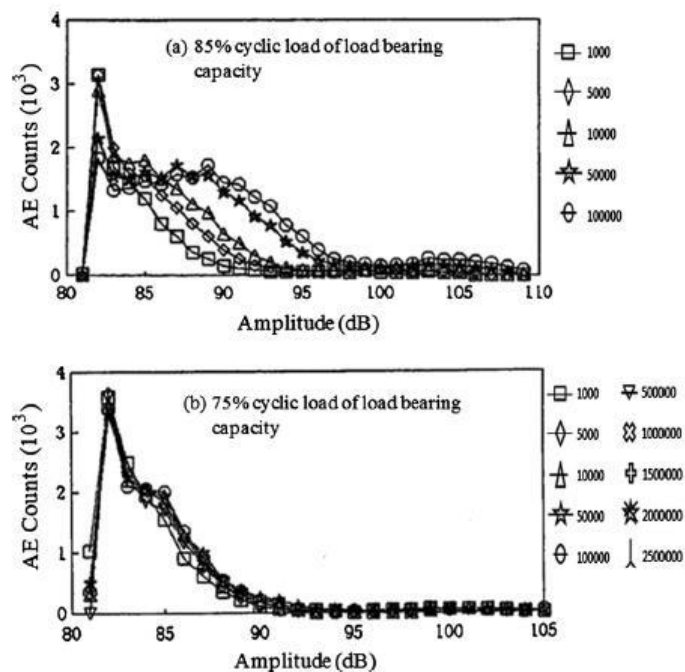
شکل ۲-۲۲: تغییرات نرخ رخداد در یک رفتارنگاری دوره‌ای (Rao, Lakshmi et al., 2009)

## ۲-۲-۱۷-۲- کاربرد شمارش‌ها در رفتارنگاری

نرخ شمارش‌ها در یک دوره‌ی زمانی برداشت داده‌ها تعریف می‌شود این دوره همان مدت زمانی است که دامنه سیگنال‌ها از حد آستانه بیشتر می‌باشد. نرخ شمارش‌های آوایی نشان دهنده شدت رخدادهای آوایی است در شرایط افزایش فعالیت‌های آوایی مورد توجه قرار گیرد این در حالی است که رخداد یا نرخ رخدادها به خودی خود ممکن است برای ارزیابی خسارت مناسب نباشند. مشاهدات نشان داده اند که ناهمگنی بسیار بر روی نرخ شمارش تاثیرگذار است. شکل ۲-۲۳ نشان

<sup>۱</sup>Rao et al

دهنده توزیع دامنه رخدادهای آوایی نمونه - بین پارامترهای مختلف آوایی تحت خمش می باشد که تحت بارگذاری دوره های در سطوح معین قرار گرفته است. این شکل ها نشان دهنده این مطلب است که محدوده تغییرات توزیع دامنه در سطوح مختلف بارگذاری به خوبی مشاهده می گردد. افزایش میزان دامنه رخدادها با افزایش سطح تنش مشاهده می گردد و به دلیل حساسیت تغییرات دامنه رخدادها به روند شکست می تواند به عنوان معیار مناسب و تشخیصی برای ارزیابی سطح خسارت در سازه ها باشد (Rao, Lakshmi et al., 2009).



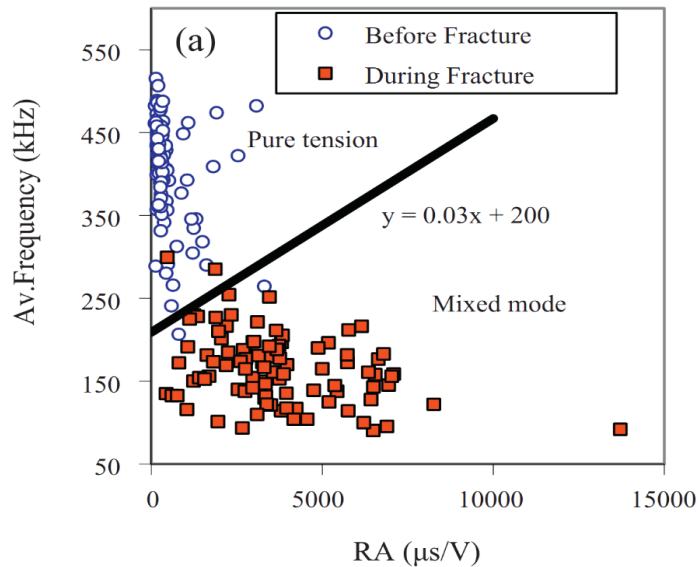
شکل ۲-۲۳: توزیع دامنه براساس تعداد شمارش ها در نمونه تحت خمش (Rao, Lakshmi et al., 2009)

## ۲-۱۷-۳- تحلیل حالت غالب شکست

طبقه بندی نوع شمارش های ایجاد شده در آزمایش های مکانیک شکست سنگ و بتن موضوعی است که اخیرا مورد توجه محققین قرار گرفته است. مطابق شکل ۳-۱۸ وقتی که یک جابجایی در داخل ماده اتفاق می افتد، دلیل انتشار هردو نوع موج حجمی (طولی و ضخامتی) در ماده وجود دارد. یک رویداد کششی قسمت بزرگی از انرژی الاستیک را به صورت امواج طولی، بر اثر تغییرات گذرای حجمی در نوک ترک برانگیخته می کند. وقتی که ترک برشی توسعه می یابد، درصدی از انرژی صرف

ایجاد اعواج در نزدیکی نوک ترک به صورت موج برشی می‌شود. اعواج ایجاد شده سبب تغییر شکل برشی و در نهایت تولید ریزترک‌های برشی در نزدیکی نوک ترک می‌شود. مطابق شکل ۲-۲۴، در حالت اول موجی که قسمت عمده انرژی را حمل می‌کند، دارای سرعت بالا و زمان خیز کوتاه می‌باشد و به همان نسبت زاویه خیز شکل موج بالا است (دامنه حداکثر بر روی زمان خیز). در مطالعه مکانیک شکست بتن و سنگ، معمولاً عکس این پارامتر با عنوان RA استفاده می‌شود. اما در مورد ترک‌های برشی، قسمت عمده انرژی به شکل موج برشی است که دارای سرعت و زاویه خیز کمتر و زمان خیز طولانی‌تری می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که امواج برشی ناشی از ترک‌های برشی دارای فرکانس پایین و RA بالایی می‌باشند. این در حالی است که امواج ناشی از ترک‌های کششی از نوع فرکانس بالا و RA پایینی می‌باشند. بر مبنای همین نتیجه‌گیری، محققین مختلفی اقدام به طبقه‌بندی شمارش‌های دریافتی از آزمایش مکانیک شکست جهت شناسایی نوع منشأ آنها کرده‌اند (Aggelis, 2011).

بررسی‌ها نشان می‌دهد که به هنگام بارگذاری و روند شکست نمونه‌ها، در مراحل اول شکست، ترک‌های کششی حادث می‌شوند. سپس نوبت به ترک‌های مد ترکیبی (کششی و برشی) می‌رسد. در پایان ترک‌های برشی حاصل خواهند شد. شکل ۲-۲۴ نمونه‌ای از این طبقه‌بندی برای ۹۸ نمونه سنگ می‌باشد. هر نقطه معرف RA و AF برای مراحل مختلف شکست می‌باشد. مطابق این شکل، ریزترک‌های اولیه عمدتاً دارای فرکانس بالا و مقدار RA پایین می‌باشند. در حالی که ماکروترک‌هایی که در مراحل بعدی تولید می‌شوند، دارای فرکانس و مقدار RA بالا می‌باشند. لذا می‌توان گفت که ریزترک‌های اولیه دارای منشأ کششی بوده و ماکروترک‌های ثانویه با منشأ عمدتاً برشی می‌باشند. زمانی که AF سیگنال‌ها بیشتر از مقدار  $200 + 0.3RA$  باشد، می‌توان نوع ترک را با اطمینان بالا کششی طبقه‌بندی کرد (Aggelis, 2011).



شکل ۲-۲۴: طبقه‌بندی مراحل مختلف شکست براساس مشخصات انتشار آوایی (Aggelis, 2011)

## ۲-۱۸- مزایا روش انتشار آوایی

۱- اساساً یک روش موضعی و متمرکز نیست و لزوماً نباید نزدیک منبع انتشار باشد. در مقایسه با روش‌های دیگر حجم بالاتری را مقایسه می‌کند و اغلب قادر به شناسایی عیوب در فواصل بیش از چندین متر تا سنسور است (Finlayson et al., 2001).

۲- در مقایسه با بیشتر روش‌های غیر مخرب در آزمون انتشار آوایی ناپیوستگی خودش راه‌انداز انرژی است و قطعه خودش سیگنال ایجاد می‌کند (Zohora, 2016).

۳- قادر به شناسایی عیوب بسیار ریز است و می‌تواند عیوب مختلفی را با ابعاد ۱ میکرومتر شناسایی کند (Finlayson et al., 2001).

۴- این روش قادر است یک سازه کامل را در شرایط عملیاتی آن ارزیابی کند و بازرسی درست در زمان رشد یک عیب و بلادرنگ انجام می‌شود. به همین دلیل می‌توان از این روش برای پیش‌پیوسته تجهیزات در زمان سرویس دهی استفاده کرد (Finlayson et al., 2001).

۵- بازرسی با سرعت بالایی انجام شده و نتایج ذخیره می‌شود. می‌توان این نتایج را در بازرسی‌های بعدی ارزیابی نمود.

۶- در این روش قابلیت بازرسی از راه دور وجود دارد و می توان داده ها را به صورت کنترل از راه دور انتقال داد (Finlay son et al., 2001).

۷- آزمون انتشار آوایی یک روش دینامیک است و حرکت ها را شناسایی می کند در صورتی که سایر روش

های غیر مخرب ناپیوستگی های هندسی را شناسایی می کنند (Finlay son et al., 2001).

۸- آزمون انتشار آوایی می تواند در تمامی مراحل بازرسی که شامل آزمون قبل از سرویس دهی و حین سرویس دهی است انجام شود (Finlay son et al., 2001).

۹- این روش نسبت به هندسه قطعات مورد آزمون حساسیت کمی دارد (Zohora, 2016).

۱۰- نسبت عملکرد به هزینه در آزمون انتشار آوایی مناسب است.

۱۱- قادر به آزمون خصوصیات و مشخصات مواد است.

۱۲- آزمون انتشار آوایی قادر به بازرسی سطوح غیر قابل دسترس برای روش های دیگر غیر مخرب است (WWW.Iran- Mavad.com).

## ۲-۱۹- محدودیت های روش انتشار آوایی

۱- ترک هایی که نه رشد می کنند و نه حرکت می کنند، انتشار آوایی تولید نمی کنند و بنابراین نمی توان آن ها را شناسایی نمود.

۲- انتشار آوایی یک اتفاق منحصر به فرد است و در بارگذاری مشابه تکرار پذیر نمی باشد.

۳- سیگنالهای شناسایی شده انرژی پایینی دارند که برای شناسایی آن ها به تجهیزات الکترونیکی پیچیده و نسبتاً گران قیمتی نیاز است.

۴- انتشار آوایی می تواند در معرض نویزهای خارجی قرار بگیرد به طوریکه نویز پس زمینه گاهی اوقات به سختی از سیگنالها تفکیک می شود.

۵- آزمون انتشار آوایی در مورد نویزهایی که از آستانه شناسایی فراتر می روند حساس است و آنها را نیز مانند سیگنالهای مفید آوایی پردازش می کند. در این صورت آستانه شناسایی باید افزایش یابد

که آن هم به فاصله کمتر بین سنسورها و در نتیجه استفاده از سنسورها و کانالهای بیشتر منتهی می شود. در بالاتر از یک سطح نویز معین آزمون کارآمد خوبی ندارد (WWW.Iran- Mavad.com).

## ۲-۲۰- جمع بندی فصل

در این فصل ابتدا اصول اولیه علم مکانیک شکست و مکانیک آسیب ارائه شد تا با استفاده از آن نقش عوامل موثر در شروع آسیب و گسترش ترک و شکست مواد ترد مورد بررسی قرار گیرد. سپس با ذکر انواع روش های رفتارنگاری شکست، به تشریح کامل روش انتشار آوایی و روش های تحلیلی که می توان توسط آن انجام داد، پرداخته شد. در پایان مزایا و محدودیت های روش انتشار آوایی تشریح شد و مشاهده شد که آزمون انتشار آوایی در زمینه رفتارنگاری شکست سنگ کارایی خوبی دارد.

فصل سوم: مروری بر مطالعات

گذشته

## ۳-۱- مقدمه

برای درک درست و بهتر از کاربرد روش انتشار آوایی در رفتار نگاری شکست، لازم است تحقیقات و پژوهش های بنیادین بر روی این موضوع انجام گیرد. برای این منظور باید پیشینه تحقیق را بررسی کرد و پژوهش جدید را با پژوهش های پیشین ارتباط داد. پژوهش در زمینه رفتار نگاری شکست به وسیله ی روش انتشار آوایی در سال های اخیر مورد توجه محققان کشورهای مختلف قرار گرفته است که در ادامه به بیان مختصر برخی از این پژوهش ها پرداخته شده است.

## ۳-۲- پیشینه تحقیق

اهمیت رفتار نگاری شکست در سازه های معدنی و عمرانی به طور کلی مستلزم تحقیقات زیادی است. پژوهشگران در سراسر جهان به تحقیق و بررسی رفتار نگاری شکست به وسیله ی روش انتشار آوایی پرداخته اند و با استفاده از روش های تحلیلی مختلف انتشار آوایی، مکانیزم شکست را مورد بررسی قرار داده اند، که با توجه به اقتضای تحقیق حاضر و دسترسی کم منابع معتبر علمی برخی از مهم ترین مطالعات انجام شده پیشین به دقت مورد مطالعه قرار گرفته اند که خلاصه ای از کارهای انجام گرفته شده در زیر ارائه شده است.

### مطالعات ابرت (۱۹۴۱)

تحت تنش اعمال شده به سنگها صداهایی را در دامنه های سطوح مختلف کشف کردند. ابتدا این صداها صحبت سنگ نام گرفتند اما بعدها دروازه هایی برای یک روش جدید برای آنالیز سنگ ها تحت تنش اعمالی به نام تکنیک انتشار آوایی باز شد. امروزه این روش به عنوان ابزاری در زمینه های مختلف کاربردهای فراوانی دارد. نه تنها سنگ ها بلکه مواد دیگری مانند فلزات و بتن و سرامیک هم تحت تنش اعمالی امواج صوتی ساطع می کنند (Obert, 1941).



### مطالعات ابرت و دیووال (۱۹۴۵)

رفتارنگاری انتشار آوایی در سنگ را هنگام کار در معادن زیرزمینی برای پیش بینی شکست سنگ به کار بردند (Obert and Duvall, 1945).

### مطالعات موگی (۱۹۶۲)

انتشار آوایی را در آزمونهای آزمایشگاهی برای فهم بهتر فرآیند شکست سنگ استفاده کرد. به عنوان مثال، زمین لرزه های طبیعی را که در مقیاس پوستی رخ می دادند مانند یک عارضه شکست که در مقیاس میکرو اتفاق افتاده بود در نظر گرفت (Mogi, 1962).

### مطالعات موگی (۱۹۶۸)

فرآیندهای قبل از آسیب و آسیب های اصلی و پس از آسیب را با رفتارنگاری انتشار آوایی از طریق شکست نمونه های سنگ مورد بررسی قرار داد (Mogi, 1968).

### مطالعات اسچولز (۱۹۶۸)

فرآیند شکست سنگ را مطالعه کرد و رابطه ی بین ریزترک ها و تغییر شکل غیر الاستیک را مورد بررسی قرار داد (Scholz, 1968).

### مطالعات نیشیزاوا و همکاران (۱۹۸۴)

آزمایشات خزش نمونه سنگ را تحت تنش تک محوره ثابت انجام داد و با استفاده از داده های انتشار آوایی دسته ای از ریزترک های اولیه را با گسیختگی در مقیاس میکرو تشریح کرد. تحقیقات گروهی او همچنین مفهوم استفاده از نرخ انتشار آوایی را برای کنترل آزمایشات فشاری توسعه داد (Nishizawa, Onai et al., 1984).

### مطالعات اسپتزلر و همکاران (۱۹۹۱)

چسبندگی لغزشی رخدادها در قبل از شکسته شدن سنگ را با سختی سطح های مختلف توسط ترکیب انتشار آوایی و اندازه گیری تداخل سنجی هولوگرافی<sup>۱</sup> بررسی کردند (Spetzler, Sobolev et al., 1991).

### مطالعات لوکنر و همکاران (۱۹۹۱)

با استفاده از روش انتشار آوایی، آزمایشات آزمایشگاهی بر روی نمونه های سنگی را تحت بارگذاری کنترل شده با ثابت نگه داشتن نرخ انتشار آوایی انجام دادند و رابطه ی بین توسعه گسیختگی و شکست برشی را به وسیله ی افزایش انتشار آوایی بررسی کردند (Lockner, Byerlee et al., 1991).

### مطالعات شاه و لابوز (۱۹۹۵)

مکانیزم های منبع رویدادهای انتشار آوایی را تحت بار گذاری تک محوره سنگ بررسی کردند (Shah and Labooz, 1995).

### مطالعات ایشیدا (۲۰۰۴)

آزمون آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی در سنگ را با استفاده از سیالات متفاوت که دارای دی اکسید کربن بودند انجام دادند و اختلاف در ترک های القایی<sup>۲</sup> را برای ویسکوزیته سیال با استفاده از توزیع منابع انتشار آوایی و تحلیل صفحه ی گسل بررسی کردند (Ishida, 2004).

### مطالعات بنسون و همکاران (۲۰۰۸)

یک آزمون آزمایشگاهی برای شبیه سازی ارتعاش یک کوه آتشفشان انجام دادند و مشاهده کردند رویدادهای انتشار آوایی با فرکانس های پایین را که یک ترکیب ضعیف از لغزش برشی سازگار با

---

<sup>۱</sup> Holographic interferometry induced<sup>۲</sup>

رویدادهای راندن سیال که در پایین تر از کوه های آتشفشان اتفاق می افتد را نشان می دهد (Benson, Vinciguerra et al., 2008)

### مطالعات هیپ و همکاران (۲۰۰۹)

آزمون های خزش را با اعمال تنش، تحت فشار آب منفذی انجام دادند و تاثیر تنش بر خوردگی سنگ را با استفاده از داده های انتشار آوایی بررسی کردند (Heap, Baud et al., 2009).

### مطالعات یوشیمیتسو و همکاران (۲۰۱۴)

پیشنهاد کردند که مقیاس میلیمتری شکستگی ها و مقیاس کیلومتری زمین لرزه های طبیعی خیلی شبیه به فرآیندهای فیزیکی هستند و آنالیزهای تانسور زمان انتشار آوایی برای آزمون های آزمایشگاهی به کار می روند (Yoshimitsu, Kawakata et al. 2014).

### مطالعات شن و همکاران (۲۰۱۴)

آزمایشات انتشار آوایی را تحت بارگذاری تک محوره روی نمونه های مکعبی بتن انجام دادند و تاثیر روش های بارگذاری و اندازه بتن را روی پارامترهای مکانیکی و فعالیت های انتشار آوایی بتن بررسی کردند. روش بارگذاری یک ضربه بزرگ روی تغییر شکل، شکست و پراکنندگی انرژی مواد بتن ایجاد کردند. نتیجه گرفتند که با افزایش اندازه مواد مقاومت فشاری تک محوره نمونه های بتن به تدریج کاهش می یابد در حالیکه کرنش متناظر مقاومت اوج ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد و مدول های الاستیک به طور نامنظم نوسان می کنند. تحت شرایط فشاری تک محوره ۵ الگو انتشار آوایی متناظر با تغییر شکل و شکست مواد بتن بدست آوردند. یک رابطه غیرخطی بین انتشار آوایی و سطح تنش بدست آوردند. مجموع انتشار آوایی در تنش اوج رشد غیر خطی را با افزایش سایز بتن نشان می دهد. براساس رابطه بین مجموع حلقه های انتشار آوایی و سطح تنش شرایط ضروری برای سکوت دوره ای انتشار آوایی بدست می آید. تحت سیکل بار گذاری و باربرداری فشاری تک محوره

نسبت متناسب ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد. نتایج بدست آمده راهنمای خوبی از پایش انتشار آوایی برای ارزیابی تنش های داخلی زغال، سنگ و مواد بتن و همچنین قابلیت ارزیابی پایداری آن ها می باشد (Shen, Wu et al., 2014).

### مطالعات خزایی (۲۰۱۵)

برای انجام رساله دکترای خود انرژی های انتشار آوایی را در طی ۷۳ آزمون فشاری تک محوره که روی نمونه های سنگ ضعیف تا خیلی قوی انجام شده بودند، ثبت کرد و به جستجو اختلاف در b-value، مجموع انرژی ثبت شده و ماکزیمم انرژی ثبت شده برای هر آزمون پرداخت و بین انرژی انتشار آوایی بر واحد حجم و انرژی مصرفی بر واحد حجم در سنگ سالم یک رابطه ی خطی ارائه نمود. آن ها این آزمون ها را روی سنگ های با مقاومت و سختی متفاوت با روش های عددی شبیه سازی کردند و با استفاده از مدل های عددی و از طریق یک پارامتر آسیب که به صورت تقسیم مجموع سطوح ترک مشاهده شده در طی آزمون ها بر مجموع سطوح ترک ممکن بر روی هر بخش تعریف می شود، آسیب سنگ سالم را تعیین کرد.

### مطالعات لی و همکاران (۲۰۱۵)

آزمون های برش مستقیم را در مقیاس کوچک با طول های مختلف و در مقیاس بزرگ روی سنگ های زمین لغزه ها انجام دادند. هدف از انجام هر دو آزمون بررسی مکانیزم شکست و پارامترهای مکانیکی سنگ های زمین لغزه بود. تعداد رویداد های انتشار آوایی را تحت شرایط مختلف مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که حداکثر مقدار تعداد رویدادهای انتشار آوایی با افزایش طول سنگ و تنش های قائم افزایش می یابند (Li, Bai et al., 2015).

### مطالعات تسانگوری و همکاران (۲۰۱۵)

برای بررسی مکانیزم شکست سنگ مرمر تحت خمش، فعالیت انتشار آوایی را مورد مطالعه قرار دادند و مشاهده کردند که شکست سنگ مرمر در سه مرحله از فعالیت انتشار آوایی رخ می دهد. در مرحله ی اول فعالیت انتشار آوایی بالاست در مرحله ی دوم فعالیت انتشار آوایی کم می شود و در مرحله ی آخر مجدداً فعالیت انتشار آوایی افزایش می یابد (Tsangouri et al., 2015).

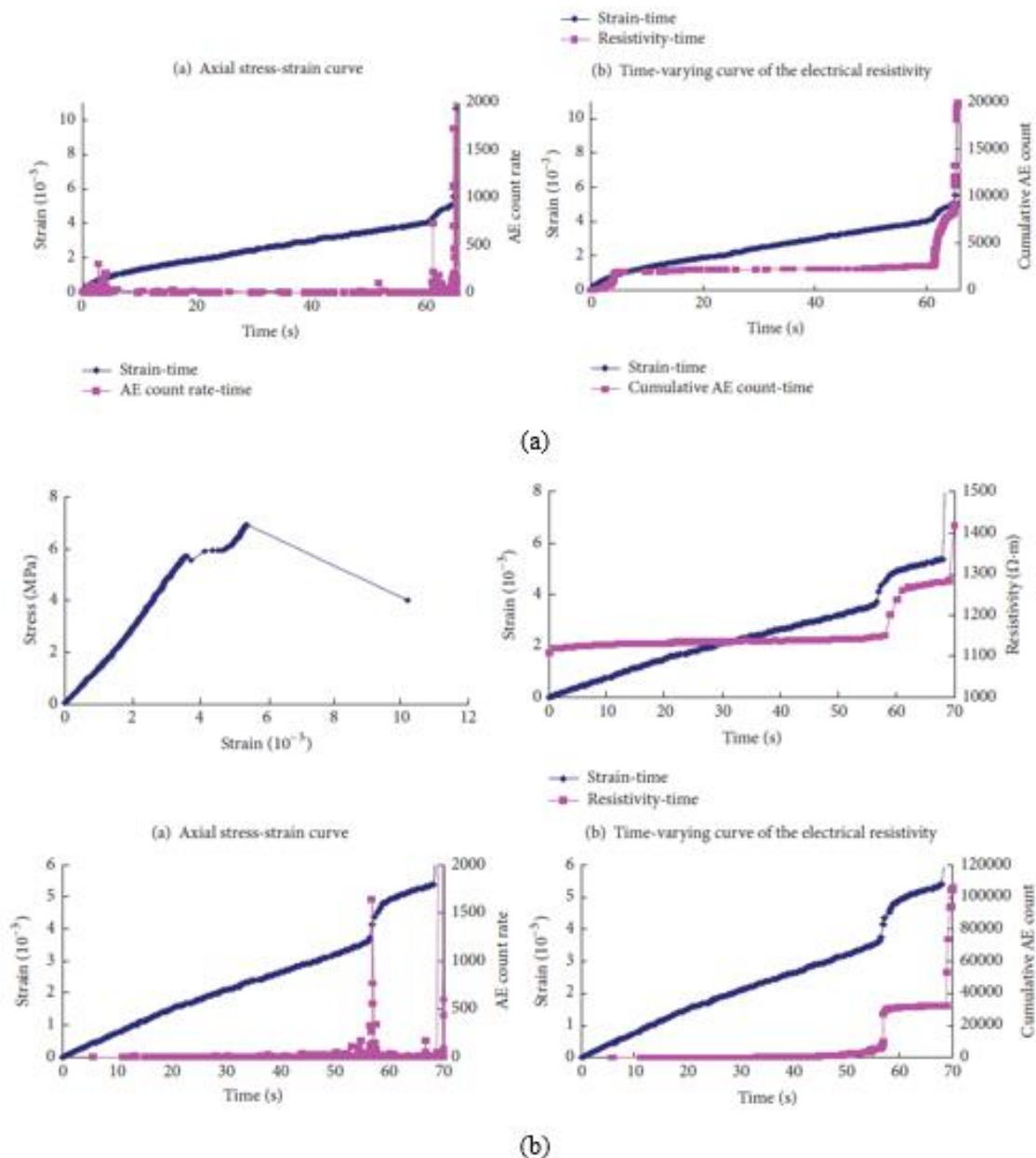
### مطالعات وانگ و همکاران (۲۰۱۵)

با توجه به این که موفقیت تکنولوژی حفاری جت آب به در نظر گرفتن مکانیزم شکست سنگ تحت اصابت جت آب بستگی دارد با ترکیب تکنیک انتشار آوایی و تکنیک صدای تحت تاثیر آب، توسعه تکنولوژی حفاری جت آب را رفتار نگاری کردند. برای این کار آن ها برای چهار نوع سنگ رسوبی مشخصات انتشار آوایی و ارتباط آن ها با کارایی حفار را از طریق طیف فرکانس- زمان بدست آوردند. برای ارزیابی مکانیزم شکست در حفاری به وسیله جت آب از تکنیک انتشار آوایی استفاده کردند و مشاهده کردند که یک ارتباط خوب بین انتشار آوایی و کاربرد جت آب برای حفاری سنگ وجود دارد که شامل نرخ نفوذ، بهره دهی، عمق حفاری و مقاومت سنگ می باشد. سیگنال های انتشار آوایی از دو منبع، سیال دینامیکی جت آب و شکست سنگ در طی فرآیند حفاری سرچشمه گرفته اند. دامنه های فرکانسی روی باندهای مختلف فرکانس ها که برای شناسایی خرده شدن سنگ و آزاد سازی انرژی ساخته می شوند توزیع می شوند. فرکانس های اصلی شکست سنگ بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ کیلوهرتز و فرکانس های دینامیک سیال زیر ۵۰ کیلوهرتز بودند، بنابراین یک رابطه خطی بین انرژی انتشار آوایی و عمق حفاری بدون در نظر گرفتن نوع سنگ وجود دارد. روابط خطی منفی بین انرژی آزاد شده و عمق حفاری برای چهار نوع سنگ تحقیق شده در این مطالعه بدست آوردند. ارتباط خوبی بین شیب خط برآزش شده و مقاومت سنگ وجود دارد و شیب خط ارتباط مستقیم با مقاومت سنگ و اندازه خرده ها دارد بنابراین انرژی مخصوص انتشار آوایی فقط بازتاب بهره دهی حفاری نیست بلکه شاخص خوبی از عمق بحرانی حفاری شده به وسیله جت آب می باشد. همچنین نتیجه گرفتند که

مشخصات انتشار آوایی قادر به شناسایی کارایی جت آب برای حفاری سنگ که شامل نرخ نفوذ، بهره دهی، عمق حفاری است و با خصوصیات سنگ، مقاومت سنگ و اندازه برش مرتبط می باشند. (Wang et al., 2015)

### ایکسو و همکاران (۲۰۱۶)

آزمایش برزلی را روی دو گروه از نمونه های سنگ آهک با بارگذاری در جهت قائم و موازی با صفحه زیرین انجام دادند و مطابق شکل (۳-۱) قوانین واکنش مقاومت ویژه الکتریکی و انتشار آوایی را در دو حالت بارگذاری بدست آوردند و با بارگذاری در جهت های قائم و موازی با صفحه ی زیرین به طور آشکار مشخصات آنیزوتروپی را بدست آوردند.



