

## (پژوهشی)

## پردازش سیگنال آزمایش انتشار آکوستیک در تعیین نقطه اثر کایزر سنگ‌ها با استفاده از تبدیل موجک گسسته

محمد مهدی دین محمدپور<sup>۱</sup>، مجید نیکخواه<sup>۲\*</sup>، کامران گشتاسبی<sup>۳</sup>، کاوه آهنگری<sup>۱</sup>

۱- گروه مهندسی معدن، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(دریافت: آذر ۱۴۰۰، پذیرش: اسفند ۱۴۰۰)

## چکیده

یکی از پارامترهای ژئومکانیکی که در طراحی و تحلیل مهندسی سنگ مختلف دارای اهمیت است، وضعیت تنش برجا توده سنگ است. در این ارتباط روش‌های اندازه‌گیری مستقیم و برجا، بهترین و دقیق‌ترین روش‌های اندازه‌گیری تنش ذاتی سنگ هستند، با این حال این روش‌ها بسیار گران، زمان‌بر و پرهزینه‌اند. از این رو، امروزه روش‌های غیرمستقیم و مبتنی بر مغزه سنگ برای تخمین تنش پیشین مورد توجه و مطالعه قرار گرفته‌اند. یکی از روش‌های آزمایشگاهی روش انتشار آکوستیک (آوایی) مبتنی بر اثر کایزر است. در این روش تعیین نقطه اثر کایزر به‌طور متداول توسط پارامترهای سیگنال‌های انتشار آکوستیک انجام می‌شود که در برخی موارد تعیین نقطه اثر کایزر به روش پارامتریک مبهم بوده و از وضوح کافی برخوردار نیستند. در این تحقیق پردازش سیگنال انتشار آکوستیک برای تعیین نقطه اثر کایزر داده‌های حاصل از آزمایش بر روی سنگ فیلیت توسط روش تبدیل موجک گسسته استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده بیان‌کننده این است که با توجه به پارامترهای ضریب همبستگی و نسبت نویز به سیگنال و نوع سیگنال‌های انتشار آکوستیک موجک مادر db6 برای تحلیل مناسب بوده است و در بین پارامترهای قابل‌استفاده برای تحلیل، پارامتر بیشینه ضریب تقریب نیز به‌عنوان ویژگی مناسب برای تحلیل انتخاب شد. همچنین نتایج حاصل از روش تبدیل موجک گسسته انطباق خوبی با نتایج حاصل از روش پارامتریک داشته است به‌طوری‌که زمان‌های رخداد اثر کایزر به‌دست‌آمده از دو روش به یکدیگر انطباق قابل قبولی دارند.

## کلمات کلیدی

انتشار آکوستیک، اثر کایزر، فیلیت، تبدیل موجک گسسته، تحلیل سیگنال

\*عهده‌دار مکاتبات: [madjid.nikkhah@gmail.com](mailto:madjid.nikkhah@gmail.com)

## ۱- مقدمه

به‌طور کلی سنگ‌ها و اغلب مواد زمانی که تحت تنش قرار می‌گیرند از خود صدا و سیگنال‌های لرزه‌ای با فرکانس زیاد ساطع می‌کنند. این پدیده انتشار آکوستیک نام دارد. در سال‌های اخیر به‌کارگیری روش انتشار آکوستیک که جزء آزمایش‌های غیر مخرب به حساب می‌آید رو به فزونی گذاشته است و این روش به‌طور کلی کاربرد زیادی در زمینه‌ی مهندسی معدن، عمران، علم مواد، زلزله‌شناسی و معدن یافته است. آزمایش انتشار آکوستیک یک روش با حساسیت زیاد برای دریافت این امواج در یک ماده بوده که از آن در زمینه‌های رفتار نگاری در مصالح جامد نظیر سنگ، فلز، شیشه و سرامیک که تحت تنش قرار دارند و نیز بررسی فرآیند شکست در این مواد استفاده می‌شود.

یکی از پدیده‌هایی که با استفاده از روش آزمایش انتشار آکوستیک قابل‌شناسایی است پدیده اثر کایزر است که از آن می‌توان برای تعیین تنش برجای سنگ بهره برد که البته در این مورد تحقیقات گسترده‌ای نیز انجام شده است. اثر کایزر اندازه‌گیری آسیب توسعه‌یافته در مواد تحت بارگذاری اولیه است که در اثر بارگذاری و باربرداری تک‌محوری متوالی مواد مشاهده می‌شود. در ساده‌ترین حالت، زمانی که مقدار تنش دومین سیکل بارگذاری از مقدار تنش قبلی تجاوز نماید، انتشار و فعالیت صوتی به شدت افزایش می‌یابد. در واقع پدیده اثر کایزر به صورت فقدان انتشار آکوستیک در سطوح پایین تراز تنش ماکزیمم اعمال‌شده قبلی تعریف می‌شود.