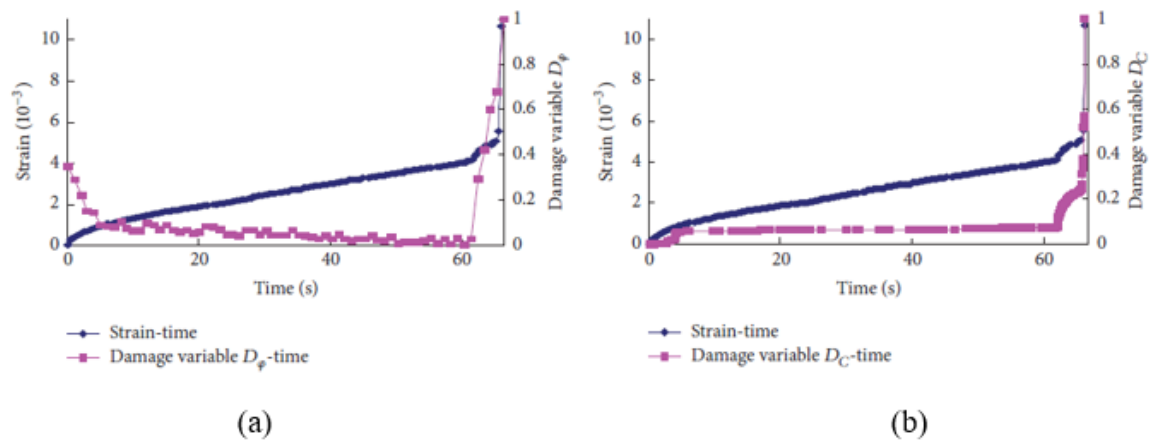
شکل ۳-۱ نمودار نتایج نمونه‌های آزمایش شده (a) بارگذاری در راستای عالتبر لایه بندی (b) موازی لایه بندی Xu,

(Liu et al., 2016)

بر اساس قوانین واکنش مقاومت ویژه الکتریکی<sup>۱</sup> و انتشار آوایی، آسیب را در آزمون برزلی با بارگذاری در جهات مختلف بدست آوردند. بر این اساس متغیرهای آسیب بر اساس مقاومت الکتریکی و مشخصه‌های آوایی اصلاح شدند و قوانین تکاملی متغیرهای آسیب در آزمون شکافت برزلی بدست آمد. درحالت بارگذاری عالتی بر لایه بندی، محاسبه متغیر آسیب بر اساس مقاومت الکتریکی نشان

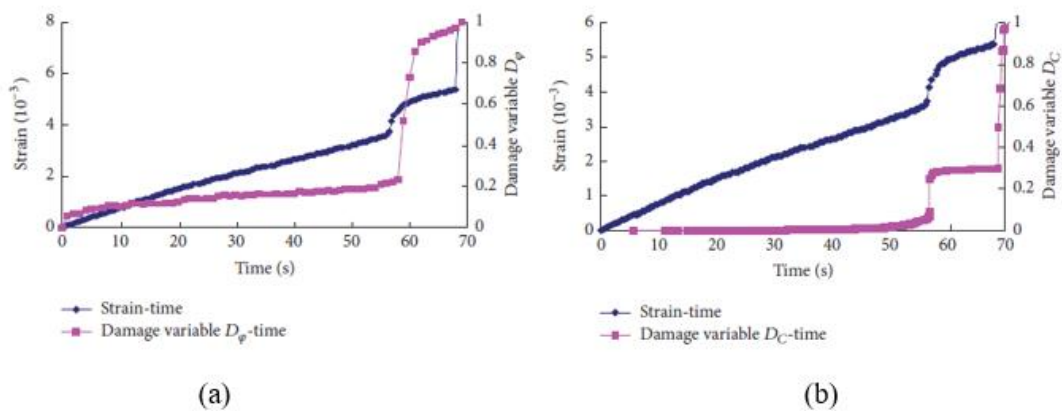
<sup>1</sup>Electrical Resistivity

داد که کاهش قابل توجهی در مرحله بسته شدن ترک‌ها (فشارشی) وجود داشته و همچنین مرحله ضعیف شدن آسیب دیده شده است، در حالی که بر اساس پارامتر آوایی مقدار کمتری افزایش آسیب وجود دارد. به طور خاص، در مرحله تغییر شکل الاستیک، هر دو متغیر آسیب به آرامی بدون تغییر قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته، و در تغییر شکل پلاستیک و مرحله شکست، هر دو متغیر آسیب به سرعت افزایش یافت و در زمان شکست ناگهانی آسیب به سرعت تشدید یافته است (Xu, Liu et al., 2016) (شکل ۲-۳ و ۳-۳)



شکل ۲-۳ نمودار متغیر آسیب-زمان نمونه با بارگذاری عحاتت برصفحات لایه‌بندی (a) براساس مقاومت الکتریکی (b) براساس پارامتر آوایی (Xu, Liu et al., 2016)

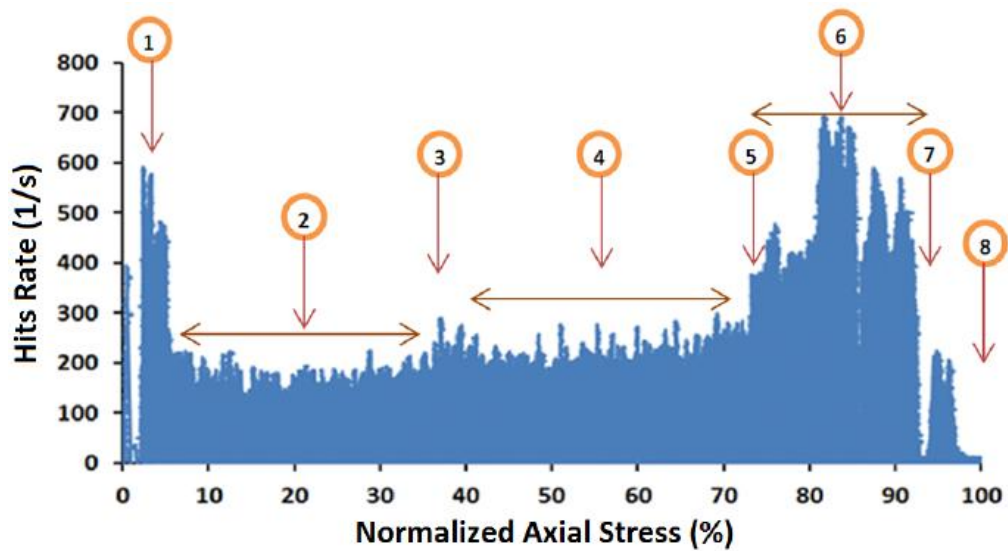




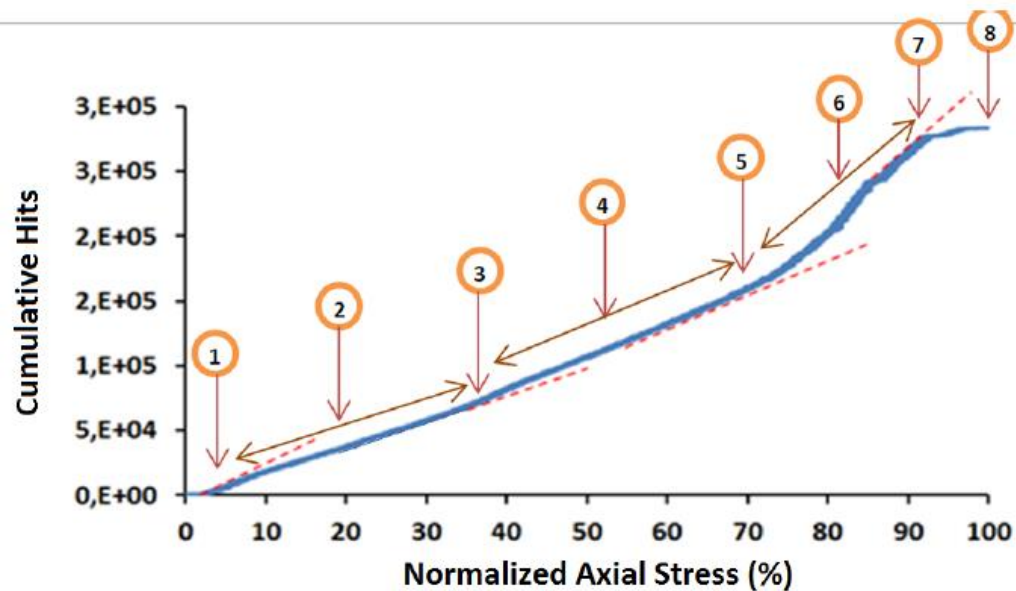
شکل ۳-۳ نمودار متغیر آسیب-زمان نمونه با بارگذاری موازی با صفحات لایه بندی (a) براساس مقاومت الکتریکی (b) براساس پارامتر آوایی (Xu, Liu et al., 2016)

### مطالعات مرادیان و همکاران (۲۰۱۶)

بررسی هایی را روی پارامترهای انتشار آوایی و تغییر شکل توالی برای همه ی سطوح شکست بر روی نمونه های گرانیتهی انجام دادند و سطوح ترک خوردگی را بر اساس ترکیب داده های انتشار آوایی و مقدار تنش اعمال شده، کلاس بندی کردند. این کلاس بندی مطابق نمودار شکل ۳-۴ به ترتیب شامل هشت مرحله بسته شدن ترک ها، تغییر شکل الاستیک خطی، شروع ریزترک ها، رشد ریزترک ها، اتصال ریزترک ها، رشد ماکروترک (رشد ترک ناپایدار)، اتصال ماکروترک ها و گسیختگی است. وجود سیگنال های آوایی در مرحله تغییر شکل الاستیک نشان دهنده سطح لغزشی برشی در سطح ترک اولیه بوده و شروع ریزترک به عنوان شروع ایجاد ترک می باشد. کاهش و افت رخداد های آوایی در مرحله اتصال ماکروترک ها رخ داده و شیب نمودار رخداد های تجمعی به صفر رسیده است (Moradian, Einstein et al. 2016).



(a)



(b)

شکل ۳-۴ (a) نمودار نرخ رخدادهای انتشار آوایی (در هر ثانیه) - (b) تجمعی رخدادهای انتشار آوایی برحسب تنش

تک محوره اعمال شده (Moradian, Einstein et al., 2016)

### مطالعات استاوراکاس (۲۰۱۶)

آزمایش انتشار آوایی را روی نمونه ی بتن که تحت خمش سه نقطه ای قرار داشت، در طی سیکل های بارگذاری و باربرداری های مکرر انجام دادند. سیکل بارگذاری را در شش مرحله انجام دادند تا

سطح بار گذاری بالا شود و سنگ بشکند. نتایج آزمایش نشان دهنده ی وجود اثر کایزر در هر مرحله بود (Stavrakas, Triantis et al., 2016).

### مطالعات سان و همکاران (۲۰۱۶)

آزمایشاتی را برای پیش بینی و کنترل انفجار ناگهانی سنگ روی نمونه هایی با مقادیر مختلف رطوبت انجام دادند و با استفاده از تحلیل روی انرژی انتشار آوایی و فرکانس انتشار آوایی، تاثیر مقدار رطوبت بر این دو پارامتر را مشاهده کردند و از تفسیر آن ها تاثیر رطوبت بر انفجار سنگ را پیش بینی کردند (Sun, Xu et al., 2016).

### ناظری و همکاران (۲۰۱۶)

تاثیر نانو ذرات سیلیس را بر مقاومت و مکانیزم شکست مواد پایه سیمانی با استفاده از سیستم انتشار آوایی بررسی کردند. آن ها از نمونه های مختلف و با ترکیب یکسان (آب، سیمان، سنگ دانه) اما با مقدار متفاوت در نانو ذرات سیلیس در بازه های مختلف نگهداری شده، استفاده کردند. برای رفتار نگاری فرآیند شکست از انتشار آوایی استفاده کردند و مشاهده کردند که با تغییر در مقدار درصد نانو ذرات سیلیس در خمیره ی بتن، پارامترهایی مانند تعداد شمارش، گسترش ترک پایدار و ناپایدار، فرکانس متوسط و زاویه ی خیز تغییر می کنند و وجود رابطه ی خطی بین مقاومت و چقرمگی حالت برشی و کششی نمونه را نتیجه گرفتند.

### مطالعات وانگ و همکاران (۲۰۱۶)

بر روی مقاومت کششی برزلی سنگ های آنیزوتروپی یکسری مطالعات آزمایشگاهی را انجام دادند و از نتایج آماری درجه های آنیزوتروپی، مقاومت آزمون های برشی مختلف با جهت بارگذاری و حالت های شکست رایج برای سنگ های آنیزتروپ را بدست آوردند و براساس مکانیزم شکست، حالت های شکست رایج را در ۵ گروه دسته بندی کردند (Wang, et al., 2016).

## مطالعات زو و همکاران (۲۰۱۶)

روی رویدادهای انتشار آوایی نمونه گرانیت رسی تحت فشار محصور کننده یکسری تحقیقات عددی انجام دادند و برای اندازه گیری رویدادهای انتشار آوایی در شبیه سازی های عددی یک روش کمی ارائه کردند و این روش را برای ارزیابی ترک ابتدایی و گسترش و به هم پیوستگی ترک ها در مواد سنگ به کار بردند (Zhou, et al., 2016).

## مطالعات آگیوتانتیس و همکاران (۲۰۱۶)

انتشار آوایی را در طی آزمون های برزلی انجام شده روی دیسک های ترک دار از نمونه های سنگ مرمر اندازه گیری کردند و سختی ترک های مختلف بار گذاری را محاسبه کردند و ارتباط نتایج بدست آمده

را با پارامترهای انتشار آوایی مورد بحث قرار دادند (Agioutantis, Kaklis et al., 2016).

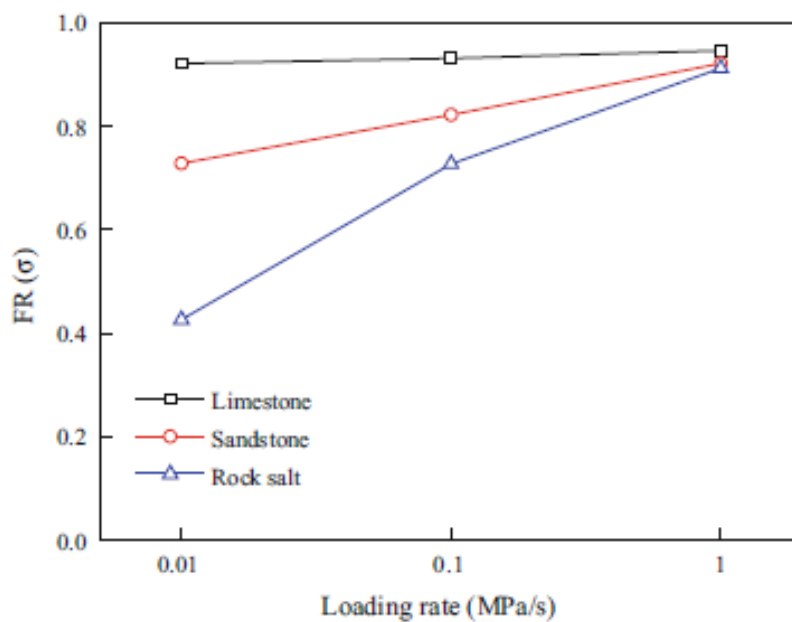
## مطالعات زنگ و همکاران (۲۰۱۷)

برای بررسی اثر نرخ بارگذاری بر روی نسبت متناسب، یکسری آزمایشات انتشار آوایی بر روی سنگ نمک و گرانیت و سنگ آهک از طریق دو سیکل بارگذاری تک محوری انجام دادند و با آنالیز ارتباط بین نرخ بارگذاری و نسبت متناسب به نتایج زیر رسیدند:

۱- در سیکل دوم بارگذاری، سه نوع سنگ فعالیت های انتشار آوایی را به خوبی ارائه کردند که این فعالیت ها قبل از نقطه باربرداری سیکل اول به مقدار ناچیزی شروع می شوند. این پدیده معرف نسبت متناسب سنگ تحت نرخ های بارگذاری مختلف می باشد و نرخ های بارگذاری بالاتر توسعه فعالیت های انتشار آوایی را محدود می کند.

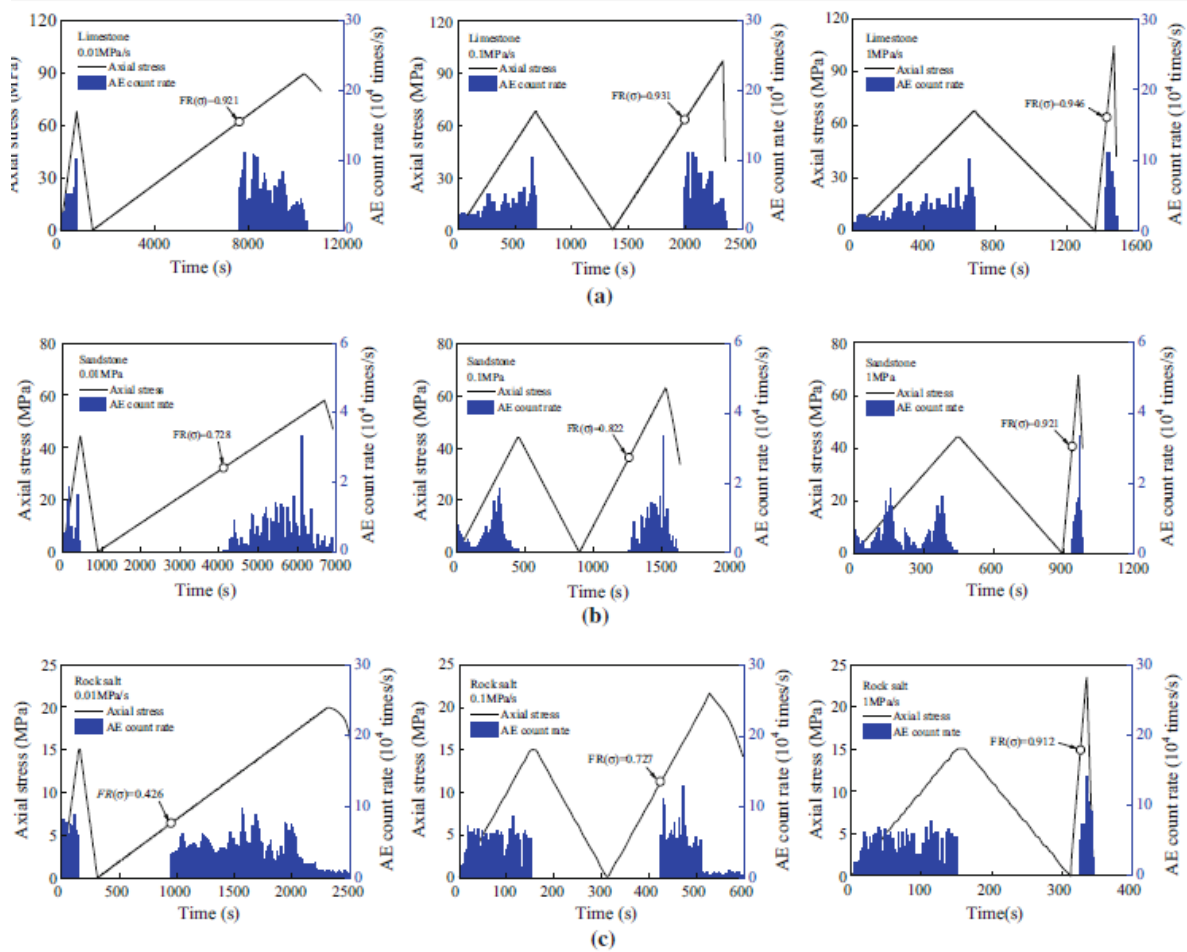
۲- نرخ نسبت متناسب به طور قابل ملاحظه ای به نرخ بارگذاری در طی سیکل بارگذاری آزمون ها بستگی دارد. مطابق شکل ۳-۵ افزایش نسبت متناسب با نرخ بارگذاری در سنگ نشان می دهد که

حافظه های تنش سنگ تحت نرخ های بارگذاری بالا به طور گسترده ای افزایش می یابند. در واقع نرخ های بارگذاری بزرگ برای تخمین تنش های برجا به کار می رود. وابستگی سنگ نمک به نرخ بارگذاری بیشتر از وابستگی گرانیت و سنگ آهک به نرخ بارگذاری است (Zhang, Chen et al., 2017).



شکل ۳-۵ رابطه بین نرخ بارگذاری و نسبت متناسب (Zhang, Chen et al., 2017)

۳- شکل ۳-۶ فعالیت های انتشار آوایی در سه نوع سنگ مختلف و واکنش های متفاوت را در طی دو سیکل بارگذاری نشان می دهند. در واقع اهمیت وابستگی سنگ به سیکل های بارگذاری را بیان می کنند. سنگ نمک ساختار داخلی غیریکنواختی دارد و دارای ترک های اصلی زیادی است. این خصوصیات سبب شروع دسته ای از فعالیت های انتشار آوایی و همچنین کمتر شدن نرخ متناسب در سنگ نمک می شوند. در حالی که سنگ آهک و گرانیت دارای بافت های بهم پیوسته و آرایش هموزنی می باشند که نرخ های متناسب آن ها بالا است.

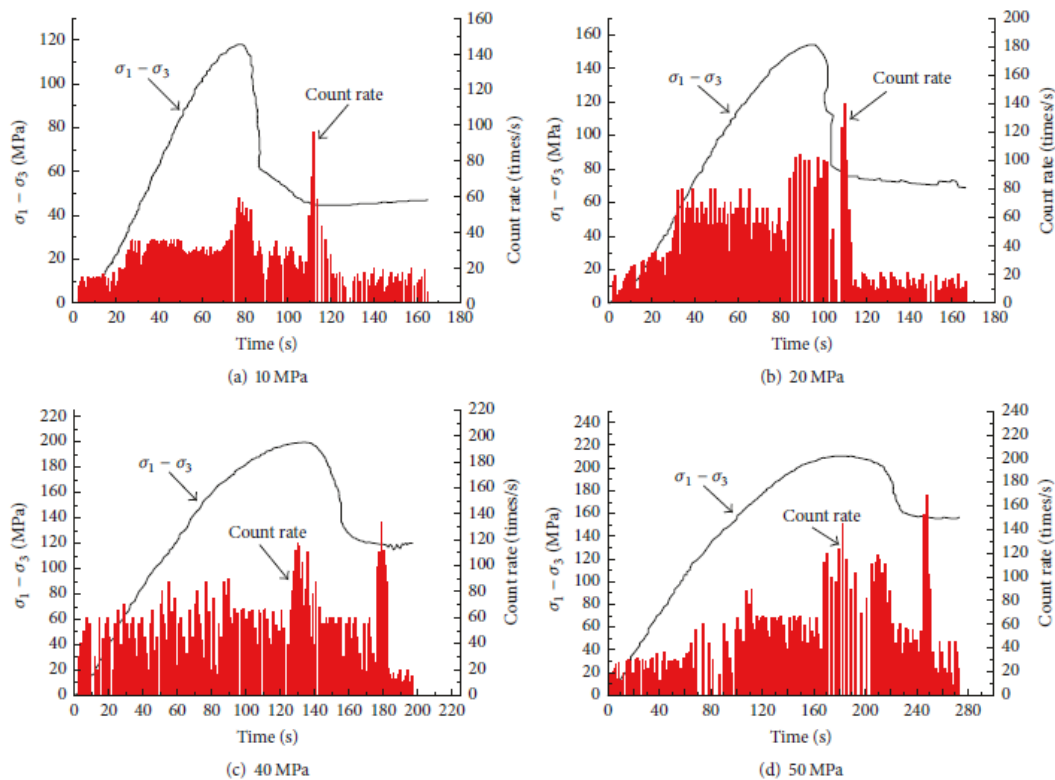


شکل ۳-۶: رابطه بین تنش و نرخ شمارش در طول دو سیکل بارگذاری (a) لیمپازمونون (b) گرانیت (c) سنگ

نمک (Zhang, Chen et al., 2017)

### مطالعات ایکسو و همکاران (۲۰۱۷)

برای بررسی فرآیندهای شکست سنگ سخت، یک سری آزمایشات بارگذاری سه محوره و باربرداری روی نمونه های گرانیتی تحت تنش های جانبی مختلف با استفاده از تکنیک انتشار آوایی انجام دادند و مشخصات انتشار آوایی نمونه های گرانیتی را تحت تنش های مختلف مطابق شکل ۳-۷ بررسی کردند. براساس مسیره های بارگذاری و باربرداری مشخصات انتشار آوایی راکمی سازی کرده و با استفاده از نمودارهای بدست آمده از آزمایشات یک تئوری اساسی برای ارزیابی پایداری سنگ سخت تحت تنش ها بدست آوردند (Xu, Jiang et al., 2017).



شکل ۳-۷ نمودار اختلاف تنش های محوری و نرخ شمارش با زمان در ازای تنش های جانبی مختلف ( Xu, Jiang et al., 2017)

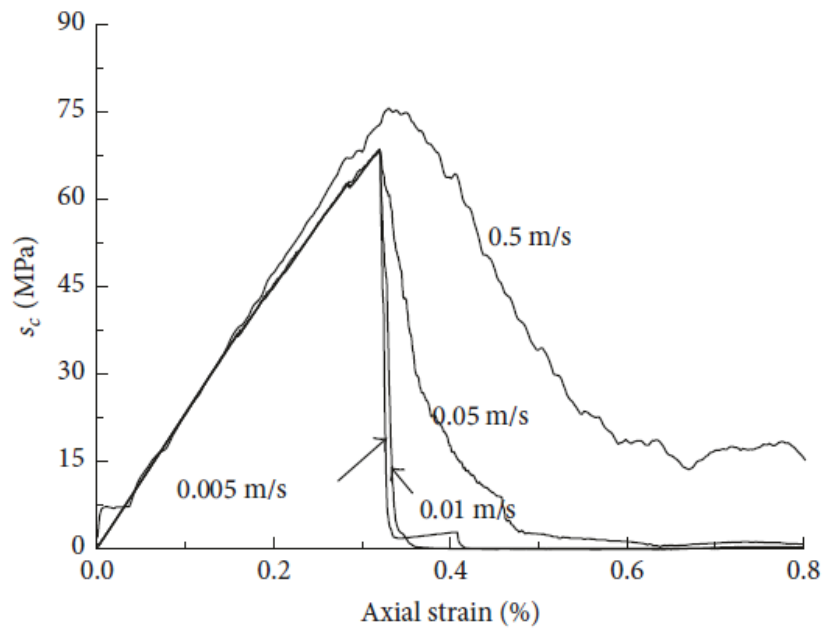
### مطالعات زنگ و همکاران (۲۰۱۷)

مشخصات انتشار آوایی و مکانیزم شکست سنگ شکسته شده گرانیت را تحت نرخ های بارگذاری مختلف را مورد مطالعه و آزمایش قرار دادند و سپس با استفاده از نرم افزار PFC آن ها را به صورت عددی مدلسازی کردند و در پایان به نتایج زیر رسیدند:

۱- نرخ بارگذاری الزاما روی کرنش هر مرحله تاثیر می گذارد و قسمت های هم پوشان تغییرات تنش و کرنش منتهی شده از نرخ های بارگذاری نیست (شکل ۳-۸).

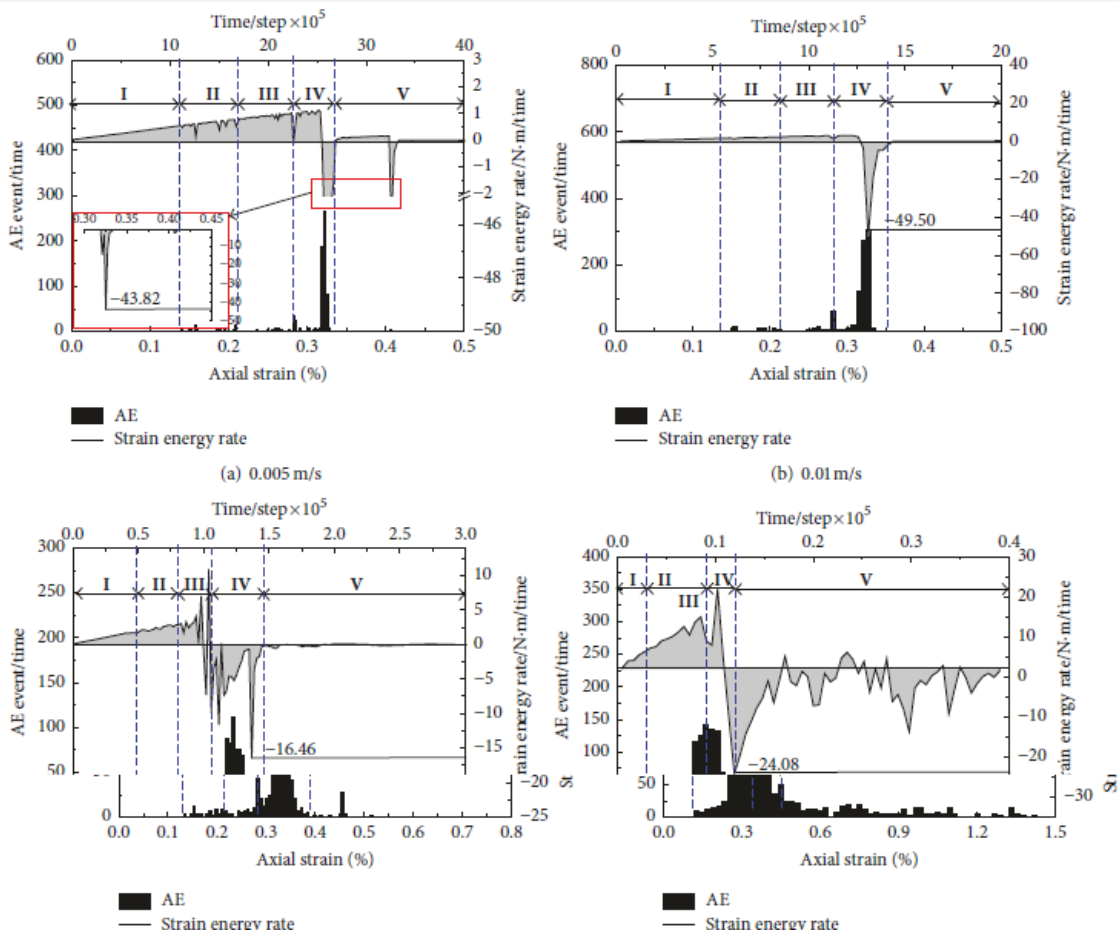
۲- نرخ انرژی کرنشی و رویداد های انتشار آوایی در سنگ شکسته شده به نرخ بارگذاری بستگی دارند. به گونه ای که با افزایش نرخ بارگذاری رویدادهای انتشار آوایی و نرخ انرژی کرنشی ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد (شکل ۳-۹).

۳- تحت یک بار خارجی خرده های داخل یک نمونه پیوسته فشرده، چرخیده و جابه جا می شوند. این فرآیند همراه با پراکندگی انرژی از طریق تولید ترک های کششی و برشی داخلی می باشد که نتیجه آن به هم پیوستگی و توزیع ترک ها در سنگ و در نهایت شکسته شدن سنگ می باشد (Zhang, Wang et al., 2017).



شکل ۳-۸ نمودار تنش بر حسب کرنش در ازای تغییرات نرخ بارگذاری (Zhang, Wang et al. 2017)





شکل ۳-۹ منحنی های نرخ کرنش و پارامترهای آوایی در ازای تغییرات نرخ بارگذاری (Zhang, Wang et al., 2017)

### مطالعات کاکلیس و همکاران (۲۰۱۷)

اندازه گیری های انتشار آوایی را روی نمونه های شکسته شده سنگ مرمر که تحت آزمون برزیلی قرار داشتند، انجام دادند سپس سختی شکست را از روش های مختلف بارگذاری محاسبه کردند و نتایج را با پارامترهای انتشار آوایی بحث کردند (Kaklis, Mavrigiannakis et al., 2017).

### مطالعات کونگ و همکاران (۲۰۱۷)

پارامترهای غیرخطی انتشار آوایی را در طی تغییر شکل و شکست گرانیت در دماهای مختلف مورد بررسی قرار دادند (Kong, Li et al., 2017).

## مطالعات یان و همکاران (۲۰۱۷)

با تاثیر مقیاس های متقاطع مختلف را بر خصوصیات مکانیکی و خصوصیات انتشار آوایی سنگ و بدنبال آن ها بر مکانیک آسیب بررسی کردند و به نتایج زیر دست یافتند:

۱- با افزایش نرخ مقیاس متقاطع مقاومت فشاری تک محوره ابتدا کاهش می یابد و سپس افزایش می یابد و ساختار را به شکل V نشان می دهد.

۲- با افزایش نرخ مقیاس متقاطع، درج آسیب و نرخ آسیب سنگ ها ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد.

۳- نرخ مقیاس متقاطع تاثیر کمی بر ماکزیمم نرخ رخداد و محدوده کرنش انتشار آوایی دارد (Yan, Jun et al., 2017).

## مطالعات ون و همکاران (۲۰۱۷)

اثر مقیاس زغال سنگ و تاثیر نسبت های مختلف قطر به وزن نمونه های زغال سنگ را روی خصوصیات انتشار آوایی بررسی کردند و فرآیند گسیختگی و آسیب را با مدلسازی بوسیله نرم افزار PFC مورد بحث قرار دادند و نتیجه گرفتند که، اندازه زغال سنگ روی مقاومت فشاری تک محوره، کرنش اوج و مدول های الاستیک خودش تاثیر می گذارد و تاثیر کمی بر قانون انتشار آوایی و فرآیند آسیب دارد. تاثیر مقیاس نمونه های زغال سنگ روی خصوصیات انتشار آوایی به طور کلی از سه جنبه منعکس می شود: ۱- زمان رها سازی انتشار آوایی ۲- محدوده کرنش قدرت انتشار آوایی ۳- شدت انتشار آوایی

وقتی نسبت قطر به وزن نمونه های زغال سنگ بزرگتر از ۱ است، مقاومت نسبت عکس دارد با نسبت قطر به وزن نمونه ها و وقتی نسبت قطر به وزن نمونه ها کمتر از ۱ باشد قانون و قاعده ی خاصی وجود ندارد و خصوصیات مکانیکی بعد از نقطه ی اوج خیلی پیچیده هستند. با افزایش نسبت قطر به وزن نمونه ها، کرنش اوج زغال سنگ به تدریج کاهش می یابد اما مدول های الاستیک به همان نسبت افزایش می یابند.

هر چه اندازه سنگ بزرگتر باشد، زمان رهاسازی انتشار آوایی سریعتر می باشد و رنج کرنش بزرگتر در زیاد بودن رخداد های انتشار آوایی اتفاق می افتد. هر چه اندازه سنگ ها بزرگتر باشد، شدت خصوصیات انتشار آوایی در اطراف زمان خیز بیشتر (بزرگتر) است.

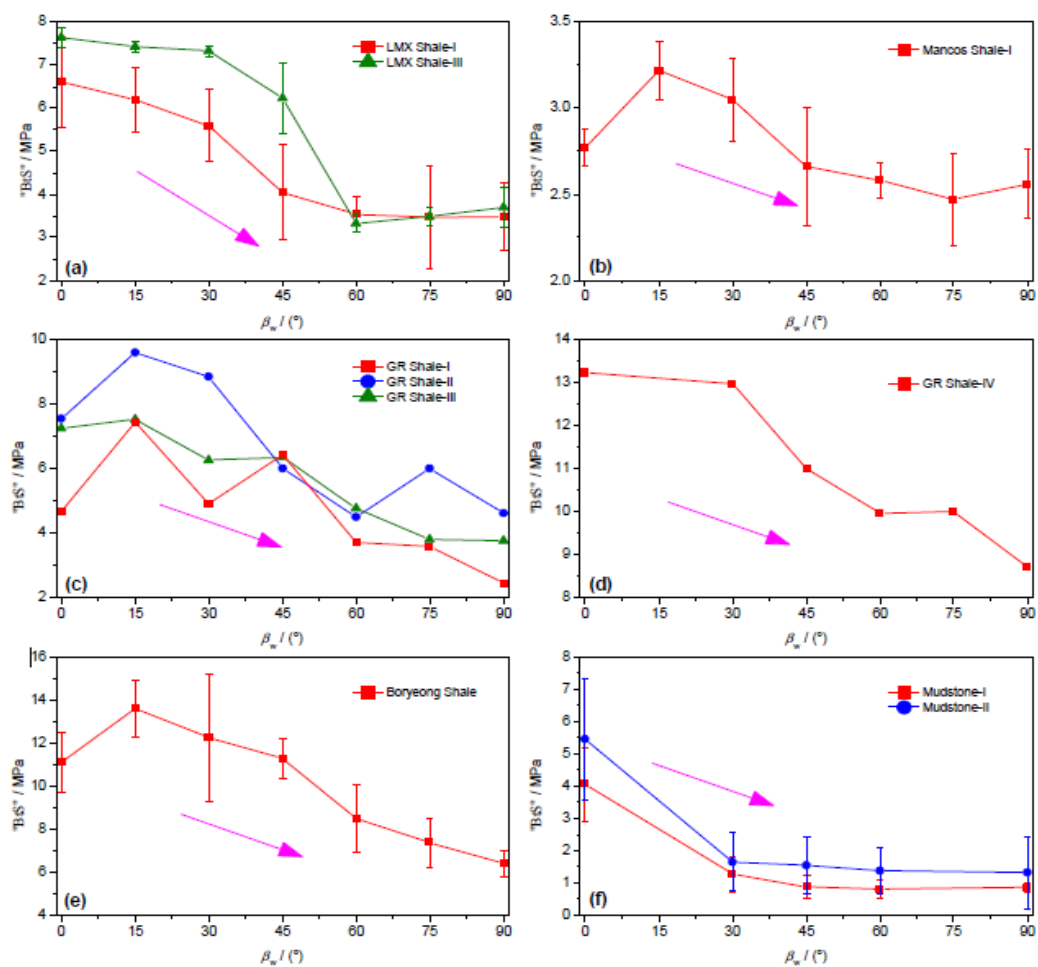
و همچنین نتیجه گرفتند که ارزیابی آسیب نمونه های زغال سنگ می تواند در چهار گروه طبقه بندی شود:

۱- آغاز آسیب ۲- مرحله ی ارزیابی پایداری آسیب ۳- مرحله ارزیابی شدت آسیب ۴- آسیب یا گسیختگی

اثر اندازه نمونه زغال سنگ روی آسیب متغیر و بی ثبات، شدت کمی در مراحل اول و دوم و چهارم دارد و اثر اندازه روی آسیب متغیر شدت بیشتری در مرحله سوم دارد (Wen, Wang et al., 2017).

مطالعات ماپنگ و همکاران (۲۰۱۸)

بر روی مقاومت کششی برزیلی سنگ های آنیزوتروپی یکسری مطالعات آزمایشگاهی را انجام دادند و از نتایج آماری درجه های آنیزوتروپی، مقاومت آزمون های برشی مختلف با جهت بارگذاری مطابق شکل ۳-۱۰ برای سنگ های آنیزتروپ را بدست آوردند.

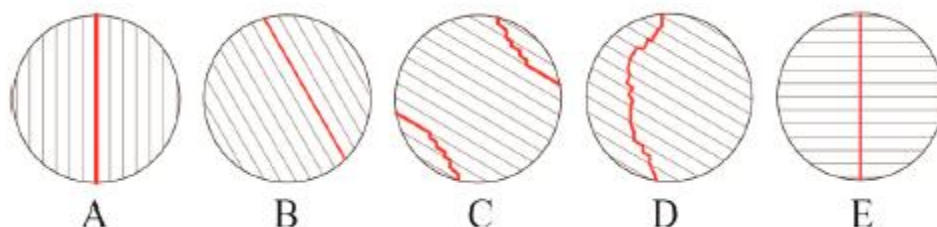


شکل ۳-۱۰ نمودار مقاومت برشی بر حسب زاویه صفحات ضعیف با راستای بارگذاری (Ma, Peng et al., 2018)

براساس مکانیزم شکست، حالت های شکست رایج را در ۵ گروه دسته بندی کردند (Ma, Peng et

al., 2018)

(شکل ۳-۱۱).

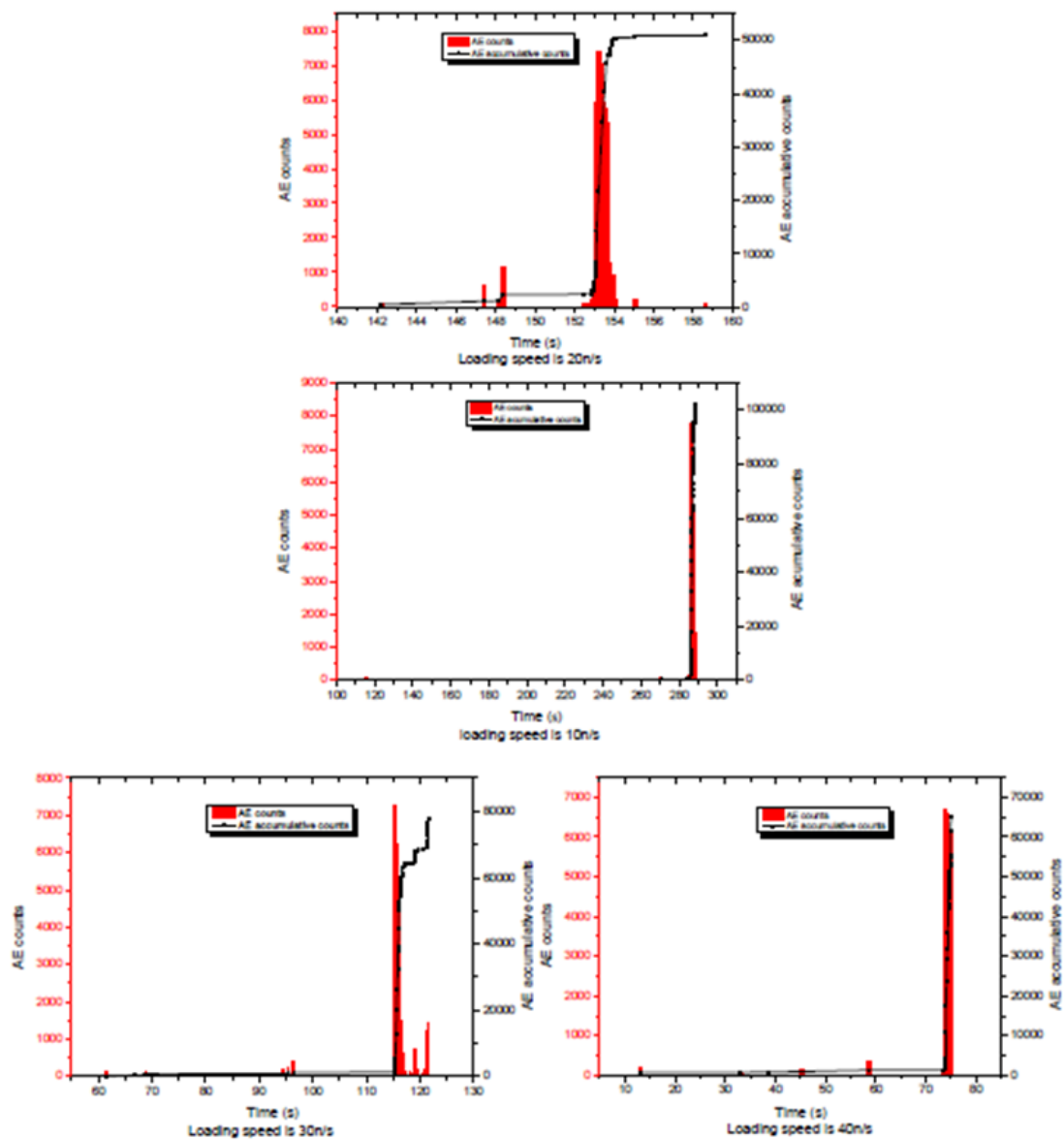


شکل ۳-۱۱ پنج نوع از انواع حالت های گسیختگی (A) گسیختگی کششی خالص در راستای لایه بندی (B)

گسیختگی برشی خالص در راستای لایه بندی (C) گسیختگی با مد ترکیبی (نتیجه گسیختگی برشی می‌باشد) (D)  
گسیختگی با مد ترکیبی (نتیجه گسیختگی کششی می‌باشد) (E) گسیختگی کششی خالص در ماتریکس سنگ (Ma,  
Peng et al.,)

### مطالعات لی و همکاران (۲۰۱۸)

آزمایش خمش سه نقطه ای را روی نمونه گرانیت تهیه شده از سقف یک معدن زغال، تحت نرخ های بارگذاری مختلف بر اساس انتشار آوایی انجام دادند و از طریق تحلیل پدیده انتشار آوایی نتیجه گرفتند که شکست گرانیت یک شکست شکننده است. تعداد شمارش انتشار آوایی تحت سرعت کم بارگذاری مطابق شکل ۳-۱۲ بیشتر از تعداد آن در سرعت بالا بارگذاری است که این نشان دهنده این است که ترک داخلی به طور کامل اتفاق می افتد و به سرعت کم بارگذاری وابسته است (Li and Li, 2018).



شکل ۳-۱۲، رابطه بین شمارش انتشار آوایی، شمارش تجمعی انتشار آوایی و زمان (Li and Li 2018)

### ۳-۳- جمع بندی فصل

در این فصل، به بیان پژوهش های مرتبط با موضوع تحقیق پرداخته شد و نتیجه گرفته شد روش انتشار آوایی در زمینه مکانیک شکست کاربرد گسترده ای دارد. و می توان با استفاده از روش انتشار آوایی مطالعات عددی، مدلسازی و آزمایشگاهی فراوانی برای شناسایی رفتار شکست سنگ و سازه در

برابر بار و تنش اعمالی انجام داد. در فصل آتی به منظور بررسی ارتباط پارامترهای آوایی با آسیب و گسیختگی سنگ، مطالعات آزمایشگاهی با استفاده از روش انتشار آوایی انجام می شود.





## فصل ۴ : مطالعات آزمایشگاهی

#### ۴-۱- مقدمه

روش انتشار آوایی یکی از آزمون های غیر مخرب به شمار می آید و دارای کاربردهای منحصر به فردی می باشد یکی از کاربردهای این روش مطالعه مکانیک آسیب و شکست مواد مختلف است. در این فصل به بررسی شکست و تئوری آسیب با استفاده از داده های بدست آمده از روش انتشار آوایی و آزمون های فشاری تک محوره و برزیلی برای دو نوع سنگ مختلف پرداخته شده است. از این داده ها برای بررسی ارتباط پارامترهای انتشار آوایی با سیر شکست سنگ و تئوری آسیب استفاده شده است.

#### ۴-۲- آماده سازی نمونه ها و آزمون ها

برای بررسی ارتباط پارامترهای انتشار آوایی با سیر شکست سنگ و تئوری آسیب از نمونه های یکدست و همگن سنگ های گرانیت و زئولیت استفاده شده است. نمونه ها پس از آماده سازی تحت آزمون های مقاومت فشاری تک محوره و برزیلی قرار گرفته و همزمان با اتصال سنسور های آوایی انجام شده است. در ادامه با استفاده از پارامترهای آوایی به بررسی ارتباط پارامترهای آوایی با سیر شکست سنگ پرداخته شده است.

نمونه های استفاده شده در این پژوهش از دو نوع سنگ گرانیت و زئولیت مغزه گیری شده اند. تعداد ۳۸ نمونه برای انجام آزمون های مختلف در این تحقیق آماده شده است. این نمونه ها برای انجام آزمایش تعیین خواص مکانیکی سنگ ها (مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی برزیلی، تخلخل و چگالی) و انجام آزمایش های بارگذاری نمونه های استوانه ای و دیسکی همراه با انتشار آوایی تهیه شده اند. برای تعیین خواص مکانیکی و مقاومت فشاری تک محوره از هر سنگ یک نمونه تحت استاندارد NX قطر ۵۴ میلیمتر و ارتفاع ۱۱۰ میلیمتر و برای تعیین مقاومت کششی برزیلی از هر سنگ یک نمونه تحت استاندارد NX و ارتفاع ۲۸ میلیمتر مغزه گیری و تهیه شده است. تعداد ۲۰ نمونه برای انجام آزمایش های بارگذاری فشاری همراه با انتشار آوایی از هر سنگ تعداد ۱۰ نمونه با قطر ۳۶ میلیمتر و ارتفاع ۷۲ میلیمتر و تعداد ۱۷ نمونه به قطر ۳۶ میلیمتر و ارتفاع ۲۸ میلیمتر از هر

یک از سنگ ها برای انجام آزمایش های نمونه های دیسکی همراه با انتشار آوایی آماده سازی شده اند.

برای انجام آزمون های انتشار آوایی و بررسی ارتباط پارامترهای آن با سیر شکست سنگ و تئوری آسیب، خواص فیزیکی و مکانیکی برای نمونه های انتخاب شده بایستی مشابه بوده و شرایط آزمایش برای همه نمونه ها یکسان باشد. به همین جهت، نمونه های مغزه سنگ برای هر نوع سنگ از یک بلوک مشابه تهیه شدند. بلوک های سنگی گرانیات و سنگ زئولیت تهیه شدند.

طبق استاندارد ارایه شده توسط ISRM<sup>1</sup> برای انجام آزمایش تراکم تک محوره، نمونه ها باید استوانه ای بوده و نسبت ارتفاع به قطر آنها بایستی حداقل بین ۱/۵-۲/۵ باشند. لازم است دو سطوح انتهایی نمونه به طور کامل صاف و صیقلی باشند و مقدار صافی این سطوح باید حدود ۰/۰۲ mm باشد. همچنین عحات بودن سطح به محور نمونه نیز باید حدود ۰/۰۰۱ رادیان باشد. در این پژوهش سعی شده است تمام این موارد رعایت شود.

با استفاده از دستگاه مغزه گیری و مته های با قطرهای ۵۴ و ۳۶ میلی متری از بلوک های سنگ های یاد شده، نمونه های مغزه استوانه ای تهیه گردید. شکل ۴-۱ تصویر دستگاه مغزه گیری را نشان می دهد. پس از آن، جهت تعیین خواص مکانیکی سنگ ها از هر سنگ یک مغزه با قطر ۵۴ میلی متر در طول ۱۱۰ میلی متر و برای انجام آزمون انتشار آوایی همراه با بارگذاری فشاری نمونه های دیسکی، مغزه های با قطر ۵۴ میلی متر با ضخامت ۲۸ میلی متر و برای انجام آزمون انتشار آوایی همراه با بارگذاری فشاری مغزه های استوانه ای با قطر ۳۶ میلی متر در طول ۷۳ میلی متر توسط دستگاه برش سنگ (شکل ۴-۲) برش و تهیه شدند. سپس تمام نمونه ها پس از برش، نام گذاری شدند. شکل های ۳-۴ تا ۸-۴ به ترتیب تصویر نمونه های بدست آمده و نام گذاری شده برای هر یک از سنگ های گرانیات و زئولیت را نشان می دهند، که همگی برای انجام آزمایش انتشار آوایی تهیه شده اند. تعداد

---

<sup>1</sup>International Society for Rock Mechanics

نمونه‌های مغزه برای هریک از سنگ‌های گرانیت و زئولیت در راستای انجام آزمایش و هم‌چنین جهت تعیین خصوصیات مکانیکی هر یک از سنگ‌ها برای هر دو قطر مغزه ۵۴ و ۳۶ میلی‌متر در جدول ۴-۱ آورده شده است.



شکل ۱-۰: تصویر دستگاه مغزه‌گیری مورد استفاده.



شکل ۲-۰: تصویر دستگاه برش سنگ.



شکل ۳-۰: نمونه‌های استوانه‌ای تهیه شده از بلوک‌های سنگ گرانیت و زئولیت



شکل ۴-۴: نمونه‌های دیسکی تهیه شده از بلوک‌های سنگ گرانیت و زئولیت



شکل ۴-۵ نمونه‌های استوانه‌ای تهیه شده از بلوک سنگ گرانیت جهت انجام آزمایش‌های بارگذاری فشاری تک محوره و انتشار آوایی



شکل ۴-۶: نمونه‌های دیسکی تهیه شده از بلوک سنگ گرانیت جهت انجام آزمایش‌های بارگذاری فشاری و انتشار آوایی





شکل ۴-۷ نمونه‌های استوانه‌ای تهیه شده از بلوک سنگ زئولیت جهت انجام آزمایش‌های بارگذاری فشاری تک محوره و انتشار آوایی



شکل ۴-۸ نمونه‌های دیسکی تهیه شده از بلوک سنگ زئولیت جهت انجام آزمایش‌های بارگذاری فشاری و انتشار آوایی

جدول ۱-۰: تعداد نمونه‌های تهیه شده برای هریک از سنگ‌ها.

زئولیت	گرانیت	نوع سنگ
۱۰	۹	تعداد مغزه سنگ با قطر m ۳۶m
۷	۱۲	تعداد مغزه با قطر m ۵۴m

۴-۳- دستگاه

بارگذاری و مشخصات آن

دستگاه مورد استفاده در این آزمایش یک دستگاه اعمال بار به صورت فشارش ساخت شرکت کنترلز ایتالیا مدل C53B02 از سری پیشرفته و تولید سال ۲۰۱۶ است (شکل ۴-۹). این دستگاه وزنی حدود ۱۰۴۰ کیلوگرم) و ظرفیت حداکثر نیروی ۳۰۰۰KN با سطح پیستون ۴۸۳۰۵,۱ mm را دارد و می‌تواند بارگذاری‌های تراکمی را بر روی نمونه‌ها اعمال نماید. همچنین این دستگاه قابلیت ثبت خودکار تغییرات تنش و کرنش بوجود آمده در طول بارگذاری و باربرداری در نمونه را دارا است.