اثر کایزر توسط ژوزف کایزر، یک پژوهشگر آلمانی، زمانی که او آزمایش‌هایی را بر روی نمونه‌های کوچک فلز، چوب و ماسه‌سنگ در سال ۱۹۵۰ انجام داد کشف شد و اکنون نیز به نام او این پدیده شناخته می‌شود [۱]. در سال ۱۹۹۳، لی و نوردلاند مطالعه‌ای آزمایشگاهی بر روی اثر کایزر در سنگ‌ها انجام دادند. آنها از آزمایش تک‌محوره استفاده کردند و ۶۱ نمونه گرانیته‌ی و نمونه‌های دیگر را مورد آزمایش قرار دادند. آنها تأثیر زمان تأخیر بین سیکل‌های بارگذاری و زمان توقف بر روی اثر کایزر را بررسی نمودند. نتایج حاصل نشان داد که بیشتر سنگ‌ها به‌جز برخی از کانه‌های آهن، اثر کایزر را قبل از میزان باری نزدیک به مقاومت سنگ نشان دادند. همچنین نشان داده شد که زمان تأخیر بین سیکل‌ها و زمان توقف تأثیر

چندانی بر اثر کایزر ندارد [۲]. برنامه‌های تحقیقاتی پیوسته‌ای در خصوص اثر کایزر در تعدادی از دانشگاه‌های ژاپنی، دانشگاه توهوکو (کوجیما و ماتسوکا در سال ۱۹۹۰) و دانشگاه توکیو (یوشیکاوا و موگی در سال ۱۹۸۹) انجام شده است [۳]. پستمن و همکاران در سال ۱۹۹۶، پیشنهاد کردند که پس از آزمایش‌های انتشار آکوستیک بر روی نمونه‌های بارگذاری شده سه‌محوره توسط فشارهای مختلف بارگذاری، تعیین تنش‌های اصلی با استفاده از نقطه اوج و رأس بر روی صفحه آسیب امکان‌پذیر است [۴]. در سال ۱۹۹۳، استوارت و همکاران تأثیرات حافظه تنش را بر روی سنگ‌های ناهمسانگرد و تحت بارگذاری تنش تک‌محوره مورد بررسی قرار دادند [۵]. ستو و ویلاسکوزا در سال ۱۹۹۷ از روش انتشار آکوستیک جهت تعیین میزان تنش برجا در معدنی در استرالیا استفاده کرده و نتایج را با نتایج حاصل از روش بیش‌مغزه‌گیری مقایسه نمودند [۶]. چن و همکاران در سال ۲۰۰۶ وابستگی جهت‌دار اثر کایزر را در گرانیته به‌طور عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند [۷]. کایریازیس و همکاران در سال ۲۰۰۶ نشان دادند که انتخاب موجک مادر مناسب از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است که نه تنها انتخاب در بین انواع گروه‌های موجک بلکه انتخاب یک موجک از یک گروه خاص بر روی تحلیل اثرگذار خواهد بود [۸]. ژائو و همکاران در سال ۲۰۰۸ از تکنیک‌های تحلیل موجک برای حذف نویز در آزمایش انتشار آکوستیک جهت بررسی اثر کایزر استفاده کردند. آنها از موجک db4 برای حذف نویزها استفاده کردند. آنها با استفاده از تحلیل فرکتال پارامترهای انتشار آکوستیک، خصوصیات فرکتالی انرژی انتشار آکوستیک در نقطه اثر کایزر و اطراف آن را مورد تحلیل قرار دادند و در نهایت نقطه اثر کایزر را به دست آوردند [۹]. نیکخواه و همکاران در سال ۲۰۱۱ با استفاده از روش‌های شناسایی الگو اثر کایزر را تعیین کردند [۱۰]. ساگار و همکاران در سال ۲۰۱۵ کاربرد اثر کایزر در ارزیابی آسیب در بتن مسلح را مورد ارزیابی قرار دادند [۱۱]. کائو و همکارانش در سال ۲۰۱۹ تأثیر نرخ بارگذاری استاتیک و دینامیک بر روی آسیب سنگ را با توجه به خصوصیات انتشار آکوستیک مورد مطالعه قرار دادند [۱۲]. لو و همکاران در سال ۲۰۱۹ تأثیر خصوصیات انتشار آکوستیک را بر روی آسیب سنگ مورد بررسی قرار دادند [۱۳]. گجت و همکاران در سال ۲۰۲۰ ارتباط بین کرنش و اثر کایزر را

قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. تاکنون تحقیقات مختلفی بر روی استفاده از روش‌های پردازش سیگنال مبتنی بر تبدیلات ریاضی به‌منظور تحلیل سیگنال‌های انتشار آکوستیک صورت گرفته است اما به‌منظور تعیین اثر کایزر تحقیقات بسیار محدودی صورت گرفته است. نوآوری این تحقیق استفاده از روش پردازش سیگنال انتشار آکوستیک مبتنی بر تبدیل موجک برای تعیین نقطه اثر کایزر در سنگ است. چندین پژوهش محدود در این مورد انجام شده است که در آن از تبدیل موجک برای حذف نویز استفاده شده است و نقطه اثر کایزر با استفاده از روش بعد فراکتال به‌دست آمده است [۹-۸]. در تحقیق حاضر از تبدیل موجک برای استخراج ویژگی استفاده شده و سپس پارامتر مناسب با استفاده از روش خوشه‌بندی به چند خوشه تقسیم‌شده و با توجه به مکانیسم وقوع اثر کایزر، نقطه اثر کایزر به‌دست آمده است.