شکل ۴-۹: نمای کلی از دستگاه بارگذاری آزمایش.



#### ۴-۴- تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها

جهت تعیین ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌های یاد شده از جمله چگالی و تخلخل، تعداد حدود ۱۰ قطعه از هر یک از سنگ‌ها که وزنی نزدیک به ۵۰ تا ۱۰۰ گرم دارند، تهیه شد. این قطعات را درون یک ظرف که حاوی آب است قرار داده و به مدت حدود یک هفته درون آن گذاشته شدند. سپس، پس از اینکه قطعه‌ها از ظرفی که این قطعات درون آن قرار داده شده در آورده شد، بلافاصله درون ظرف شیشه‌ای دیگری که آن هم حاوی آب است قرار داده شد سپس وزن آنها در حالت‌های شناور در آب، اشباع و خشک اندازه‌گیری شدند. بعد از آن، طبق رابطه‌های ۴-۱ و ۴-۲ به ترتیب تخلخل و چگالی خشک هر یک از قطعات سنگ‌ها بدست آمده و در نهایت با محاسبه میانگین آنها تخلخل و چگالی خشک هر نوع سنگ بدست آمد که نتایج آن در جدول ۴-۲ آورده شده است.

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{M_{Sat} - M_s}{M_{Sat} - M_{Sub}} \quad (۱-۴)$$

$$\rho_s = \frac{M_s}{V} = \frac{M_s}{M_{Sat} - M_{Sub}} \quad (۲-۴)$$

که در این رابطه‌ها  $n$  تخلخل،  $V_v$  حجم خلل و فرج،  $V$  حجم کل،  $M_{Sat}$  وزن اشباع،  $M_s$  وزن قطعه در حالت خشک،  $M_{Sub}$  وزن قطعه در حالت غوطه‌ور در آب (بر حسب گرم) و  $\rho_s$  چگالی خشک (بر حسب گرم بر سانتی‌متر مربع) است.

جدول ۴-۲: ویژگی فیزیکی سنگ‌ها

زئولیت	گرانیت	نوع سنگ
		ویژگی‌های سنگ
۲,۳	۲,۷۵	چگالی ( $\text{gr/cm}^3$ )
۲,۵۵	۲,۵۹	تخلخل (%)

پس از انجام آزمایش تراکم تک محوره و برزیلی بر روی نمونه‌های فوق و داده‌های بدست آمده توسط مقادیر تنش که در سیستم ثبت و ذخیره شده‌اند، مقدار نهایی تراکم تک محوره و مقاومت نهایی برزیلی محاسبه شد که در جدول ۴-۳ مقادیر آن مشاهده می‌شود.

جدول ۳-۰: مقاومت نهایی بدست آمده برای هر یک از نمونه‌های مورد آزمایش.

زئولیت	گرانیت	نمونه سنگ
۵۴	۵۴	قطر (mm)
۷۲	۷۰	مقاومت نهایی تراکم تک محوره (MPa)
۱۵	۱۴	مقاومت نهایی برزیلی (MPa)

#### ۴-۵- دستگاه ثبت امواج آوایی (انتشار آوایی)

دستگاهی که برای انجام آزمون انتشار آوایی مورد استفاده قرار گرفته است، سیستم انتشار آوایی AMSY-6 است که ساخت شرکت Vallen System GmbH از کشور آلمان دارای محدوده‌ی فرکانس رزونانس ۱۵۰ کیلو هرتز می‌باشد. این دستگاه عمدتاً جهت اندازه‌گیری و آنالیزهای انتشار آوایی که بیشتر از حد آستانه است، استفاده می‌شود. مقدار حد آستانه بسته به محل آزمایش و مقدار

صدای محیط فرق می‌کند و برای هر آزمایش در ابتدا این مقدار تنظیم (حذف نویز) می‌شود، به علاوه این سیستم قابلیت نمایش هم زمان نمودارهای انتشار آوایی را بر روی کامپیوتر دارا است. با دریافت سیگنال‌های صوتی این دستگاه، آن‌ها را به یک سری معادلات موج تبدیل نموده و بر اساس این معادلات پارامترهای هر موج شامل زمان شروع موج، مدت زمان موج، بیشترین دامنه موج، انرژی و شمارش را تعیین می‌کند. سیستم AMSY-6 پنجمین نسل از دستگاه‌های اندازه‌گیری دیجیتال انتشار آوایی شرکت Vallen از سال ۱۹۸۵ تاکنون است. سیستم AMSY-6 چند کانال دارد که به طور موازی با هم کار می‌کنند هر کانال به طور مجزا کلیه فرآیندهای دریافت موج، تقویت موج و پردازش را انجام می‌دهد. به ازای هر کانال یک سنسور، پیش تقویت کننده و کابل انتقال داده وجود دارد. وظیفه سنسور دریافت سیگنال و تبدیل آن به سیگنال‌های الکتریکی است، که سپس توسط پیش تقویت کننده، تقویت اولیه شده و با استفاده از کابل ارتباطی به دستگاه منتقل می‌شود. در دستگاه این سیگنال‌ها به داده‌های دیجیتال تبدیل می‌شوند. اجزای اصلی سیستم انتشار آوایی

AMSY-6 در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است



شکل ۴-۱۰: اجزای اصلی سیستم انتشار آوایی AMSY-6

#### ۴-۵-۱- تحلیل داده ها

پس از برداشت داده‌های آوایی در حین بار گذاری نمونه‌ها، تحلیل‌های مختلفی برای بررسی روند شروع و توسعه آسیب در نمونه‌ها را می‌توان انجام داد. این تحلیل‌ها در ادامه این فصل برای بررسی آسیب ذکر خواهد شد و نتایج آن در فصل آتی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

#### ۴-۵-۲- رفتار نگاری انتشار آوایی

قبل از انجام آزمایش به مدت ۳۰ دقیقه دستگاه انتشار آوایی در محیط آزمایشگاه روشن شده تا نویزهای محیط دریافت شود. لذا با توجه به محیط آزمایشگاه حد آستانه ۴۲ هرتز تعیین گردید. برای برداشت داده‌های آوایی و بررسی آسیب و شکست نمونه استفاده از یک سنسور آوایی کافی است، اما برای افزایش دقت داده‌ها از دو سنسور آوایی بصورت همزمان برای برداشت رخداد های آوایی استفاده شد. سنسورهای آوایی در وسط و دو طرف نمونه جانمایی شدند. جدول ۴-۴ برنامه آزمایشات و بارگذاری آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۴ برنامه آزمایشات و بارگذاری آن ها

مدت زمان پیش بارگذاری (Min)	تعداد چرخه بارگذاری	بارگذاری (MPa)	پیش بارگذاری (MPa)	فرآیند آزمایش	نوع آزمایش همراه با انتشار آوایی	نمونه آزمایش	سطح بارگذاری	نوع سنگ
				شکست کامل	UCS	ZU	1	زئولیت
				شکست کامل	UCS	ZUT <sub>1</sub>	2	زئولیت
۱۵	۱	۳۰	۱۵	مرحله اول انتشار آوایی	UCS	ZUT <sub>2</sub>	3	زئولیت
۱۵	۲	۳۰	۱۵	مرحله دوم انتشار آوایی	UCS	ZUT <sub>3</sub>	4	زئولیت
۱۵	۱	۴۸	۳۰	مرحله سوم انتشار آوایی	UCS	ZUT <sub>4</sub>	5	زئولیت
۱۵	۲	۴۸	۳۰		UCS	ZUT <sub>5</sub>	6	زئولیت
۱۵	۳	۴۸	۳۰		UCS	ZUT <sub>6</sub>	7	زئولیت
				شکست کامل	برزیلی	ZBT	1	زئولیت
				مرحله اول انتشار آوایی	برزیلی	ZBT <sub>1</sub>	2	زئولیت
				مرحله دوم انتشار آوایی	برزیلی	ZBT <sub>2</sub>	3	زئولیت
				مرحله سوم انتشار آوایی	برزیلی	ZBT <sub>3</sub>	4	زئولیت
۱۵	۱	۴,۵	۳		برزیلی	ZBT <sub>4</sub>	5	زئولیت
۱۵	۲	۴,۵	۳		برزیلی	ZBT <sub>5</sub>	6	زئولیت
				شکست کامل	UCS	GU	1	گرانیت
				شکست کامل	UCS	GUT <sub>1</sub>	2	گرانیت
۱۵	۱	۳۸	۲۰	مرحله اول انتشار آوایی	UCS	GUT <sub>2</sub>	3	گرانیت
۱۵	۲	۳۸	۲۰	مرحله دوم انتشار آوایی	UCS	GUT <sub>3</sub>	4	گرانیت
				مرحله سوم انتشار آوایی	UCS	GUT <sub>4</sub>	5	گرانیت
۱۵	۱	۷۰	۴۵		UCS	GUT <sub>5</sub>	6	گرانیت
۱۵	۲	۷۰	۴۵		UCS	GUT <sub>6</sub>	7	گرانیت

				شکست کامل	برزیلی	GB	1	گرانیت
				شکست کامل	برزیلی	GBT <sub>1</sub>	2	گرانیت
				مرحله اول انتشار آوایی	برزیلی	GBT <sub>2</sub>	3	گرانیت
				مرحله دوم انتشار آوایی	برزیلی	GBT <sub>3</sub>	4	گرانیت
				مرحله سوم انتشار آوایی	برزیلی	GBT <sub>4</sub>	5	گرانیت
۱۵	۱	۴,۵	۳		برزیلی	GBT <sub>5</sub>	6	گرانیت
۱۵	۲	۴,۵	۳		برزیلی	GBT <sub>6</sub>	7	گرانیت

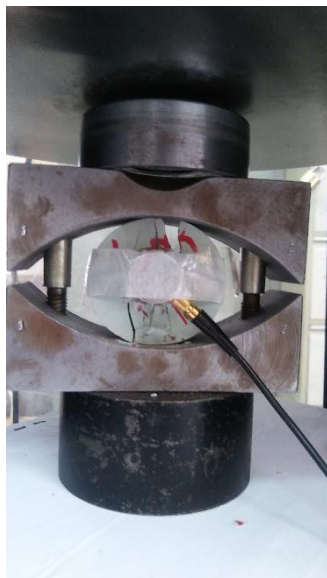
#### ۴-۵-۳- تحلیل پارامتری انتشار آوایی

در بررسی های انتشار آوایی روش های مختلفی برای تحلیل شکست و آسیب وجود دارد. یکی از این روش ها که کاربرد فراوانی در مطالعات و تحقیقات دارد تحلیل تغییرات پارامترهای انتشار آوایی همزمان با روند شکست می باشد. از این تحلیل برای بررسی ارتباط پارامترهای انتشار آوایی با پارامترهای مختلف مکانیک شکست مصالح می توان استفاده کرد. پارامترهای مختلف داده های انتشار آوایی را در این روش تحلیلی می توان مورد بررسی قرار داد.

از پارامتری مانند شمارش به دلیل آن که تعداد رخدادهای آوایی و ایجاد ریز ترک ها را نشان می دهد می توان برای بررسی میزان سطح آسیب در مراحل مختلف بارگذاری ها استفاده کرد و همچنین با پارامتری مانند انرژی همزمان با روند شکست در مراحل مختلف بارگذاری نیز می توان به خوبی به خصوصیات مقاومتی و شکست مواد پی برد. از طریق پارامترهای مدت زمان دوام و زمان خیزمی توان روند ترکیب ریز ترک ها یا به عبارت دیگر تشکیل ترک های بزرگ را بررسی کرد. همچنین می توان حالت های غالب در شکست مصالح مختلف را با این دو پارامتر و تغییرات آن ها تجزیه و تحلیل کرد. بر اساس آزمایشات انجام گرفته بر روی نمونه های استوانه ای آزمایش مقاومت تک محوره و نمونه های دیسکی برزیلی از دو نوع سنگ مختلف گرانیت و زئولیت در حالت های مختلف ( شکست کامل

نمونه پیش بارگذاری بارگذاری و باربرداری) داده های مختلف انتشار آوایی استخراج گردید و این داده ها بر اساس زمان انجام آزمایش ترسیم گردیدند. در کنار این نمودارها نمودار تغییرات بار اعمالی بر حسب زمان نیز از داده های بدست آمده از دستگاه بارگذاری استخراج شده و ترسیم گردیده است، تا بتوان بر اساس تغییرات بار و داده های مختلف انتشار آوایی بر حسب زمان تحلیل هایی را در مورد سیر شکست سنگ از طریق مطالعه ارتباط پارامترهای انتشار آوایی با سیر شکست سنگ در نمونه های تحت فشار و تحت کشش انجام داد.

برای بررسی ارتباط پارامترهای آوایی با آسیب و گسیختگی سنگ دونوع سنگ مختلف (گرانیت و زئولیت) تحت آزمایش های مقاومت فشاری و مقاومت کششی قرار گرفتند و در هر یک از آزمایشات اعمال بار به نمونه به چندین صورت متفاوت شامل: بارگذاری کامل تا شکست کامل نمونه، پیش بارگذاری به مدت ۱۵ دقیقه و بار برداری و بارگذاری مجدد انجام شد و برای رسیدن به یک نتیجه خوب و مطمئن نتایج با هم مقایسه شد. شکل های ۱۴-۱۱ نمونه های آزمایش را نشان می دهد.



شکل ۴-۱۱: نمونه دیسکی آزمایش سنگ زئولیت



شکل ۴-۱۲: نمونه استوانه‌ای آزمایش سنگ زئولیت



شکل ۴-۱۳: نمونه استوانه‌ای آزمایش سنگ گرانیت





شکل ۴-۱۴: نمونه دیسکی آزمایش سنگ گرانیت

#### ۴-۶- آزمایش های تک محوره فشاری همراه با انتشار آوایی (سنگ زئولیت)

در این بخش دو نوع آزمایش فشاری تک محوره انجام شده است. در آزمایشات اولیه نمونه تا شکست کامل بارگذاری شده است و همزمان داده های انتشار آوایی نیز روی نمونه دریافت و ثبت شده اند. نوع دیگر آزمایشات به گونه ای بود که ابتدا نمونه به مدت ۱۵ دقیقه تحت پیش بار گذاری قرار گرفت و بعد از ۱۵ دقیقه باربرداری صورت گرفت و بار اعمالی به صفر رسید و سپس بارگذاری مجدد روی نمونه صورت گرفت و همزمان داده های آوایی نیز ثبت شدند. در برخی آزمایش ها هم پیش بار گذاری دو مرتبه انجام شده است.

#### ۴-۶-۱- آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره تا شکست کامل نمونه

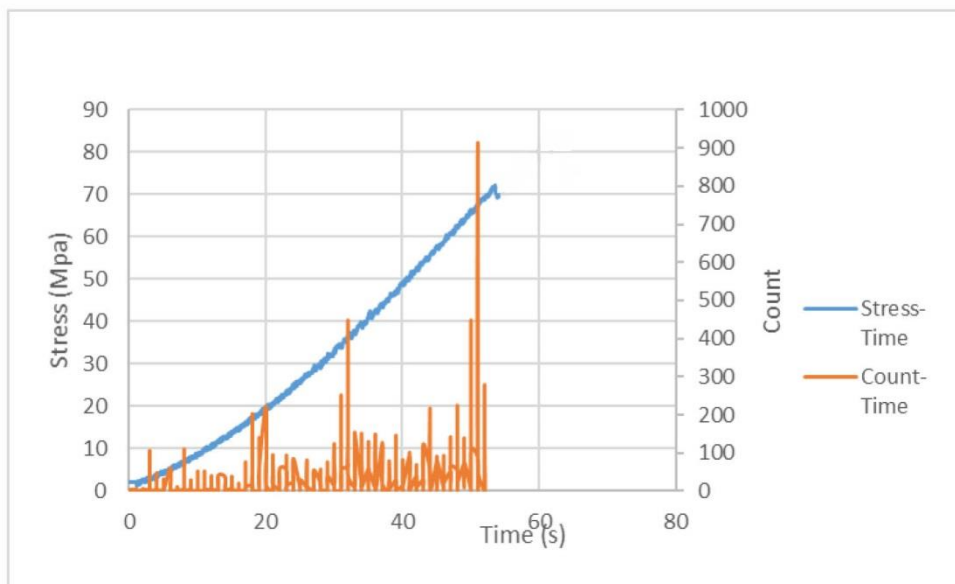
نمونه سنگ زئولیت ( $ZUT_1$ ) تحت آزمایش فشاری تک محوره همراه با انتشار آوایی قرار داده شده است. در این آزمایش نمونه تا جایی بارگذاری شد، که شکست کامل در آن اتفاق بیفتد پس از انجام آزمایش داده های آوایی و داده های بارگذاری برداشت شد، و سپس نمودارهای تغییرات پارامترهای آوایی - زمان و نمودار تنش - زمان با هم در یک نمودار سه محوره که محورهای قائم آن تنش و پارامترهای آوایی و محور افقی آن زمان است رسم گردید. نمودارهای تجمعی تغییرات پارامترهای

آوایی نیز مشابه آن چه ذکر شد با نمودار تنش\_ زمان در یک نمودار سه محوره رسم شد، تا نتایج بهتر مورد بررسی قرار گیرد.

با قراردادن نمودارهای داده های آوایی با نمودار تنش در یک نمودار می توان ارتباط پارامترهای آوایی را با آسیب و گسیختگی سنگ مورد بررسی قرار داد.

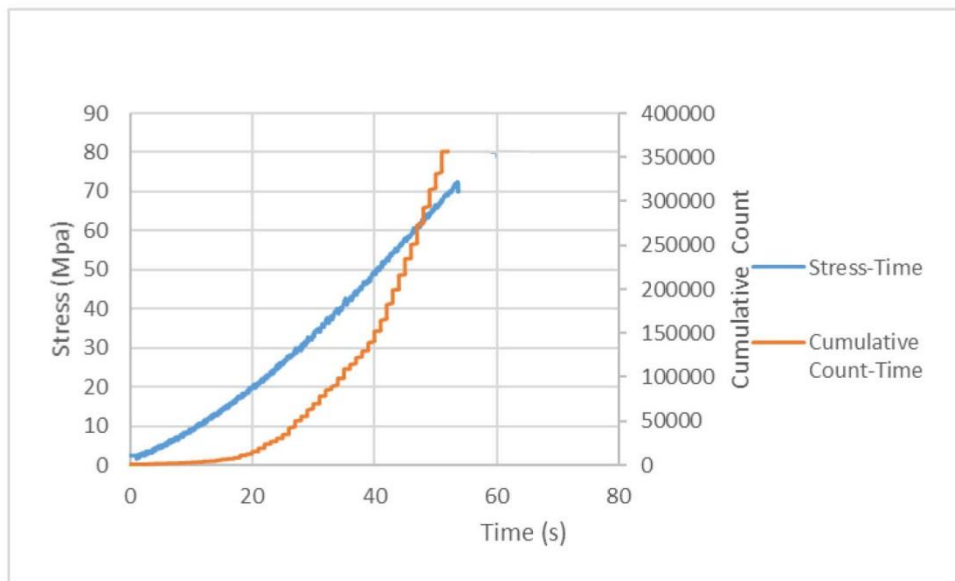
#### ۴-۶-۱-۱- ارتباط پارامتر شمارش با آسیب و گسیختگی سنگ

به طور کلی پارامتر شمارش با ایجاد ریزترک ها و رخدادهای آوایی مرتبط است. شکل ۴-۱۵ نمودار تغییرات شمارش را در برابر نمودار تنش بر حسب زمان نشان می دهد. همانطور که در شکل مشاهده می شود، فعالیت انتشار آوایی در مراحل اولیه بارگذاری (مراحل بسته شدن ترک و الاستیک خطی) ضعیف بوده و مقدار شمارش کم است در حالی که مشاهده می شود که در ۴۰ - ۳۰ درصد از مقاومت نهایی زئولیت مقدار شمارش در حال افزایش می باشد، این افزایش مقدار شمارش به علت شروع و ایجاد ریزترک (مرحله شروع ریزترک) می باشد و سپس این افزایش مقدار شمارش، ثابت شده که علت آن رشد ریزترک های ایجاد شده است که این مرحله را رشد پایدار ترک می نامند. در ۸۰ - ۷۰ درصد از مقاومت نهایی زئولیت مقدار پارامتر شمارش سیر صعودی دارد و افزایش قابل توجهی در آن دیده می شود در این مرحله ریزترک ها به هم می پیوندند و ماکروترک را تشکیل می دهند. در واقع این افزایش قابل توجه در مقدار شمارش به دلیل رخدادهایی می باشد، که از ترکیب ریزترک ها و ایجاد ترک های بزرگتر و توسعه ناحیه شکست تولید شده اند که این مرحله آسیب سنگ می باشد. همانطور که مشاهده می شود این روند صعودی تا لحظه ی شکست ادامه می یابد. در لحظه ی شکست تعداد شمارش های بالایی تشکیل می شود که ناشی از همان رخداد بزرگ شکست نمونه از ترک است که بعد از این لحظه تا گسیختگی کامل نمونه که رخدادهای مربوط به توسعه ناحیه شکست است، مقدار پارامتر شمارش کاهش می یابد.



شکل ۴-۱۵: نمودار تنش و شمارش بر حسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ زئولیت

شکل ۴-۱۶: نمودار تجمعی تغییرات شمارش - زمان را با نمودار تنش - زمان را در همان آزمایش نشان می دهد. در این نمودار نیز به خوبی مشاهده می شود که تا یک حد مشخصی از بارگذاری ( مراحل اولیه بار گذاری ) فعالیت انتشار آوایی ضعیف می باشد و مقدار شمارش کم است. همچنین نشان می دهد که در ۴۰ - ۳۰ درصد مقاومت زئولیت مقدار شمارش سیر صعودی می گیرد و در ۸۰ - ۷۰ درصد مقاومت نهایی زئولیت این سیر صعودی به صورت چشمگیری ادامه می یابد و شیب نمودار تند شده که دلالت بر مرحله ی آسیب سنگ دارد.



شکل ۴-۱۶: نمودار تنش و تجمعی شمارش برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ زئولیت به منظور بررسی دقیق و مطمئن و مقایسه نتایج حاصل از آزمون های مختلف، نمودار تنش و شمارش برحسب زمان و نمودار تنش و تجمعی شمارش برحسب زمان برای نمونه های  $GUT_1$  و  $GBT_1$  در پیوست آورده شده است، که نتایج حاصل از شکل های ۴-۱۵ و ۴-۱۶ را تایید می کند.

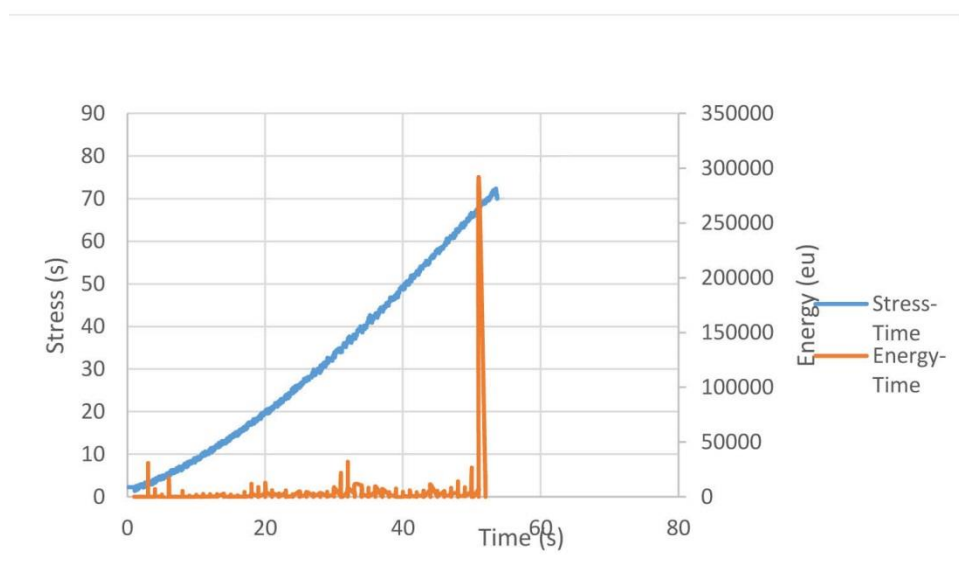
#### ۴-۶-۱-۲- ارتباط پارمتر انرژی با آسیب و گسیختگی سنگ

یکی دیگر از پارامترهای انتشار آوایی، انرژی است که تغییرات آن را در روند شکست ماده می توان بررسی کرد. پارامتر انرژی ناشی از رخدادهای آوایی می باشد.

شکل ۴-۱۷، نمودار تغییرات انرژی - زمان حاصل از داده های بدست آمده از آزمایش فشاری تک محوره تا لحظه شکست زئولیت را در برابر نمودار تنش - زمان نشان می دهد. با استفاده از این نمودار روند ترکیب ریز ترک ها و توسعه زون شکست و رشد ترک اصلی به خوبی قابل بررسی می باشد.

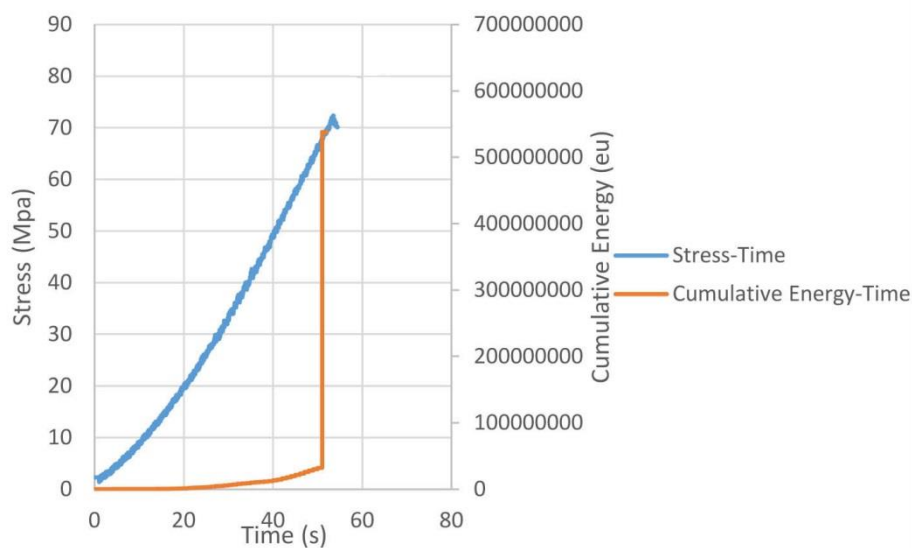
همانطور که در شکل ۴-۱۷ مشاهده می شود تا قبل از شکستن سنگ فعالیت انتشار آوایی ضعیف می باشد و بیشترین مقدار انرژی مربوط به زمانی است که سنگ گسیخته می شود. ماکزیمم مقدار

انرژی با آغاز شکست ایجاد شده از نوک ترک اولیه مرتبط بوده و کاملاً با توسعه زون شکست و ترکیب ریز ترک ها در ارتباط است که این مرحله آسیب ترک نام دارد و بعد از لحظه شکست تا زمانی که سنگ کاملاً گسیخته شود انرژی بتدریج بسیار کم می شود و روند نزولی پیدا می کند. دلیل این کمتر شدن قابل توجه انرژی آن است که در مسیر ترک هیچ مانعی وجود ندارد که از رشد پایدار آن جلوگیری کند و چون در مسیر گسترش ترک از قبل ریزترک هایی وجود داشته است، انرژی کمتری برای رشد پایدار ترک و توسعه ناحیه شکست در حین روند شکست الزامی است.



شکل ۴-۱۷: نمودار تنش و انرژی بر حسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ زئولیت

شکل ۴-۱۸ نمودار تغییرات تجمعی انرژی - زمان را با نمودار تنش - زمان نشان می دهد. در این نمودار نیز به خوبی مشخص است که فعالیت انتشار آوایی تا قبل از رسیدن به مرحله آسیب ضعیف بوده و انرژی ماکزیمم مقدار تجمعی خود را در مرحله ی آسیب دارد که علت آن به هم پیوستن ریزترک ها و ایجاد ترک های بزرگ می باشد.



شکل ۴-۱۸: نمودار تنش و تجمعی انرژی بر حسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ زئولیت

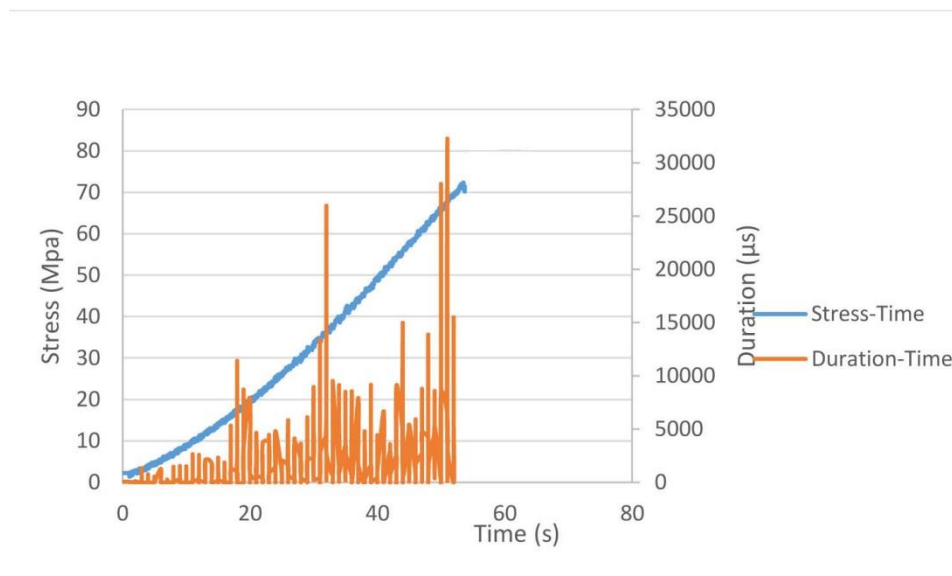
به منظور بررسی دقیق و مطمئن و مقایسه نتایج حاصل از آزمون های مختلف، نمودار تنش و انرژی بر حسب زمان و نمودار تنش و تجمعی انرژی بر حسب زمان برای نمونه های  $GUT_1$  و  $GBT_1$  در پیوست آورده شده است، که نتایج حاصل از شکل های ۴-۱۷ و ۴-۱۸ را تایید می کند.

#### ۴-۶-۱-۳- ارتباط پارامتر مدت زمان دوام با آسیب و گسیختگی سنگ

این پارامتر نشان دهنده ی رخداد های با تداوم زمانی بالاتر می باشد در واقع نشان دهنده ی رخداد های بزرگتر از لحاظ انرژی آزاد شده و ناشی از بزرگ بودن ریز ترک می باشد. شکل ۴-۱۹ نمودار تغییرات مدت زمان دوام - زمان را در برابر نمودار تنش - زمان را برای آزمایش بارگذاری فشاری نشان می دهد. همانطور که در شکل ۴-۱۹ مشاهده می شود از ۸۰ - ۷۰ درصد مقاومت نهایی مقدار مدت زمان دوام سیر صعودی پیدا می کند در واقع این افزایش در مدت زمان دوام نشان دهنده ی این است که رخداد های بزرگتری در حال ایجاد شدن هستند که با رشد ریز ترک ها و توسعه ناحیه ی شکست مقابل ترک اولیه مرتبط هستند. بیشترین مقدار مدت زمان دوام مربوط به رخدادی است که در آن مجموعه ای از ریز ترک ها با بهم پیوستن سبب رشد زون شکست و در نتیجه آغاز شکست نمونه می گردند بنابراین بیشترین مقدار مدت زمان دوام در لحظه ی شکست

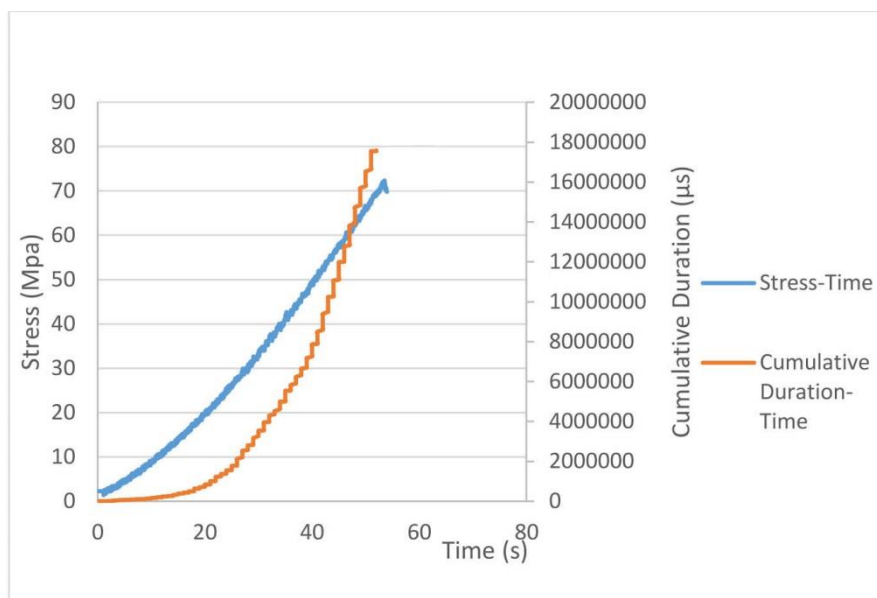
حاصل می شود. بعد از لحظه ی شکست مدت زمان دوام همچنان مقدار بالایی دارد که دلیل آن رشد ترک اصلی و توسعه زون شکست تا گسیختگی کامل نمونه می باشد.

همانطور که مشاهده شد دو پارامتر انرژی و مدت زمان دوام موج تقریبا مشابه به هم می باشند علت این تشابه این است که هر دو پارامتر با روند ترکیب ریزترک ها و توسعه زون شکست و رشد ترک اصلی مرتبط هستند.



شکل ۴-۱۹: نمودار تنش و مدت زمان دوام بر حسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ ژئولیت

شکل ۴-۲۰: نمودار تغییرات تجمعی مدت زمان دوام - زمان را با نمودار تنش - زمان نشان می دهد. در این نمودار نیز به خوبی مشخص است که بیشترین مقدار مدت زمان دوام مربوط به لحظه ی شکست می باشد و بعد از شکست نیز پارامتر مدت زمان دوام همچنان مقدار بالایی دارد زیرا ترک اصلی در حال رشد می باشد که این خود سبب توسعه زون شکست تا گسیختگی کامل نمونه می شود.



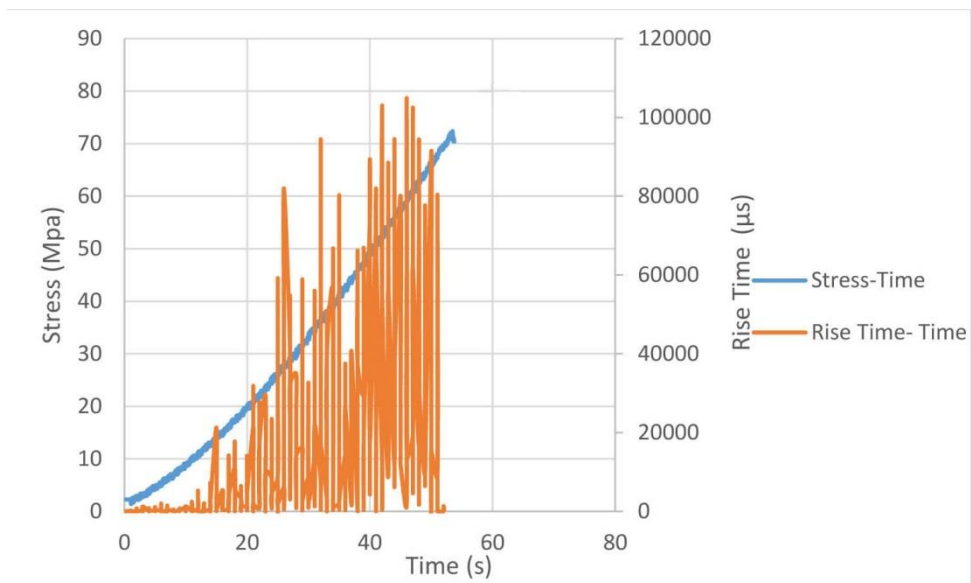
شکل ۴-۲۰: نمودار تنش و تجمعی مدت زمان دوام بر حسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ زئولیت

به منظور بررسی دقیق و مطمئن و مقایسه نتایج حاصل از آزمون های مختلف، نمودار تنش و مدت زمان دوام برحسب زمان و نمودار تنش و تجمعی انرژی برحسب زمان برای نمونه های  $GUT_1$  و  $GBT_1$  در پیوست آورده شده است، که نتایج حاصل از شکل های ۴-۱۹ و ۴-۲۰ را تایید می کند.

#### ۴-۱-۶-۴ ارتباط پارامتر زمان خیز با آسیب و گسیختگی سنگ

به منظور بررسی ارتباط پارامتر زمان خیز با آسیب و گسیختگی سنگ دو نمودار زمان خیز-زمان و تنش-زمان کنار هم قرار گرفته اند، همانطور که در شکل ۴-۲۱ مشاهده می شود ارتباط بین زمان خیز با آسیب و گسیختگی سنگ مشهود نیست و بهتر است از این پارامتر برای آنالیز آسیب و گسیختگی سنگ استفاده نشود و می توان از این پارامتر برای آنالیز خصوصیات منبع انتشار آوایی استفاده کرد.

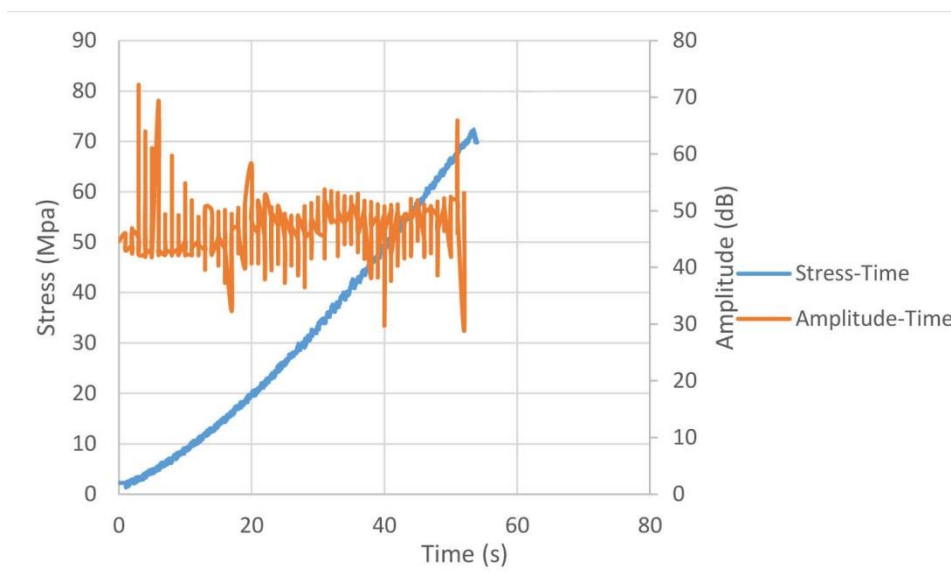




شکل ۴-۲۱: نمودار تنش و زمان خیز بر حسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ زئولیت

#### ۴-۶-۱-۵ ارتباط پارامتر حداکثر دامنه با آسیب و گسیختگی سنگ

به منظور بررسی ارتباط پارامتر حداکثر دامنه با آسیب و گسیختگی سنگ، دو نمودار حداکثر دامنه - زمان و تنش - زمان در کنار هم قرار گرفته اند. همانطور که در شکل ۴-۲۲ مشاهده می شود تا قبل از مقاومت ۳۵ مگاپاسکال مقدار حداکثر دامنه زیر ۳۰ dB می باشد و پس از مقاومت ۳۵ مگاپاسکال مقدار آن تا ۷۰dB می رود. ارتباط بین پارامتر حداکثر دامنه با آسیب و گسیختگی سنگ مشهود نیست و بهتر است از این پارامتر برای آنالیز آسیب و گسیختگی استفاده نشود. می توان از این پارامتر برای آنالیز خصوصیات منبع انتشار آوایی استفاده کرد.



شکل ۴-۲۲: نمودار تنش و حداکثر دامنه بر حسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره

#### ۴-۶-۲- آزمایش تک محوره زئولیت با دوسیکل بارگذاری همراه با انتشار آوایی

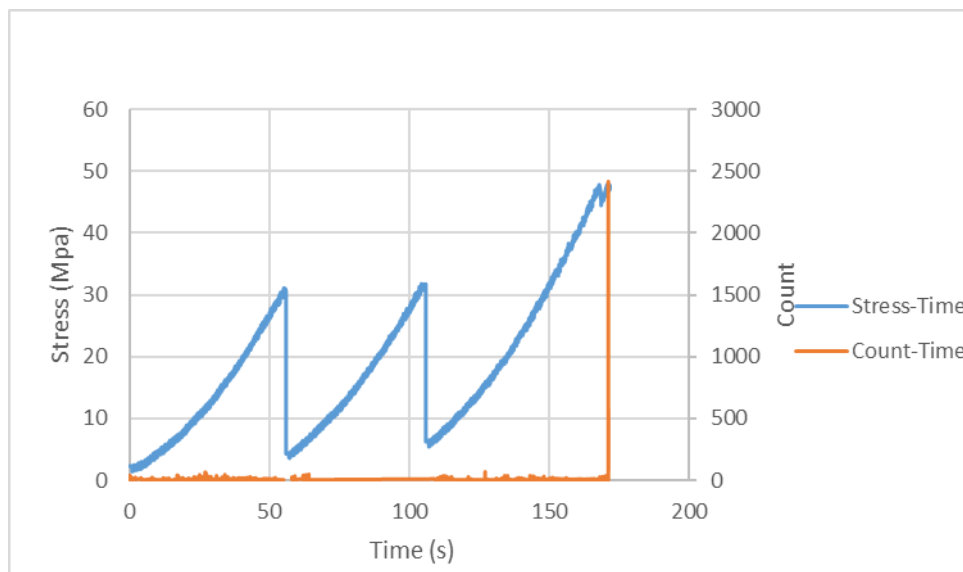
در این آزمایش ابتدا نمونه استوانه ای زئولیت ( $ZUT_5$ ) تا ۳۰ مگا پاسگال به مدت ۱۵ دقیقه پیش بارگذاری شد و پس از ۱۵ دقیقه باربرداری انجام شد و بار اعمالی از روی نمونه برداشته شد. این کار یک بار دیگر تکرار شد، تا آسیب و ترک خوردگی در نمونه ایجاد شود. و وقتی بار اعمالی به نمونه به صفر رسید، در بارگذاری مجدد تا ۴۸ مگاپاسگال به آن نیرو اعمال شد و سپس داده های آوایی و داده های بارگذاری برداشت شد. برای تحلیل نمودارهای تغییرات پارامترهای آوایی - زمان و نمودار تنش - زمان با هم در یک نمودار سه محوره رسم شدند تا ارتباط پارامترهای آوایی با آسیب و گسیختگی سنگ تحت این شرایط بارگذاری مورد بررسی قرار گیرد.

#### ۴-۶-۲-۱- ارتباط پارامتر شمارش با آسیب و گسیختگی سنگ

نمودارهای شمارش و تجمعی شمارش با نمودار تنش - زمان در یک نمودار کنار هم رسم شدند همانطور که در شکل ۴-۲۳ مشاهده می شود، بیشترین مقدار شمارش در مرحله آسیب سنگ رخ می دهد، علت آن این است که در این مرحله ریز ترک ها به هم می پیوندند و ترک های بزرگ را ایجاد می کنند. تا لحظه شکست به علت ایجاد رخداد های بزرگ شمارش روند صعودی دارد بعد از

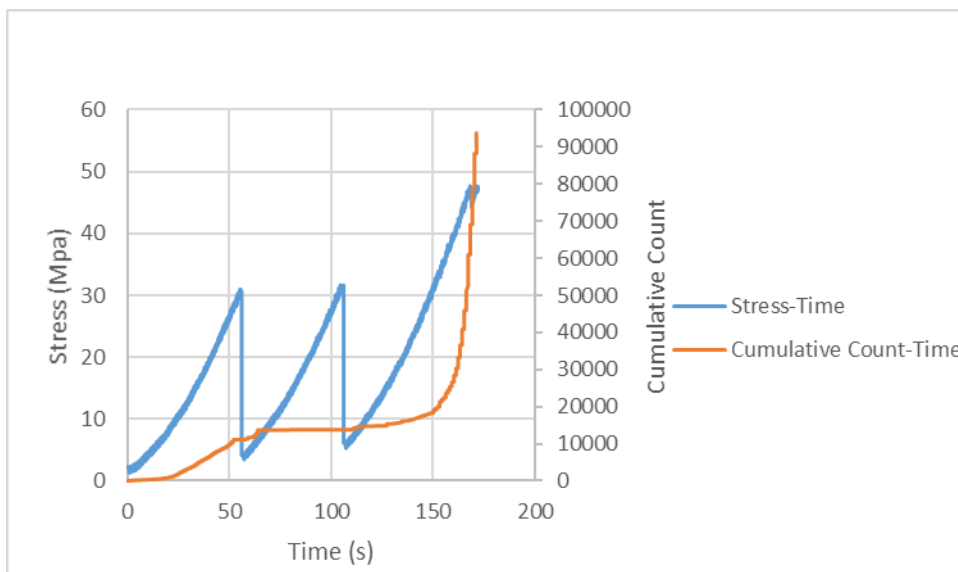
لحظه شکست چون رخداد های ناشی از ترکیب ریز ترک ها می باشد مقدار شمارش تقریباً ثابت می شود.

چنانچه در شکل ۴-۲۳ مشاهده می شود هنگامی که بار وارد بر نمونه افزایش می یابد، سیگنال های انتشار آوایی شروع به فعالیت می کنند، به محض این که بار اعمال شده کاهش می یابد یا برداشته می شود و تا زمانی که سطح بارگذاری جدید از میزان پیش بارگذاری آن تجاوز نکند، سیگنالی مشاهده نمی شود که این حالت را اثر کایزر می نامند. در واقع اثر کایزر پدیده ای را توصیف می کند که سنگی که تحت بار می باشد فقط زمانی که سطح بار از حداکثر مقدار قبلی آن بیشتر شود امواج آوایی منتشر می کند. در طول بارگذاری مجدد و قبل از رسیدن به حداکثر بار قبلی، سنگ ها به صورت الاستیک رفتار می کنند. اگر اثر کایزر برای سنگ ثابت باشد، قبل از رسیدن سطح تنش به میزان حداکثر قبلی هیچ سیگنالی ثبت نخواهد شد و یا مقدار اندکی ثبت می شود. در تمامی بارگذاری های مجدد نیز تنها زمانی که سطح نیرو از حداکثر میزان قبلی آن تجاوز کند سیگنال های انتشار آوایی منتشر می شوند. چنان چه انتشار آوایی قابل توجهی در سطح بار پایین تری از حداکثر بار اعمال شده قبلی ظاهر شود، می تواند بیانگر وجود عیب یا ترک در سنگ باشد این حالت نسبت متناسب نام دارد که عبارت از نسبت بین بار اعمال شده بعدی که به واسطه آن انتشار آوایی ظاهر شده است و حداکثر بار اعمال شده قبلی می باشد.



شکل ۴-۲۳: نمودار تنش و شمارش بر حسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ زئولیت

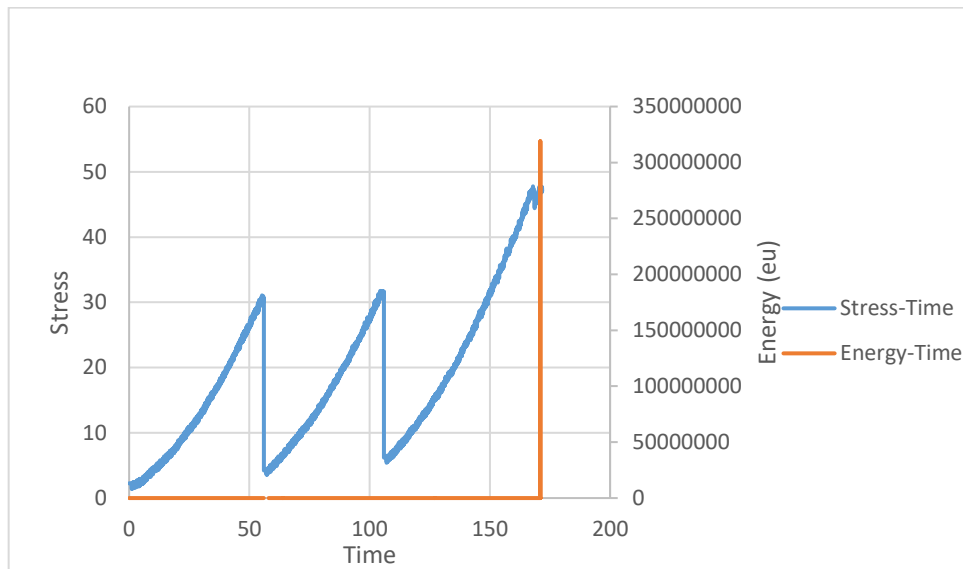
شکل ۴-۲۴ نمودار تجمعی شمارش - زمان را در کنار نمودار تنش - زمان نشان می دهد. در نمودار تجمعی شمارش نیز مشاهده می شود که با افزایش بار مقدار شمارش افزایش می یابد و وقتی که بار اعمالی برداشته می شود یا کاهش می یابد شمارشی دریافت نمی شود و وقتی که بار اعمالی جدید از حداکثر بار اعمالی قبلی تجاوز کرد، شمارش دریافت می شود و سیر صعودی پیدا می کند. همچنین مشاهده می شود که بیشترین مقدار شمارش در آسیب سنگ رخ می دهد و تا لحظه شکست مقدار شمارش بالا می باشد و پس از شکست تا گسیختگی کامل نمونه به علت تولید رخدادهای ناشی از ترکیب ریز ترک ها شمارش مقدار ثابتی دارد.



شکل ۴-۲۴: نمودار تنش و تجمعی شمارش بر حسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ زئولیت به منظور بررسی دقیق و مطمئن و مقایسه نتایج حاصل از آزمون های مختلف، نمودار تنش و شمارش بر حسب زمان و نمودار تنش و تجمعی شمارش بر حسب زمان برای نمونه GUT در پیوست آورده شده است، که نتایج حاصل از شکل های ۴-۲۳ و ۴-۲۴ را تایید می کند.

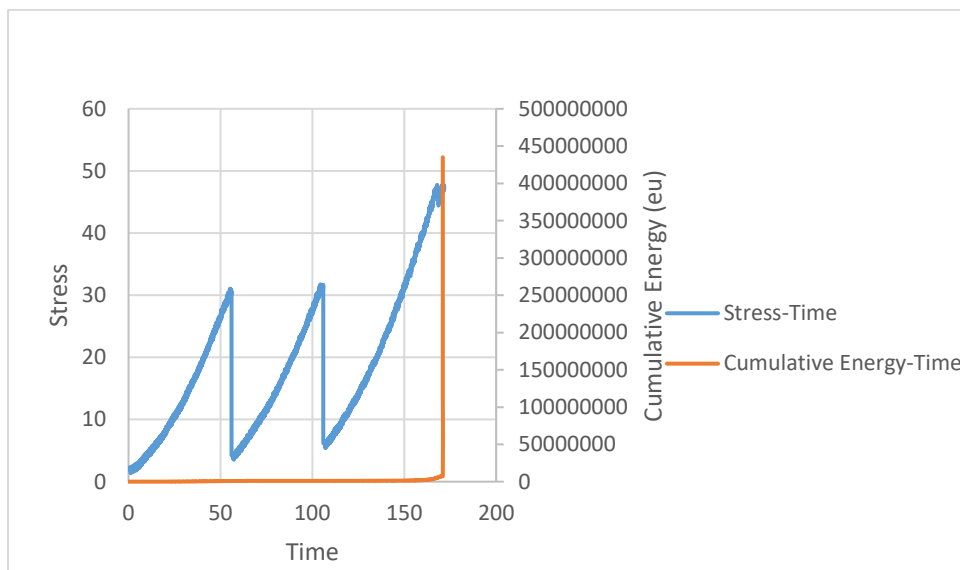
#### ۴-۶-۲-۲- ارتباط پارامتر انرژی با آسیب و گسیختگی سنگ

شکل ۴-۲۵ نمودار تغییرات انرژی - زمان را در کنار نمودار تنش - زمان در یک نمودار نشان می دهد. همانطور که در شکل مشاهده می شود، بیشترین مقدار انرژی مربوط به زمان آسیب سنگ می باشد، یعنی زمانی که ریزترک ها با هم ترکیب می شوند و سبب ایجاد ترک های بزرگ می شوند همانطور که در شکل ۴-۲۵ مشخص است پس از لحظه شکست تا گسیختگی کامل سنگ انرژی افت می کند، دلیل این افت انرژی را می توان این گونه بیان کرد که از لحظه شکست به بعد دیگر ترک برای رشد و توسعه زون شکست در مسیر خود مانعی ندارد و در مسیر ترک ریز ترک هایی از قبل وجود دارد. بنابراین انرژی زیادی برای رشد ترک و توسعه زون شکست لازم نیست.



شکل ۴-۲۵: نمودار تنش و انرژی بر حسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ زئولیت

شکل ۴-۲۶ نمودار تجمعی انرژی - زمان را در کنار نمودار تنش - زمان در یک نمودار نشان می دهد. در نمودار تجمعی انرژی نیز می توان به خوبی دید که ماکزیمم مقدار انرژی در مرحله آسیب رخ می دهد. جایی که ریزترک ها با هم ترکیب شده و ترک های بزرگ را ایجاد می کنند و در نمودار تجمعی کاملاً مشخص است که پس از لحظه شکست سنگ تا گسیختگی کامل آن، انرژی کاهش می یابد.

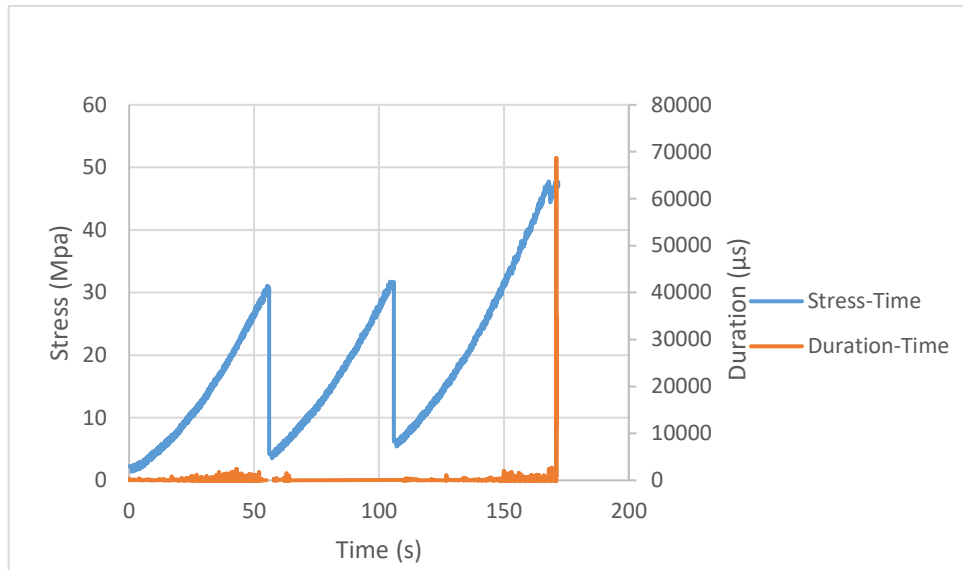


شکل ۴-۲۶: نمودار تنش و تجمعی انرژی بر حسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ زئولیت

به منظور بررسی دقیق و مطمئن و مقایسه نتایج حاصل از آزمون های مختلف، نمودار تنش و انرژی بر حسب زمان و نمودار تنش و تجمعی انرژی بر حسب زمان برای نمونه GUT<sub>6</sub> در پیوست آورده شده است، که نتایج حاصل از شکل های ۴-۲۵ و ۴-۲۶ را تایید می کند.

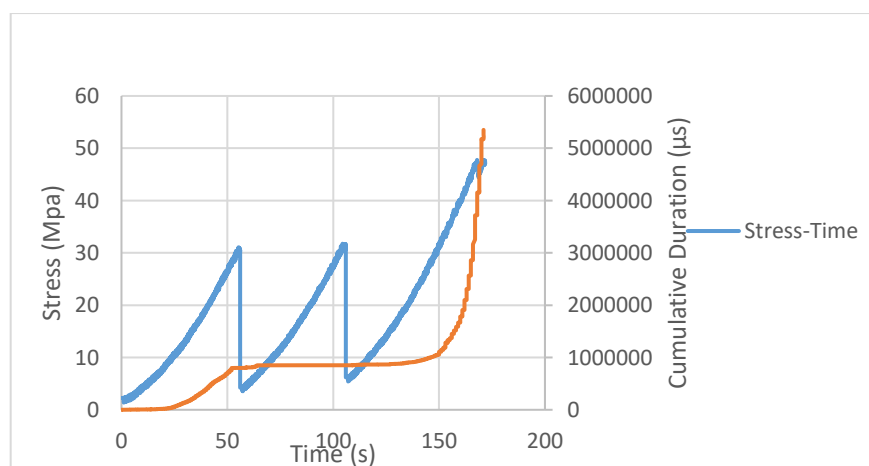
#### ۴-۶-۲-۳- ارتباط پارامتر مدت زمان دوام با آسیب و گسیختگی سنگ

شکل ۴-۲۷ نمودار تغییرات مدت زمان دوام\_زمان را در کنار نمودار تنش- زمان در یک نمودار نشان می دهد. همان طور که در شکل دیده می شود بیشترین مقدار مدت زمان دوام در مرحله آسیب وجود دارد، که علت آن تولید رخدادهای بزرگتری می باشد که از رشد ریز ترک ها و توسعه ناحیه شکست منتج شده است.



شکل ۴-۲۷: نمودار تنش و مدت زمان دوام بر حسب زمان در آزمایش فشاری تک محوره سنگ زئولیت

نمودار تجمعی تغییرات مدت زمان دوام - زمان را در کنار نمودار تنش - زمان در یک نمودار در شکل ۴-۲۸ نشان داده شده است. در این نمودار نیز به خوبی مشخص است که بیشترین مقدار مدت زمان دوام مربوط به لحظه ی شکست می باشد و بعد از شکست نیز مدت زمان دوام همچنان مقدار بالایی دارد زیرا ترک اصلی در حال رشد می باشد که این خود سبب توسعه زون شکست تا گسیختگی کامل نمونه می شود.



شکل ۴-۲۸: نمودار تنش و تجمعی مدت زمان دوام بر حسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ

زئولیت

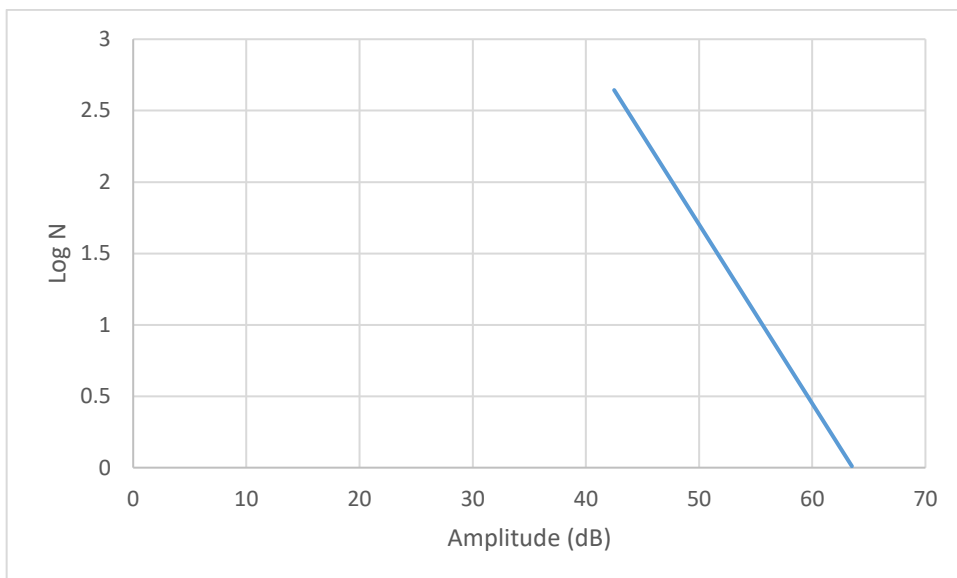


به منظور بررسی دقیق و مطمئن و مقایسه نتایج حاصل از آزمون های مختلف، نمودار تنش و مدت زمان دوام برحسب زمان و نمودار تنش و تجمعی مدت زمان دوام برحسب زمان برای نمونه GUT<sub>6</sub> در پیوست آورده شده است، که نتایج حاصل از شکل های ۴-۲۷ و ۴-۲۸ را تایید می کند.

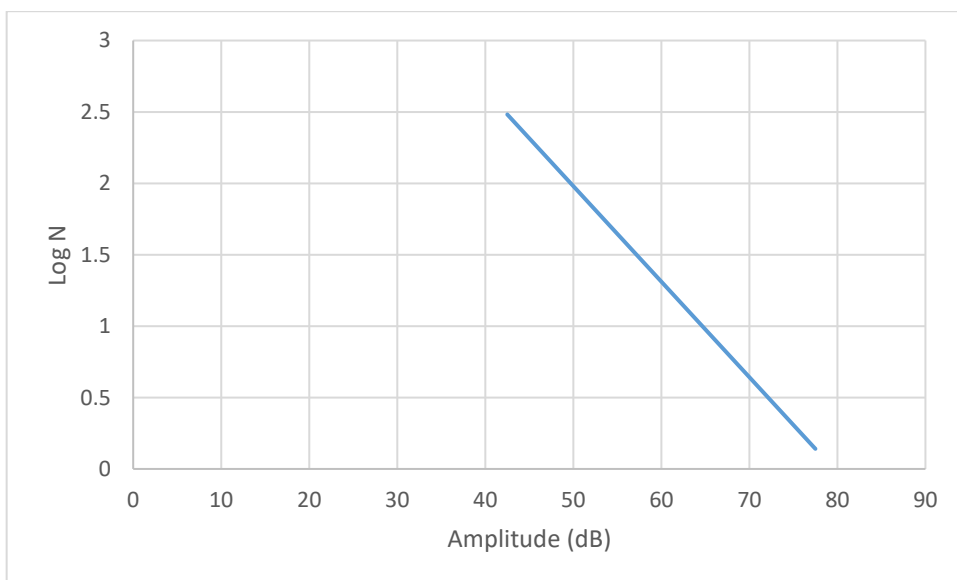
#### ۴-۶-۳- تحلیل مقدار $b - value$

یکی از تحلیل های مهم روش انتشار آوایی برای بررسی شکست و ارزیابی سطح خسارت وارده به ماده و سازه تحلیل در مقدار  $b - value$  می باشد، که به دلیل کمی بودن این تحلیل و روند بررسی آن کاربردهای مختلفی از آن مورد بررسی قرار گرفته است.

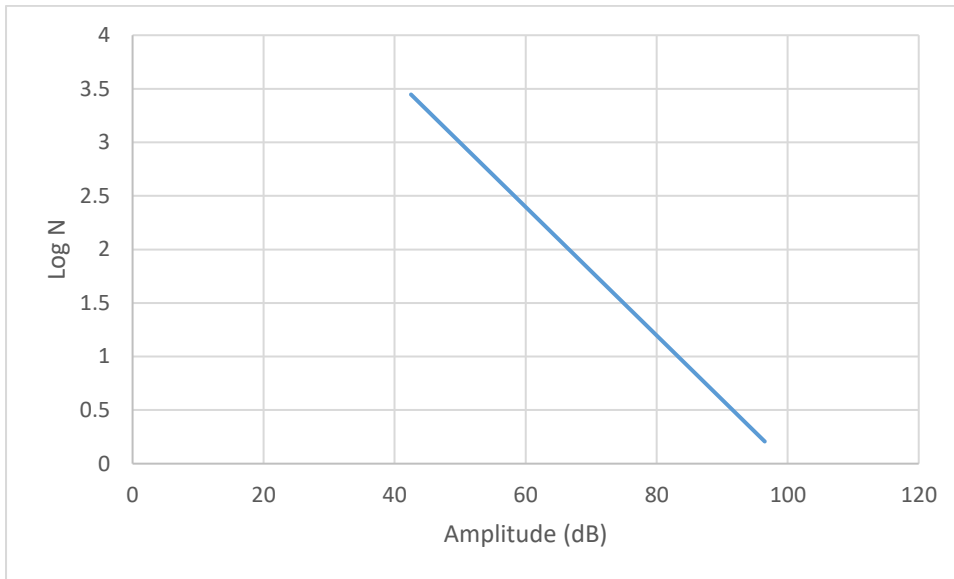
به منظور بررسی تغییرات این پارامتر در حین انجام آزمایش با توجه به تئوری این روش تحلیلی برای رخدادهای ثبت شده در نمونه های آزمایش ZUT<sub>1</sub> و ZBT و GUT<sub>3</sub> و GBT<sub>1</sub> بر اساس رابطه این روش مقدار  $b - value$  بدست آمد و نمودار آن ترسیم شد (شکل های ۳۲-۲۹). محدوده ای که تغییرات دامنه رخدادها دارای یک افت در مقدار  $b - value$  هستند نمایانگر ایجاد تغییرات درونی نمونه می باشد. همچنین با توجه به نمودار و زمان شکست، کمترین مقدار این پارامتر در لحظه شکست مشاهده گردید که با توجه به آزمایش تک محوره این روند به خوبی در شکل های زیر مشاهده می گردد. تغییرات و کاهش میزان این پارامتر نشان دهنده شکست در نمونه و رشد ترک اصلی می باشد که این مقدار کمی یک ملاک بسیار مناسبی برای ارزیابی خسارت در نمونه می باشد.



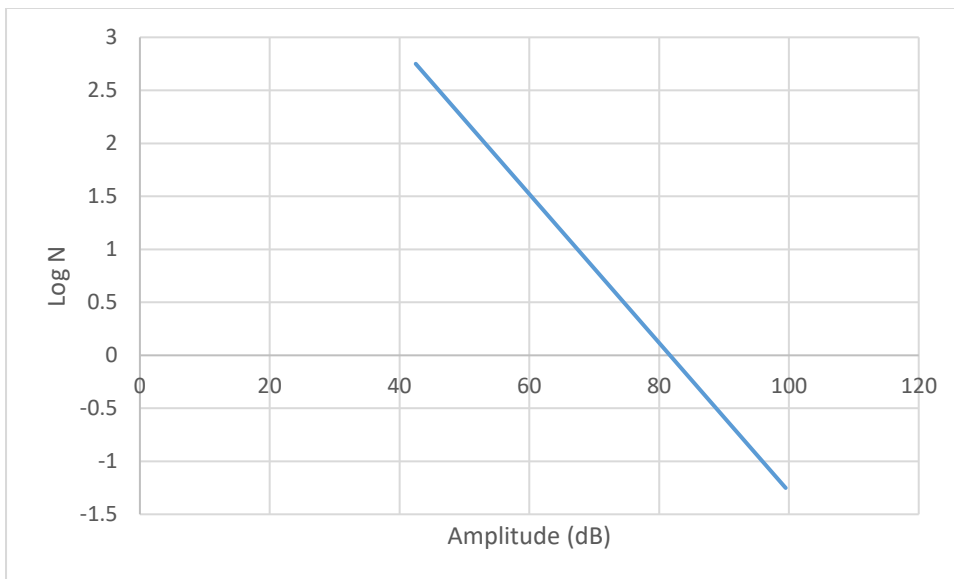
شکل ۴-۲۹: تحلیل b-value نمونه ZUT<sub>1</sub>



شکل ۴-۳۰: تحلیل b-value نمونه ZBT



شکل ۴-۳۱: تحلیل b-value نمونه  $GUT_3$



شکل ۴-۳۲: تحلیل b-value نمونه  $GBT_1$

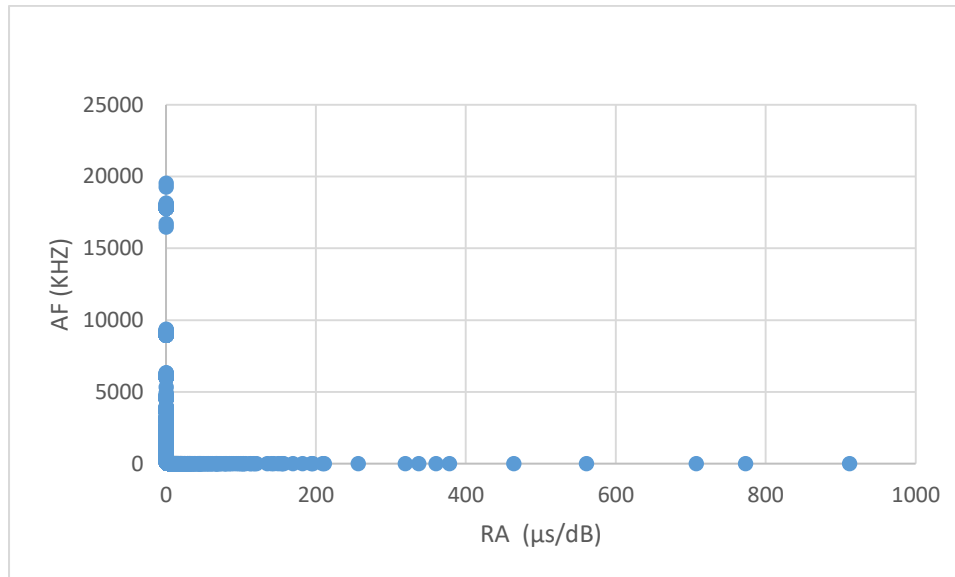
#### ۴-۶-۴- تحلیل حالت غالب شکست

تغییرات فرکانس و زاویه خیز (RA) برای نمونه ها یکی از پارامترهای مهم جهت تعیین نوع رخدادهای دریافتی توسط دستگاه انتشار آوایی می باشد. با تشخیص نوع رخداد می توان نوع ترک تولید کننده آن رخداد را تعیین کرد. در مراحل اولیه بارگذاری رخدادهای تولیدی عمدتاً دارای فرکانس بالا و مقدار RA پایین می باشند. با گذشت زمان رفته رفته از مقدار فرکانس رخدادهای دریافتی کاسته شده و بر مقدار RA اضافه می شود. تا این که در مراحل نهایی بارگذاری مقدار RA نمونه ها به بیشترین مقدار خود می رسد.

از این نکته می توان در کنترل شکست در سازه های سنگی و بتنی که توسط سیستم انتشار آوایی پایش می شوند استفاده نمود. به این ترتیب که در صورت افزایش پارامتر RA از یک حد بحرانی به نزدیک بودن وقوع شکست سازه پی برد. مطابق ویژگی های امواج برشی و کششی، امواج برشی به طور عمده دارای مقدار RA بالا و فرکانس پایین می باشند در حالی که امواج کششی فرکانس بالا و RA پایین دارند. بنابراین می توان گفت که عمده رخدادهای تولیدی در مراحل اولیه بارگذاری از نوع کششی می باشند. سپس با گذشت زمان آزمایش نوع رخدادهای تولیدی از حالت کششی به برشی تبدیل می شود. عمده انرژی تولیدی در طول کل آزمایش نیز توسط همین رخدادهای (برشی) آزاد می شود.

برای انجام تحلیل و بررسی حالت غالب در نمونه آزمایش ZUT<sub>1</sub> از تحلیل نموداری فرکانس متوسط در مقابل زاویه خیز استفاده شد. به منظور استفاده از این تحلیل ابتدا باید دو پارامتر فرکانس متوسط (نسبت شمارش به مدت زمان دوام در هر لحظه) و زاویه خیز (نسبت دامنه به زمان خیز) را محاسبه کرد و با ترسیم این دو پارامتر برای هر هیت می توان با استفاده از مطالبی که گفته شد در رابطه با تغییرات حالت شکست مطالعه انجام داد.

همانطور در شکل ۴-۳۳ مشاهده می شود نمودار فرکانس متوسط و زاویه خیز برای نمونه  $ZUT_1$  ترسیم شد و تغییرات پارامترهای فرکانس متوسط و زاویه خیز مشاهده می گردد.



شکل ۴-۳۳: تحلیل حالت شکست رخدادهای آوایی نمونه  $ZUT_1$

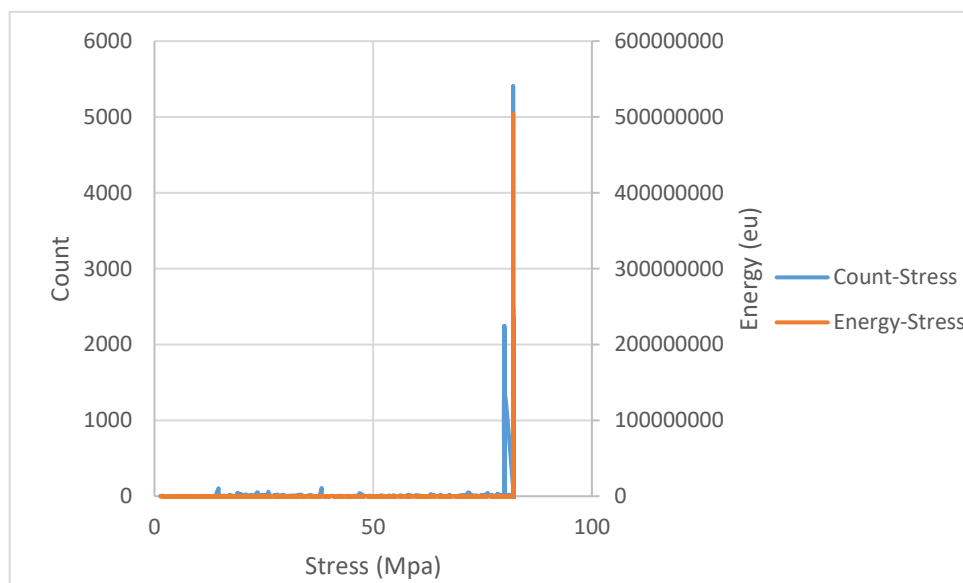
۴-۶-۵ ارتباط پارامترهای آوایی با هم

۴-۶-۵-۱ ارتباط پارامتر شمارش با پارامتر انرژی

به منظور بررسی ارتباط پارامترهای مختلف انتشار آوایی، نمودار شمارش - تنش و انرژی - تنش کنار هم قرار گرفته اند، تا ارتباط دو پارامتر شمارش و انرژی با هم مورد بررسی قرار گیرد. همانطور که در شکل ۴-۳۴ مشاهده می شود که هر دو پارامتر شمارش و انرژی تا حد مشخصی از تنش وارده فعالیت ضعیفی دارند و پس از حد مشخصی از بارگذاری روند صعودی شده و پس از لحظه شکست شروع به کاهش می کنند. مشاهده می شود که شمارش و انرژی رابطه ی نزدیکی با هم دارند، زیرا پارامتر شمارش با ایجاد ریز ترک ها و پارامتر انرژی با روند ترکیب ریز ترک ها مرتبط است. ترک های کوچک رخدادهای کوچکی تولید می کنند، در نتیجه انرژی کمتری از آن ها آزاد می شود

همچنین ترک های بزرگ رخدادهای بزرگی تولید می کنند، که ناشی از آزاد شدن انرژی به مقدار بالا می باشد. بنابراین دو پارامتر شمارش و انرژی به هم وابسته بوده و با افزایش تنش هر دو شروع به افزایش کرده و در لحظه شکست هر دو پارامتر بیشترین مقدار را داشته و پس از لحظه شکست تا گسیختگی کامل نمونه هر دو پارامتر کاهش می یابند زیرا در مسیر ترک برای رشد ترک هیچ مانعی وجود ندارد و در مسیر از قبل ریز ترک هایی وجود دارند بنابراین ترک برای رشد کردن به انرژی زیادی نیاز ندارد و در نتیجه رخدادهای ضعیف تری تولید می کند.

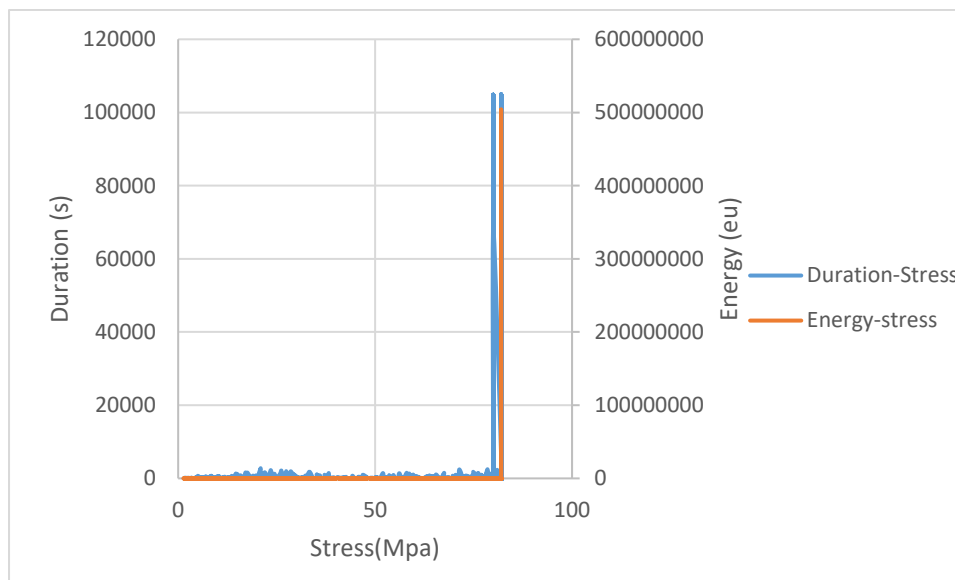
شمارش های دریافتی ناشی از انرژی آزاد شده منتج شده از جابه جایی تغییر شکل و رشد و گسترش و یکپارچگی ریز ترک و تشکیل ناحیه فرآیند شکست می باشد. با توجه به شکل، با افزایش مقدار تنش و به دنبال آن با افزایش مقدار انرژی آزاد شده در لحظه شکست مقدار شمارش در نقطه پیک افزایش یافته است.



شکل ۴-۳۴: نمودار شمارش و انرژی بر حسب تنش در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره ZUT<sub>1</sub>

#### ۴-۶-۵-۲ ارتباط پارامتر انرژی با پارامتر مدت زمان دوام

به منظور بررسی ارتباط دو پارامتر انرژی و مدت زمان دوام، نمودار انرژی-تنش و مدت زمان دوام - تنش در آن کنار هم قرار گرفته اند. همانطور که در شکل ۴-۳۵ مشاهده می شود که هر دو پارامتر بیشترین مقدار را در لحظه شکست دارند و پس لحظه شکست مدت زمان دوام همچنان مقدار بالایی را نشان می دهد که دلیل آن رشد ترک اصلی و توسعه زون شکست تا گسیختگی کامل است. همانطور که مشاهده می شود دو پارامتر انرژی و مدت زمان دوام تقریباً مشابه هم هستند زیرا هر دو پارامتر با روند ترکیب ریزترک ها و توسعه زون شکست و رشد ترک اصلی مرتبط هستند.



شکل ۴-۳۵: نمودار مدت زمان دوام و انرژی بر حسب تنش در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره  $ZUT_1$

#### ۴-۶-۶ جمع بندی فصل

در این فصل به منظور بررسی ارتباط پارامترهای آوایی با آسیب و گسیختگی سنگ، بر روی سنگ های ژئولیت و گرانیت آزمایش انتشار آوایی انجام شد. پس از برداشت داده ها، روی داده ها تحلیل های پارامتری انجام شد که نتایج حاصل از این تحلیل ها در فصل آتی ارائه خواهد شد.





فصل ۵: نتیجه گیری

## ۵-۱- مقدمه

به منظور دستیابی به اهداف ذکر شده در پژوهش حاضر و انجام تحلیل های دقیق سعی گردید تا با استفاده از روش های مناسب و متناسب با امکانات و محدودیت های موجود مطالعه انجام شود. در این پژوهش سعی شده است تا کاربرد روش انتشار آوایی در رفتار نگاری شکست و بررسی روش های تحلیلی متفاوت این روش به عنوان مثال تحلیل پارامترهای آوایی به منظور بررسی ارتباط آن ها با آسیب و گسیختگی سنگ در آزمون های آزمایشگاهی روی نمونه های استوانه ای تک محوره و دیسکی برزیلی گرانیت و زئولیت مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. در ادامه این فصل نتایج حاصله در طول این پژوهش ارائه می شوند. در پایان نیز پیشنهاداتی جهت بهبود و ادامه موضوع توسط سایر محققین ارائه می شود.

## ۵-۲- نتیجه گیری

۱- با توجه به روش های تحلیلی مختلف داده های بدست آمده از آزمایشات فشاری بر روی نمونه های استوانه ای و دیسکی برزیلی و برداشت داده های آوایی کاربرد این روش در رفتار نگاری شکست تایید شد.

۲- با انجام تحلیل مناسب روی داده های آوایی از جمله تعداد شمارش، انرژی، مدت زمان دوام با میزان بار وارده بر نمونه تا لحظه شکست می توان تقسیم بندی ها و طبقه بندی های مختلفی در سطوح مختلف بار وارده تا شکست نمونه با استفاده از داده های آوایی انجام داد.

۳- نتایج تحلیل پارامتری برای نمونه هایی که تا لحظه شکست بارگذاری شده اند نشان داد که در حدود ۳۰-۴۰ درصد از مقاومت نهایی، ریزترک ها در نمونه آغاز می شوند و در حدود ۷۰-۸۰ درصد از مقاومت نهایی ریز ترک ها شروع به ترکیب و بهم پیوستن می کنند با توجه به نمودار انرژی در ۸۰ درصد از مقاومت نهایی با تمرکز تنش بوجود آمده و با گسترش و ترکیب ریز ترک ها و توسعه ناحیه

شکست نمونه در آستانه شکست قرار می گیرد. در مقاومت نهایی با توجه به نمودار تغییرات انرژی و همچنین مدت زمان دوام، گسترش ترک اصلی به صورت پایدار با ایجاد رخداد‌های با میزان انرژی آزاد شده تقریباً یکسان، نمونه به صورت کامل گسیخته می شود.

۴- نتایج تحلیل های انجام شده روی داده های بدست آمده از آزمایشات، کاربرد تحلیل های پارامتری مانند بررسی تغییرات پارامتر های آوایی (شمارش، انرژی و مدت زمان دوام) برای رفتار نگاری لحظه شکست را به خوبی نشان می دهد.

۵- نتایج تحلیل های انجام شده روی پارامترهای زمان خیز و حداکثر دامنه نشان داد که ارتباط این دو پارامتر با آسیب و گسیختگی سنگ به خوبی مشهود نیست و بهتر است از این دو پارامتر برای ارتباط با آسیب و گسیختگی سنگ استفاده نشود. و می توان برای مشخصات منبع انتشار آوایی از آن ها استفاده کرد.

۶- با استفاده از تحلیل های انجام شده روی **b-value** مشخص شد که می توان از این مقدار به عنوان یک معیار کمی به منظور رفتار نگاری شکست استفاده نمود. کاهش این مقدار قبل از وقوع شکست را می توان به عنوان اعلام هشدار شکست در نمونه در مراحل قبل تر از شکست استفاده نمود، همچنین کمترین مقدار این پارامتر نشان دهنده لحظه شکست می باشد.

۷- تحلیل حالت غالب شکست برای نمونه تک محوره انجام شد و مشخص گردید، که در مراحل اولیه بارگذاری ترک های کششی رخ می دهند و در مراحل بعدی بارگذاری ترک های برشی و ترکیبی رخ می دهند.

۸- با تحلیل روی نمونه های پیش بارگذاری شده اثر کایزر به خوبی مشاهده شد. و نتیجه گرفته می شود که چنان چه مقدار بارگذاری مجدد از حداکثر مقدار بار سیکل قبل تجاوز نکند هیچ گونه انتشار آوایی رخ نمی دهد یا به مقدار خیلی ضعیف رخ می دهد.

۹- با انجام تحلیل روی دو پارامتر، انرژی و مدت زمان دوام مشاهده شد که این دو پارامتر تقریباً مشابه هم می باشند و علت آن، این است که هر دو پارامتر با روند ترکیب ریز ترک و رشد آن ها و توسعه زون شکست مرتبط هستند.

۱۰- با انجام تحلیل ها مشاهده شد که در مرحله تشکیل ماکرو ترک که جسم از حالت الاستیک گذر کرده و به حالت پلاستیک در آمده است ماکزیمم مقدار شمارش، انرژی و مدت زمان دوام وجود دارد.

۱۱- با انجام تحلیل روی دو پارامتر شمارش و انرژی مشاهده شد که این دو پارامتر با هم مرتبط بوده و پارامتر شمارش ناشی از انرژی آزاد شده منتج از جابه جایی، تغییر شکل، رشد و گسترش و یکپارچگی ریز ترک و تشکیل ناحیه فرآیند شکست می باشد.

۱۲- با تحلیل نمودارهای پارامترها و نمودار تجمعی آن ها مشاهده شد که نمودار تجمعی پارامترها بهتر و واضح تر ارتباط پارامترهای آوایی با آسیب و گسیختگی سنگ را نشان می دهد.

۱۳- آزمون ها نشان داد که شمارش، انرژی و مدت زمان دوام معرف فرآیند آسیب در سنگ بوده و سیگنال های ساطع شده با آسیب افزایش می یابند و پارامتر آسیب بر اساس شمارش و انرژی و مدت زمان دوام قابل محاسبه می باشد. پس می توان از منحنی تجمعی شمارش و انرژی و مدت زمان دوام نیز برای ارزیابی آسیب استفاده کرد.

### ۵-۳- پیشنهاد ها

۱- بررسی ارتباط پارامترهای آوایی با آسیب و گسیختگی سنگ برای نمونه های مکعبی

۲- بررسی ارتباط پارامترهای آوایی با آسیب و گسیختگی سنگ برای نمونه ها متورق

۳- بررسی ارتباط پارامترهای آوایی با آسیب و گسیختگی سنگ برای نمونه ها آنیزوتروپ و ناهمگن

- ۴- به کارگیری دوربین دیجیتالی PIV (Partical Image Velocimetry) روش سرعت سنجی با کمک تصاویر حاوی ذرات) و انتشار آوایی به منظور ارائه تصاویر مربوط به شروع و گسترش آسیب نمونه و انطباق این تصاویر با داده های آوایی
- ۵- بررسی آسیب و گسیختگی سنگ برای نمونه های دارای ترک از قبل با استفاده از داده های آوایی
- ۶- بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر روی چقرمگی با استفاده از روش انتشار آوایی
- ۷- مدل سازی عددی آزمون های انجام شده به منظور بررسی پارامترهای مختلف موثر بر شکست
- ۸- بررسی آزمایشگاهی و عددی نمونه های تک محوره و برزلی حاوی چندین ترک اولیه مصنوعی و بررسی تنش و نحوه بهم پیوستن ترک ها.

## منابع فارسی

- ناظری ع، پ. م. معدن (۲۰۱۶). "بررسی تاثیر نانو ذرات سیلیس بر مقاومت و مکانیزم شکست مواد پایه سیمانی با استفاده از سیستم انتشار آوایی." ۱۱(۳۲): ۹-۲۱.
- ر. ا. قاجار، مکانیک شکست و خستگی، چاپ اول. انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۸.
- سجادی و سیدعبدالکریم (۲۰۱۴). "رفتار مکانیکی مواد." ۱۱(۳۲): ۹-۲۱.
- عرب نژاد ح، پ. م. معدن (۲۰۱۶). "بررسی کارائی روش انتشار آوایی در رفتارنگاری شکست مواد ترد." ۱۱۹-۱۲۷.

## منابع لاتین

- Agioutantis, Z., K. Kaklis, S. Mavrigiannakis, M. Verigakis, F. Vallianatos, V. J. I. j. o. m. s. Saltas and technology (2016). "Potential of acoustic emissions from three point bending tests as rock failure precursors." 26(1): 155-160.
- Aggelis, D. G. J. M. R. C. (2011). "Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters." 38(3): 153-157.
- A. Janssen, R. Kl AE boe, T. Leroux, A. J. N. Liebl and health (2015). "ICBEN review of research on the biological effects of noise 2011-2014." 17(75): 57.
- Benson, P. M., S. Vinciguerra, P. G. Meredith and R. P. J. S. Young (2008). "Laboratory simulation of volcano seismicity." 322(5899): 249-252.
- Boogaard, J. and G. van Dijk (2012). Non-destructive testing, Elsevier.
- Balageas, D. J. S. h. m. (2006). "Introduction to structural health monitoring." 13-43.

Ballantine Jr, D., R. M. White, S. J. Martin, A. J. Ricco, E. Zellers, G. Frye and H. Wohltjen (1996). *Acoustic wave sensors: theory, design and physico-chemical applications*, Elsevier.

Behnia, A., H. K. Chai, T. J. C. Shiotani and B. Materials (2014). "Advanced structural health monitoring of Basner, M., M. Brink, A. Bristow, Y. De Kluizenaar, L. Finegold, J. Hong, S.

Boogaard, J. and G. van Dijk (2012). *Non-destructive testing*, Elsevier.

Cai, M., P. Kaiser, Y. Tasaka, T. M. AE jima, H. Morioka, M. J. I. J. o. R. M. Minami and M. Sciences (2004). "Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations." 41(5): 833-847.

Carpinteri, A., G. Lacidogna and N. J. E. F. M. Pugno (2007). "Structural damage diagnosis and life-time assessment by acoustic emission monitoring." 74(1-2): 273-289.

Carpinteri, A. and N. J. M. o. C. R. Pugno (2002). "Fractal fragmentation theory for shape effects of quasi-brittle materials in compression." 54(6): 473-480.

Cartz, L. (1995). "Nondestructive testing."

Chen, X. and B. J. T. I. J. o. A. M. T. Li (2007). "Acoustic emission method for tool condition monitoring based on wavelet analysis." 33(9-10): 968-976.

Evans, A. and Y. J. A. M. Fu (1985). "Some effects of microcracks on the mechanical properties of brittle solids—II. Microcrack toughening." 33(8): 1525-1531.

Finlayson, R. D., M. Friesel, M. Carlos, P. Cole and J. J. I.-W. t. N.-. Lenain (2001). "Health monitoring of AE rospace structures with acoustic emission and acousto-ultrasonics." 43(3): 155-158.

Goebel, T., T. Becker, D. Schorlemmer, S. Stanchits, C. Sammis, E. Rybacki and G. J. J. o. G. R. S. E. Dresen, (2012). "Identifying fault heterogeneity through mapping spatial anomalies in acoustic emission statistics." 117(B3).

Goebel, T., T. Becker, D. Schorlemmer, S. Stanchits, C. Sammis, E. Rybacki and G. J. J. o. G. R. S. E. Dresen (2012). "Identifying fault heterogeneity through mapping spatial anomalies in acoustic emission statistics." 117(B3).

Gostautas, R. S., G. Ramirez, R. J. Peterman and D. J. J. o. b. e. Meggers (2005). "Acoustic emission monitoring and analysis of glass fiber-reinforced composites bridge decks." 10(6): 713-721.

Grosse, C. U. and M. Ohtsu (2008). Acoustic emission testing, Springer Science & Business Media. wavelet transform on modal acoustic emission source location in thin plates with one sensor." 81(5): 427-431.

Heap, M., P. Baud, P. Meredith, A. Bell and I. J. J. o. G. R. S. E. Main (2009). "Time-dependent brittle creep in Darley Dale sandstone." 114(B7).

Kaklis, K., S. Mavrigiannakis, V. Saltas, F. Vallianatos and Z. J. F. e. I. S. Agioutantis (2017). "Using acoustic emissions to enhance fracture toughness calculations for CCNBD marble specimens." 11(40): 1-17.

Kanagawa, T., M. Hayashi and H. J. C. R. E. Nakasa (1976). "Estimation of spatial components in rock samples using the Kaiser effect of acoustic emission." 375004.

Kanagawa, T. and H. Nakasa (1978). Method of estimating ground pressure, Google Patents.

Khaz AE i, C., J. Hazzard, R. J. C. Chalaturnyk and Geotechnics (2015). "Damage quantification of intact rocks using acoustic emission energies recorded during uniaxial compression test and discrete element modeling." 67: 94-102.

Kong, B., Z. Li, E. J. J. o. G. Wang and Engineering (2017). "Fine characterization rock thermal damage by acoustic emission technique." 15(1): 1.

Li, K. and T. Li (2018). Study on Three Point Bending Features of Sandstone Based on Acoustic Emission. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing.

Lockner, D., J. Byerlee, V. Kuksenko, A. Ponomarev and A. J. N. Sidorin (1991). "Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite." 350(6313): 39.

Lemaitre, J. (2012). A course on damage mechanics, Springer Science & Business Media.

Lavrov, A. J. I. J. o. R. M. and M. Sciences (2003). "The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques." 40(2): 151-171.

Li, W., J. Bai, J. Cheng, S. Peng, H. J. I. J. o. R. M. Liu and M. Sciences (2015). "Determination of coal–rock interface strength by laboratory direct shear tests under constant normal load." 77: 60-67.

Li, W., J. Bai, J. Cheng, S. Peng, H. J. I. J. o. R. M. Liu and M. Sciences (2015). "Determination of coal–rock interface strength by laboratory direct shear tests under constant normal load." 77: 60-67.

Mogi, K. J. B. E. R. I. (1968). "Source locations of elastic shocks in fracturing process in rocks (1)." 46: 1103-1125.



Mogi, K. J. B. E. R. I., Univ. Tokyo (1962). "Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relation to earthquake phenomena." 40: 125-173.

Molladavoodi, H., A. J. F. E. i. A. Mortazavi and Design (2011). "A damage-based numerical analysis of brittle rocks failure mechanism." 47(9): 991-1003.

Main, I. G. J. G. J. I. (1992). "Damage mechanics with long-range interactions: correlation between the seismic b-value and the fractal two-point correlation dimension." 111(3): 531-541.

Mohd, S. (2013). Acoustic emission for fatigue crack monitoring in nuclear piping system, Cardiff Univeristy.

Moradian, Z., H. H. Einstein, G. J. R. M. Ballivy and R. Engineering (2016). "Detection of cracking levels in brittle rocks by parametric analysis of the acoustic emission signals." 49(3): 785-800.

Nishizawa, O., K. Onai, K. J. p. Kusunose and a. geophysics (1984). "Hypocenter distribution and focal mechanism of AE events during two stress stage creep in Yugawara andesite." 122(1): 36-52.

Obert, L. J. R. I. (1941). "Use of subaudible noises for prediction of rock burst.

Obert, L. and W. Duvall (1945). Microseismic method of predicting rock failure in underground mining. Part I. General method, Bureau of Mines, Washington, DC (USA).

Rao, A. J. D. S. J. (1990). "Acoustic emission and signal analysis." 40(1): 55.

Rao, M., K. P. Lakshmi, G. N. Rao, K. V. Kumar and S. Udaykumar (2009). Pre-failure damage caused by micro cracks in rock: A laboratory study using acoustic emission. Proceedings of the National Seminar and Exhibition on Non-Destructive Evaluation, NDE-2009, Indian Society for Non-Destructive Testing (ISNT).

Rao, M. and K. P. J. C. S. Lakshmi (2005). "Analysis of b-value and improved b-value of acoustic emissions accompanying rock fracture." 1577-1582.

Scholz, C. J. J. o. G. R. (1968). "Microfracturing and the inelastic deformation of rock in compression." 73(4): 1417-1432.

Shah, K. R. and J. F. J. J. o. G. R. S. E. Labuz (1995). "Damage mechanisms in stressed rock from acoustic emission." 100(B8): 15527-15539.

Spetzler, H., G. Sobolev, A. Koltsov, A. Zang, I. C. J. p. Getting and a. geophysics (1991). "Some properties of unstable slip on rough surfaces." 137(1-2): 95-112.

Stavrakas, I., D. Triantis, S. Kourkoulis, E. Pasiou, I. J. L. A. J. o. S. Dakanali and Structures (2016). "Acoustic emission analysis of cement mortar specimens during three point bending tests." 13(12): 2283-2297.

Sun, X., H. Xu, L. Zheng, M. He and W. J. S. C. T. S. Gong (2016). "An experimental investigation on acoustic emission characteristics of sandstone rockburst with different moisture contents." 59(10): 1549-1558.

Shen, G., Z. Wu and J. Zhang (2014). Advances in acoustic emission technology. Proceedings of the World Conference on Acoustic Emission–2013: Springer, Springer.

Scruby, C. J. J. o. P. E. S. I. (1987). "An introduction to acoustic emission." 20(8): 946.

Shouceng Tian, Mao Sheng, Zhaokun Li, Hongkui Ge, Gensheng Li, (2017). "Acoustic Emission Characteristics of Sedimentary Rocks Under High-Velocity Waterjet Impingement". DOI 10.1007/s00603-017-1252-9.

Tian, S., M. Sheng, Z. Li, H. Ge, G. J. R. M. Li and R. Engineering (2017). "Acoustic Emission Characteristics of Sedimentary Rocks Under High-Velocity Waterjet Impingement." 50(10): 2785-2794.

Tsangouri, E., D. G. Aggelis, T. E. Matikas and A. C. J. A. S. Mpalaskas (2015). "Acoustic emission activity for characterizing fracture of marble under bending." 6(1): 6.

Tobias, A. J. N.-d. t. (1976). "Acoustic-emission source location in two dimensions by an array of three sensors." 9(1): 9-12.

Tianshou Ma , Nian Peng , Zhu Zhu , Qianbing Zhang , Chunhe Yang and Jian Zhao, (2018). "Brazilian Tensile Strength of Anisotropic Rocks: Review and New Insights". doi:10.3390/en11020304 .

Wang, J., L. Xie, H. Xie, L. Ren, B. He, C. Li, Z. Yang, C. J. J. o. N. G. S. Gao and Engineering (2016). "Effect of layer orientation on acoustic emission characteristics of anisotropic shale in Brazilian tests." 36: 1120-1129.

Weiss, J. J. E. F. M. (2001). "Fracture and fragmentation of ice: a fractal analysis of scale invariance." 68(17-18): 1975-2012.

Wen, Z., X. Wang, L. Chen, G. Lin, H. J. A. i. M. S. Zhang and Engineering (2017). "Size effect on acoustic emission characteristics of coal-rock damage evolution."

Wang, R., C. Zhang, X. Liu, Q. Xie, P. Yan and T. J. A. s. s. Shao (2015). "Microsecond pulse driven Ar/CF<sub>4</sub> plasma jet for polymethylmethacrylate surface modification at atmospheric pressure." 328: 509-515.

WWW.Iran-Mavad.Com

Xiao, F., G. Liu, Z. Zhang, Z. Shen, F. Zhang, Y. J. I. J. o. M. S. Wang and Technology (2016). "Acoustic emission characteristics and stress release rate of coal samples in different dynamic destruction time." 26(6): 981-988.

Xu, J., J. Jiang, L. Zuo, Y. J. S. Gao and Vibration (2017). "Acoustic Emission Monitoring and Failure Precursors of Sandstone Samples under Various Loading and Unloading Paths."

Xu, X., B. Liu, S. Li, J. Song, M. Li, J. J. A. i. M. S. Mei and Engineering (2016). "The electrical resistivity and acoustic emission response law and damage evolution of limestone in Brazilian split test."

Yoshimitsu, N., H. Kawakata and N. J. G. R. L. Takahashi (2014). "Magnitude– 7 level earthquakes: A new lower limit of self-similarity in seismic scaling relationships." 41(13): 4495-4502.

Yan, X., L. Jun, L. Gonghui, G. J. S. Xueli and Vibration (2017). "Mechanical Properties and Acoustic Emission Properties of Rocks with Different Transverse Scales."

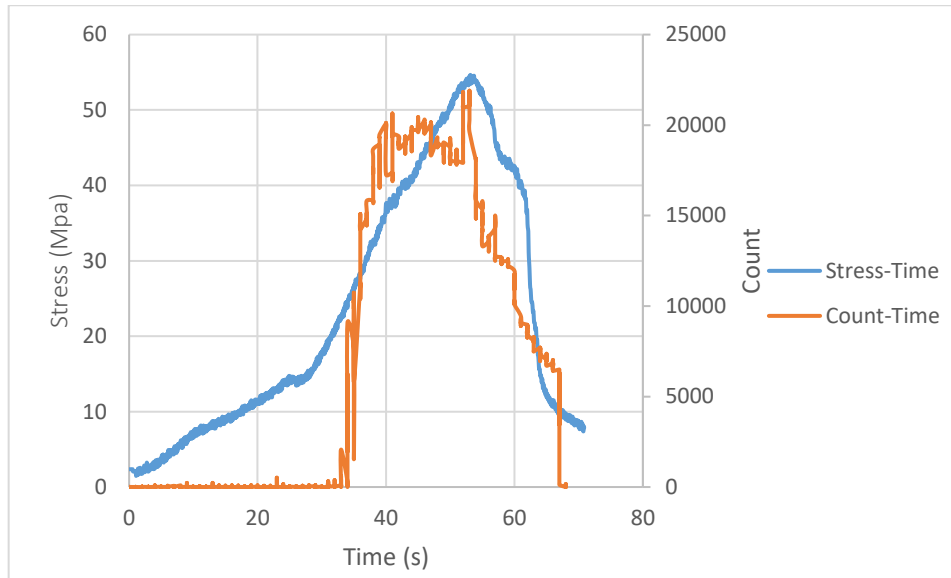
Zhang, Y., G. Wang, Y. Jiang, S. Wang, H. Zhao, W. J. S. Jing and Vibration (2017). "Acoustic emission characteristics and failure mechanism of fractured rock under different loading rates."

Zhou, H., F. Meng, C. Zhang, D. Hu, J. Lu and R. J. A. G. Xu (2016). "Investigation of the acoustic emission characteristics of artificial saw-tooth joints under shearing condition." 11(4): 925-939.

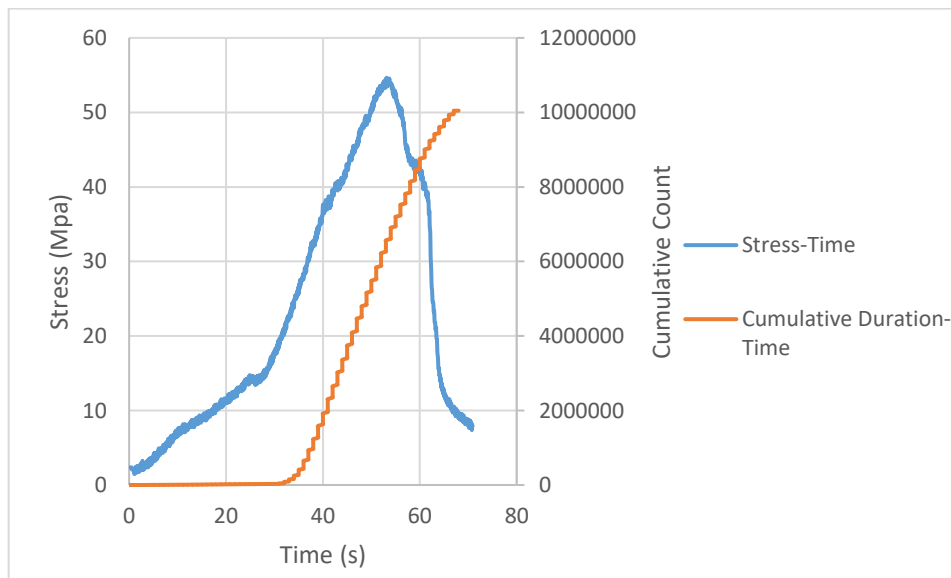
Zohora, F. (2016). Evaluation of material crack using acoustic emission technique, Queensland University of Technology.

Zhang, Y., Y. Chen, R. Yu, L. Hu, M. J. R. M. Irfan and R. Engineering (2017). "Effect of loading rate on the felicity effect of three rock types." 50(6): 1673-1681.

## پیوست

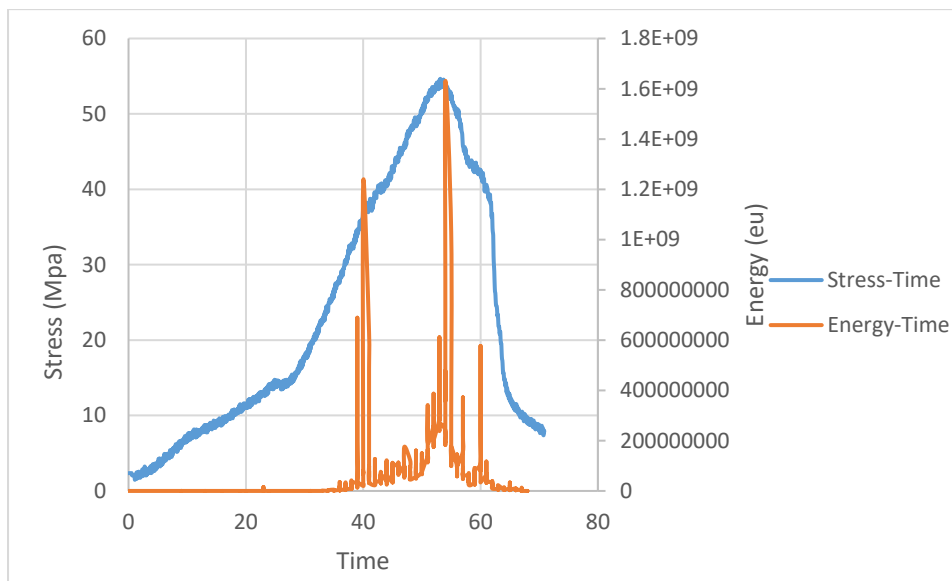


شکل ۱: نمودار تنش و شمارش برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ گرانیت  $GUT_1$

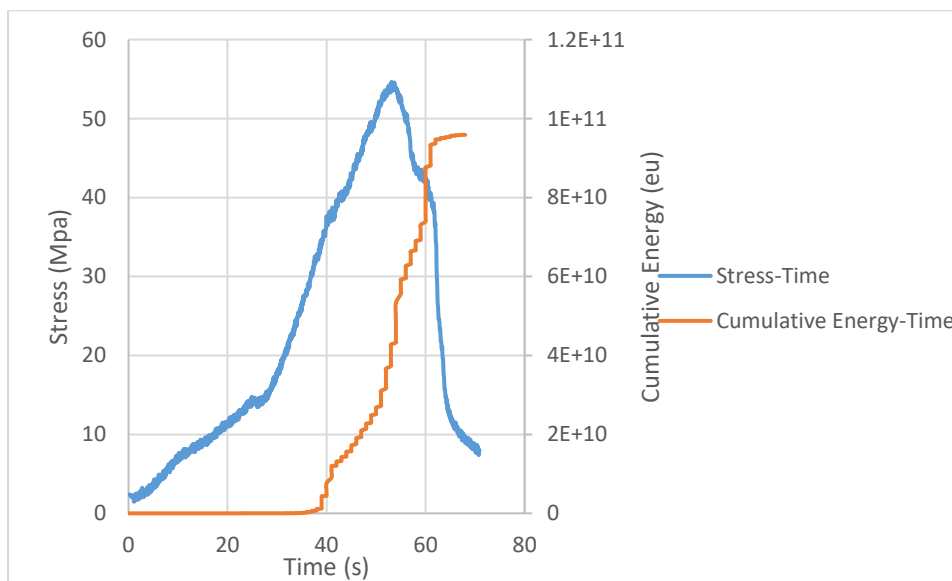


شکل ۲: نمودار تنش و جمع‌ی شمارش برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ گرانیت

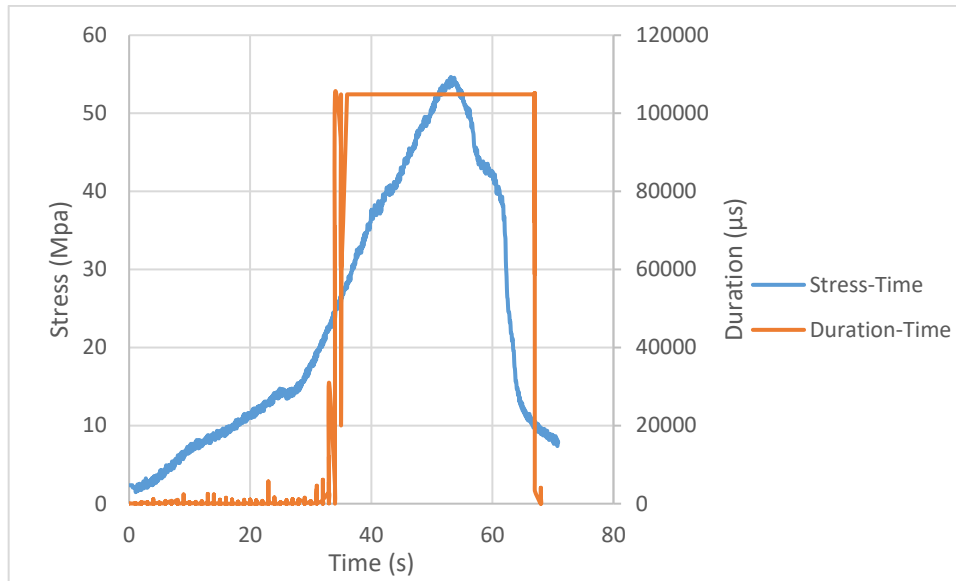
$GUT_1$



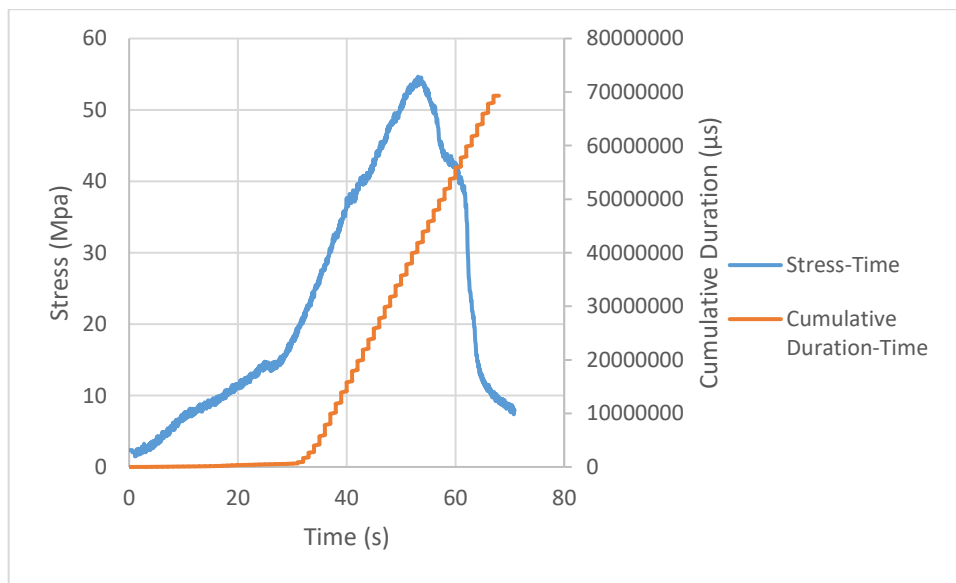
شکل ۳: نمودار تنش و انرژی برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ گرانیت  $GUT_1$



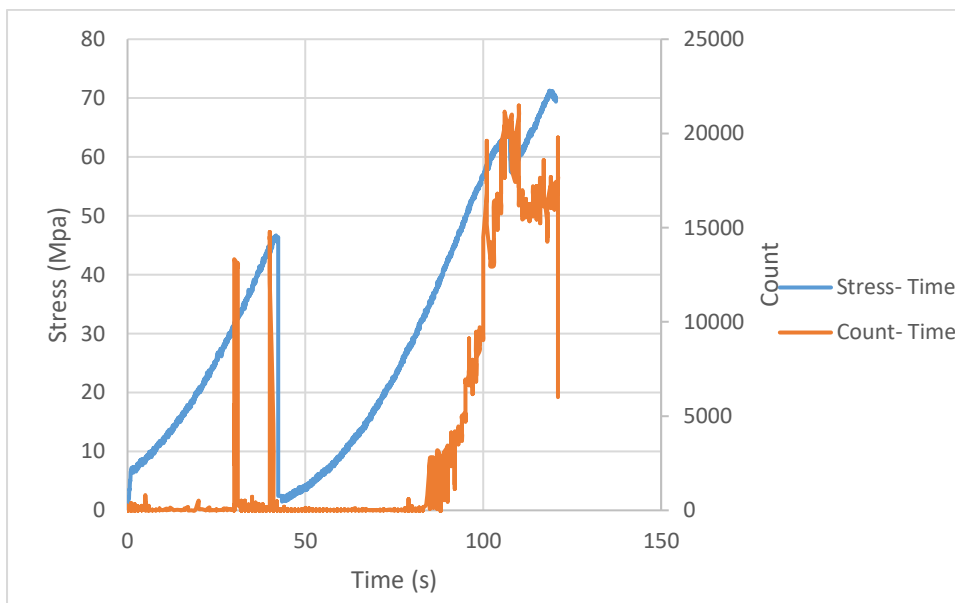
شکل ۴: نمودار تنش و تجمعی انرژی برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ گرانیت  $GUT_1$



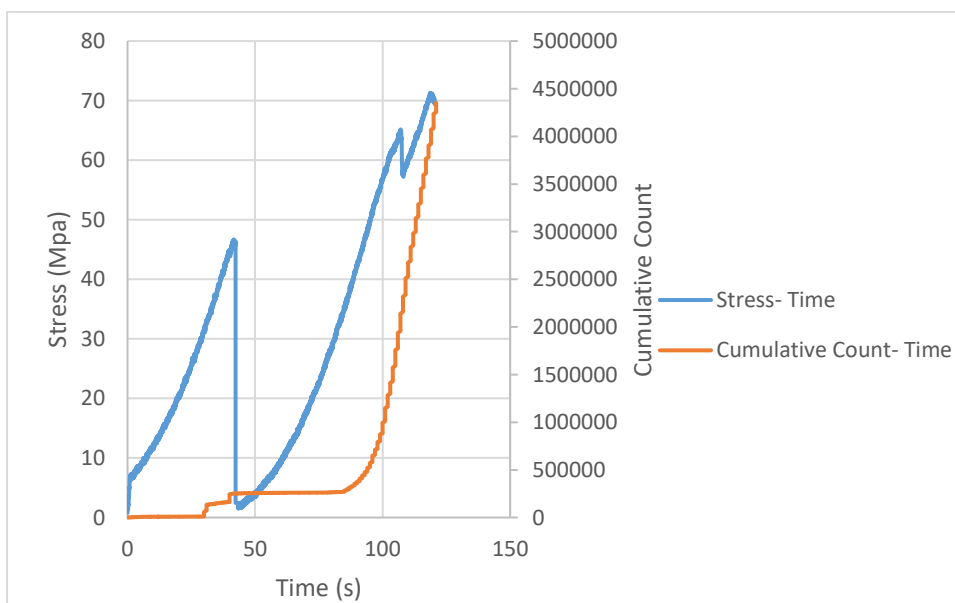
شکل ۵: نمودار تنش و مدت زمان دوام برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ گرانیت  $GUT_1$



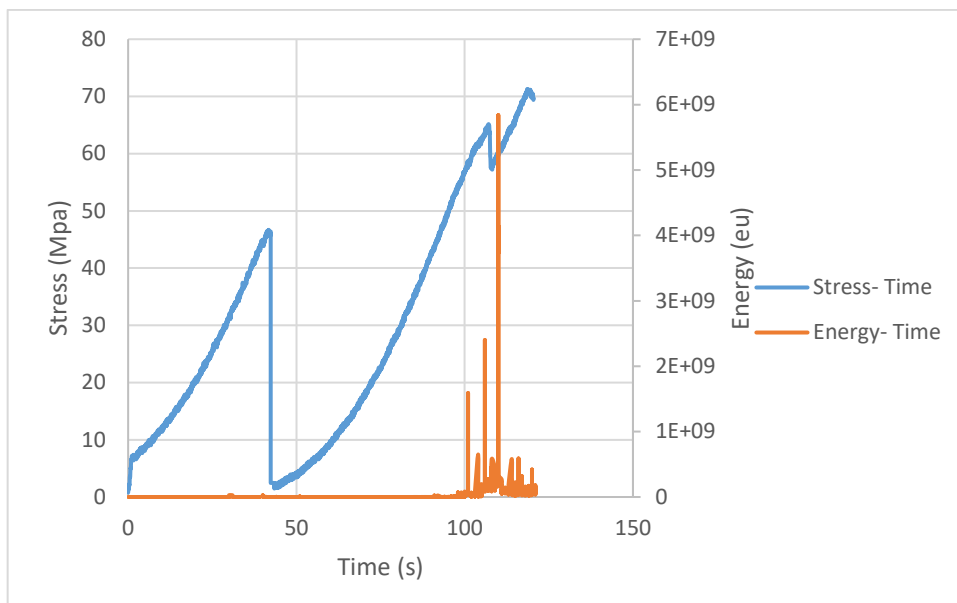
شکل ۶: نمودار تنش و تجمعی مدت زمان دوام برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ گرانیت  $GUT_1$



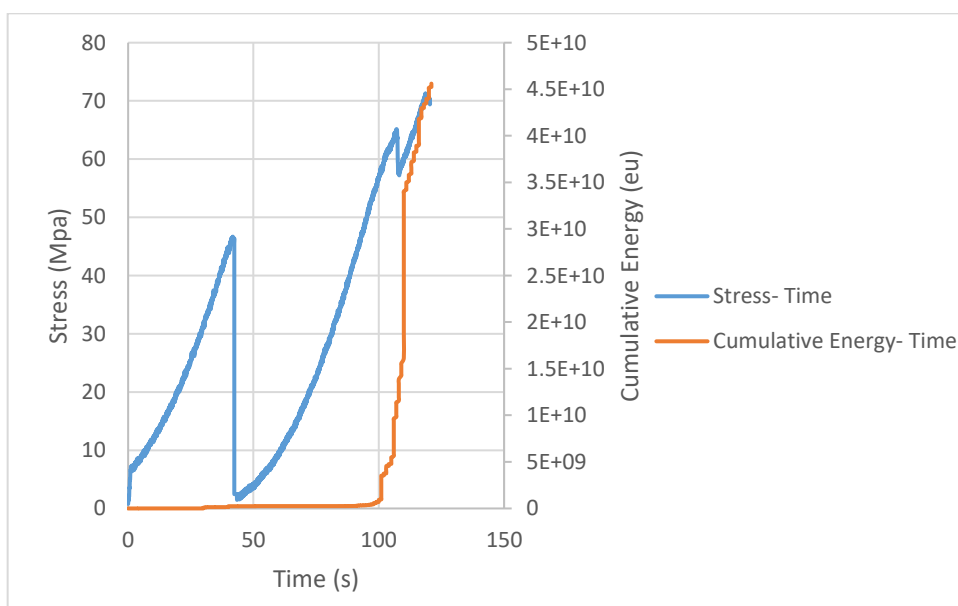
شکل ۷: نمودار تنش و شمارش برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ گرانیت<sub>6</sub> GUT



شکل ۸: نمودار تنش و جمع‌ی شمارش برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ گرانیت<sub>6</sub> GUT

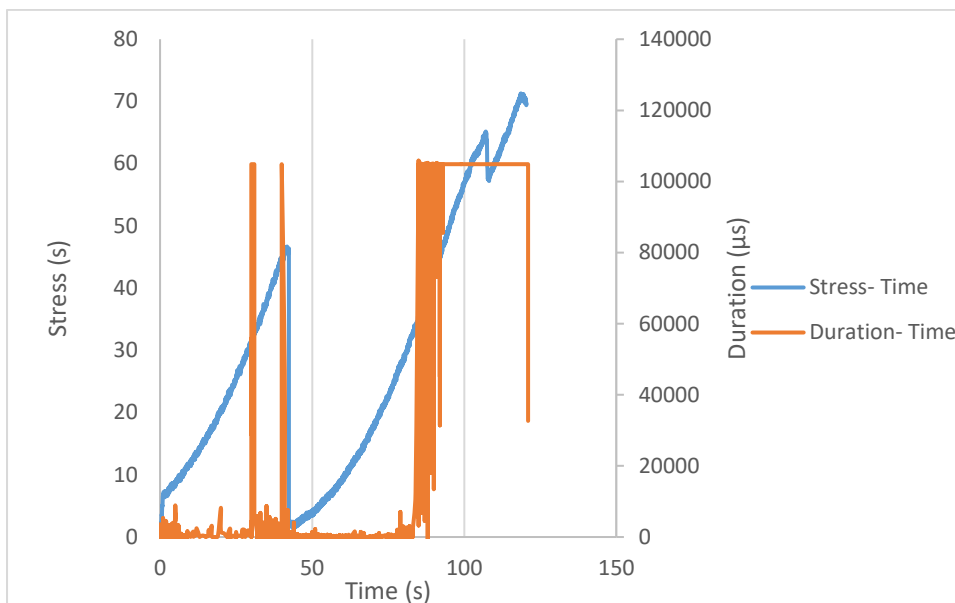


شکل ۹: نمودار تنش و انرژی برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ گرانیت GUT6

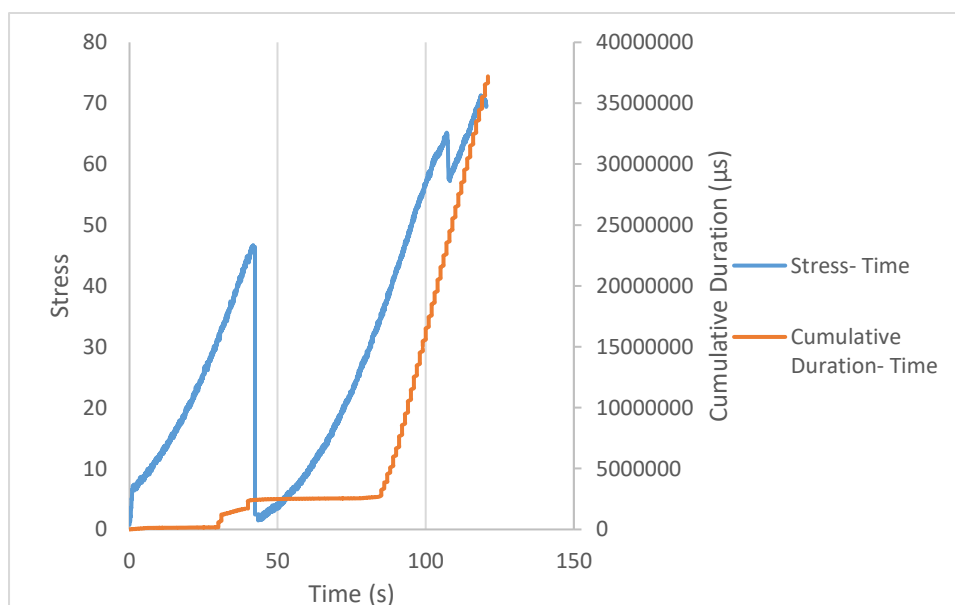


شکل ۱۰: نمودار تنش و تجمعی انرژی برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ گرانیت GUT6

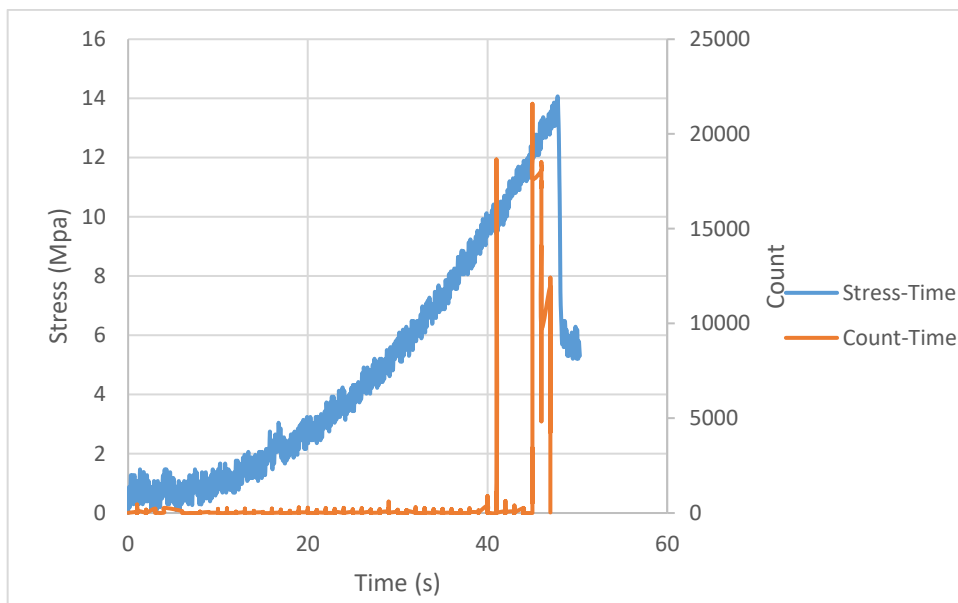




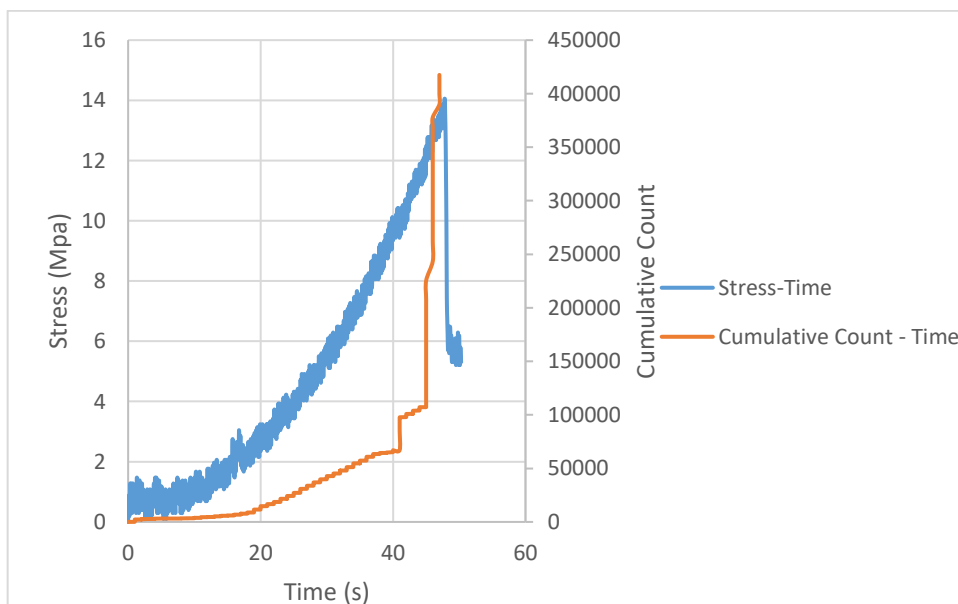
شکل ۱۱: نمودار تنش و مدت زمان دوام برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ گرانیت GUT<sub>6</sub>



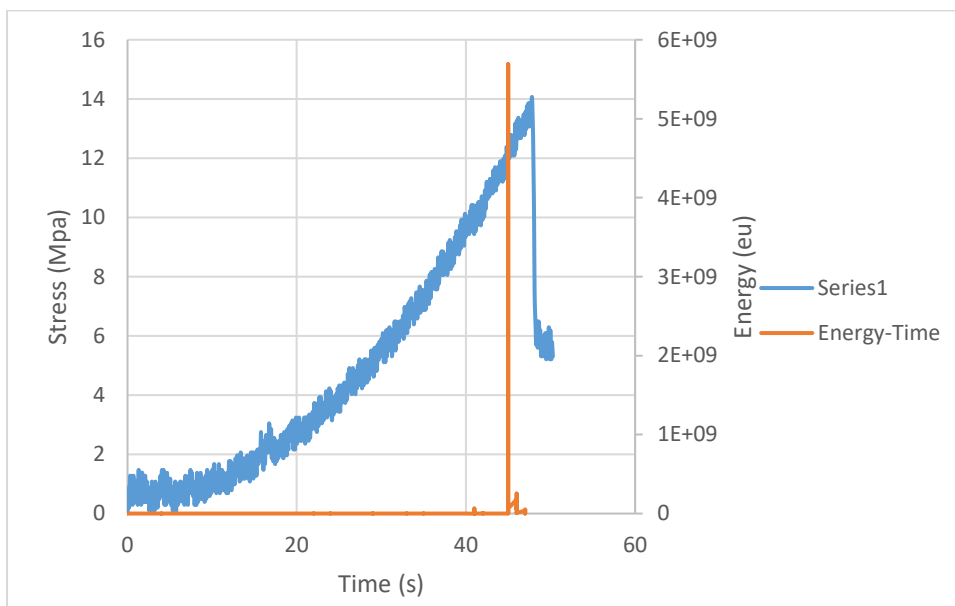
شکل ۱۲: نمودار تنش و تجمعی مدت زمان دوام برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ گرانیت GUT<sub>6</sub>



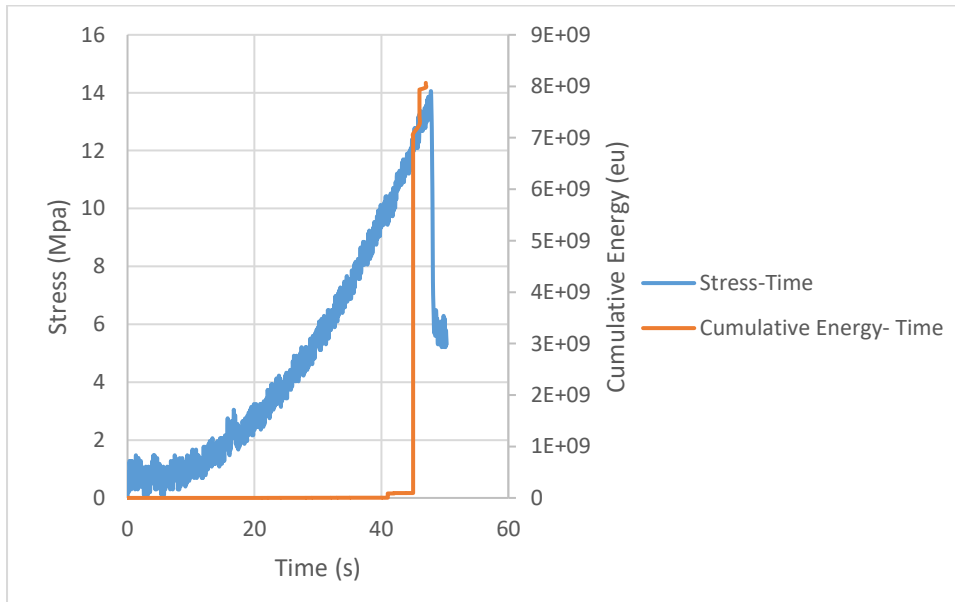
شکل ۱۳: نمودار تنش و شمارش برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ گرانیت GBT<sub>1</sub>



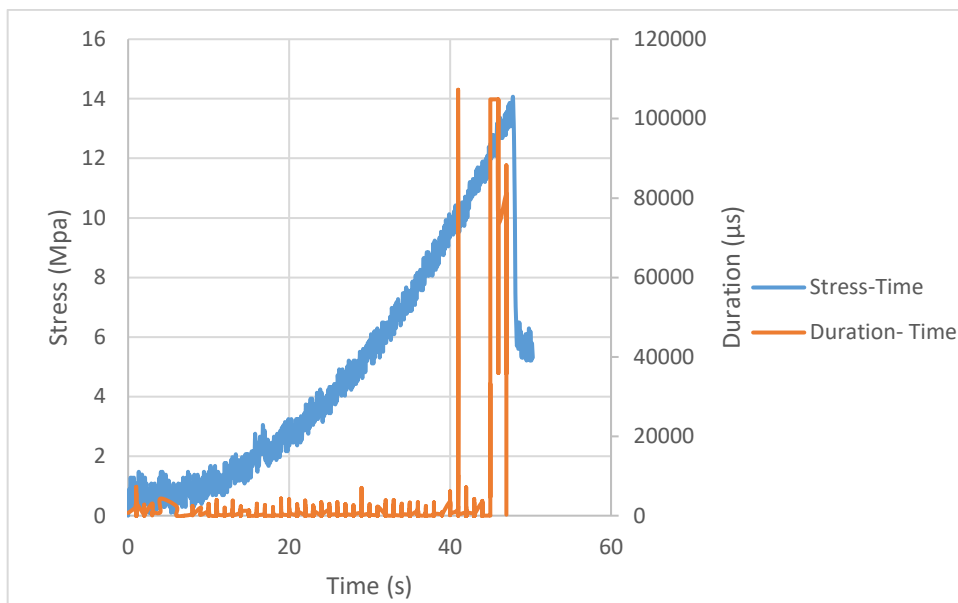
شکل ۱۴: نمودار تنش و تجمعی شمارش برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ گرانیت GBT<sub>1</sub>



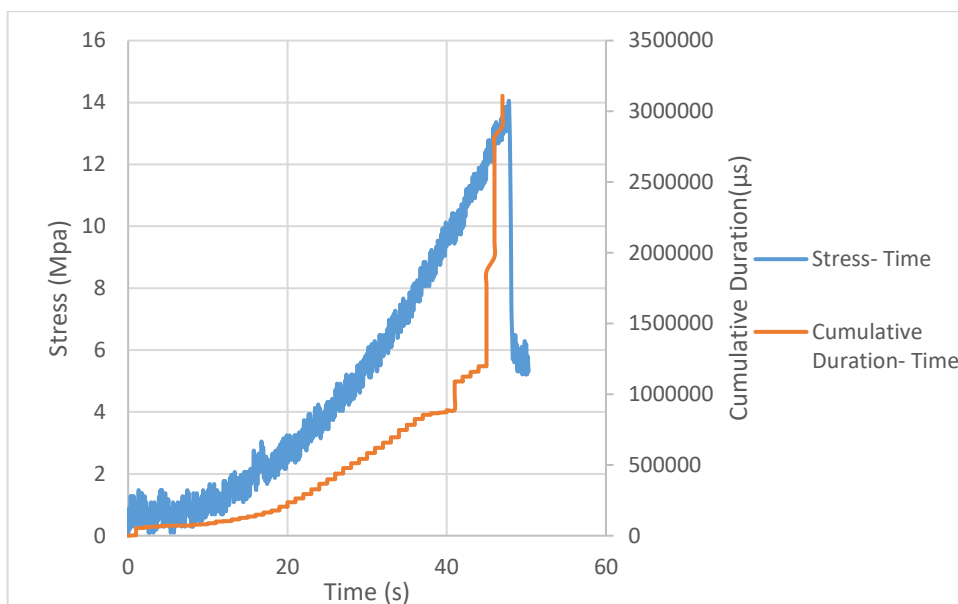
شکل ۱۵: نمودار تنش و انرژی برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ گرانیت<sub>۱</sub> GBT<sub>۱</sub>



شکل ۱۶: نمودار تنش و تجمعی انرژی برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ گرانیت<sub>۱</sub> GBT<sub>۱</sub>



شکل ۱۷: نمودار تنش و مدت زمان دوام برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ گرانیت<sub>۱</sub> GBT<sub>۱</sub>



شکل ۱۸: نمودار تنش و تجمعی مدت زمان دوام برحسب زمان در آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره سنگ گرانیت<sub>۱</sub> GBT<sub>۱</sub>

## Abstract

Various methods are able to investigate the fracture process and the process of rock deformation. One of these methods due to its unique features is a widespread application in the field of fracture mechanics is an acoustic emission method. When the rock is placed under load with the rapid release of energy high frequency transient elastic waves emanate from an internal rock source called the acoustic emission phenomenon. The acoustic emission occurs due to the growth of microstructures, pore porosity, displacement levels of microstructure and granular displacement. This phenomenon is widely used in stone engineering for the monitoring sustainability of underground spaces oil and gas shafts and so on. In rock mechanics this phenomenon is used in the development of microcracks and rock injury and destruction. Each wave emanating from a rock source has five parameters (count, energy, rise time, duration, amplitude). The acoustic emission phenomenon, like the stress-strain curve, investigate the process of rock failure, so there is a close relationship between this phenomenon and the stress on the stone. In this study, we tried to investigate the relationship between each acoustic parameter and damage and stone failure. Two samples stone of zeolite and granite were prepared for this purpose. Each of the samples was then subjected to single-axis and Brazilian tests with acoustic tests. After the data were taken, the diagram stress-time and diagrams of each of the acoustic parameters were plotted in time and then plotted in a three-axis graph of time in order to investigate the relationship between each acoustic parameter with damage and stone failure. According to diagrams, it was concluded that the acoustic parameters have a weak activity in the early stages of loading, and at the stage of stone damage, the microstructure are combined and from large cracks, they are maximized and can be count, energy, and duration parameters were used to analyze damage and rise time and amplitude parameters for analysis of the acoustic emission source.

Key words: acoustic emission, failure mechanics, damage, parametric analysis



Shahrood university of technology

Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

**Study on relation between acoustic emission parameters and  
evolution of rock failure and damage**

**Zakarya Rakhshani**

Supervisors:

**Dr. Majid Nikkhah**

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements for the Degree of  
Master of Science (M.Sc.) In Exploitation Mining Engineering

July 2019