#### ۱-۱- تبدیل موجک گسسته

تبدیل موجک کاربردهای وسیعی در تجلیل سیگنال‌های ایستا و غیر ایستا دارد. این کاربردها عبارت‌اند از حذف نویز از سیگنال‌ها، فشرده‌سازی حجم زیاد داده‌ها و غیره. با استفاده از تبدیل موجک یک سیگنال را می‌توان به گروهی از سیگنال‌ها یا سری‌های زمانی تقسیم کرد. برخلاف سایر تبدیلات ریاضی از قبیل تبدیل فوریه و تبدیل فوریه کوتاه‌مدت، تبدیل موجک قابلیت تحلیل هم در حوزه زمان و هم حوزه فرکانس را به‌طور هم‌زمان دارا است [۲۵]. تبدیل موجک گسسته به‌منظور تجزیه یک سیگنال به مجموعه‌ای از ضرایب مورد استفاده قرار می‌گیرد. تبدیل موجک گسسته می‌تواند خصوصیات غیر ایستای یک سیگنال را نمایش دهد. برای یک موجک مادر و تراز تجزیه  $j$ ، تبدیل موجک گسسته برای سیگنال  $f(t)$  عبارت است از [۲۶]:

$$W_f(j, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{j,k}^*(t) dt \quad (1)$$

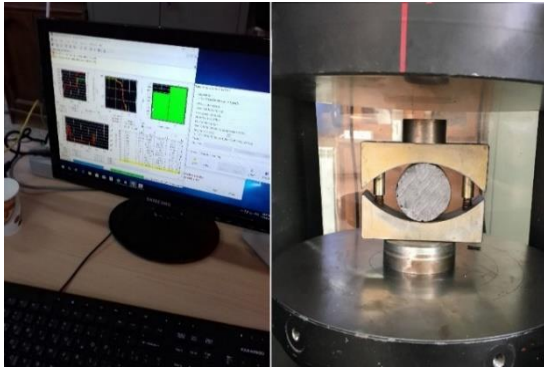
$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \psi(a_0^{-j} t - b_0 k) \quad (2)$$

که در آن  $a_0$  و  $b_0$  مقادیری ثابت هستند و  $k$  فاکتور تبدیل زمان است.  $\psi^*(j, k)$  مزدوج مختلط است و  $W_f(j, k)$  ضریب موجک گسسته در تراز  $j$  است.

در سنگ‌های ترد مورد بررسی قرار دادند [۱۴]. ژیانگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ خصوصیات انتشار آکوستیک مربوط به شکست هیدرولیکی را مورد مطالعه قرار دادند [۱۵]. ستو و همکاران در سال ۲۰۲۰ گسترش ترک در توده سنگ را با استفاده از روش انتشار آکوستیک و در آزمایشگاه مورد بررسی قرار دادند [۱۶]. چن و همکاران در سال ۲۰۲۱ تأثیر زاویه درزه را بر روی خصوصیات انتشار آکوستیک مربوط به توده سنگ مورد مطالعه قرار دادند [۱۷]. کینگ و همکاران در سال ۲۰۲۱ امواج انتشار آکوستیک به‌دست‌آمده در طی آزمایش تغییر شکل سنگ را با استفاده از شبکه عصبی مورد مطالعه قرار دادند [۱۸]. لیو همکاران در سال ۲۰۲۱ فرآیند شکست سنگ را با رفتار نگاری خصوصیات انتشار آکوستیک و فعالیت‌های میکرو لرزه‌ای مورد بررسی قرار دادند [۱۹]. ونگ و همکاران در سال ۲۰۲۱ فرآیند گسترش ترک را با استفاده از انتشار آکوستیک و تحت بارگذاری تک‌محوره مورد ارزیابی قرار دادند. آنها بیان کردند که وضعیت تنش ذرات سنگ نوع و جهت گسترش ترک‌ها را ارائه می‌دهد [۲۰] ونگ و همکاران (۲۰۲۱) مکانیزم شکست و گسترش ترک در سنگ را با استفاده از انتشار آکوستیک مورد بررسی قرار دادند [۲۱]. ژو و همکاران در سال ۲۰۲۱ مکانیزم شکست میکروسکوپی را برای سنگ‌های تحت بارگذاری برزیلی دینامیکی مبتنی بر خصوصیات انتشار آکوستیک مورد تحلیل قرار دادند [۲۲]. خرقانی و همکاران در سال ۲۰۲۱ با انجام مطالعات آزمایشگاهی تأثیر زاویه ناهمسانگردی را بر روی تعیین اثر کایزر بررسی کردند [۲۳]. دین محمدپور و همکارانش در سال ۲۰۲۲ از تبدیل موجک پیوسته و پارامتر فرکانس پیک نقطه اثر کایزر را تعیین کردند [۲۴]. روش‌های مختلفی برای تعیین نقطه اثر کایزر وجود دارد، با این وجود در عمل موارد زیادی وجود دارند که در آنها اثر کایزر به‌وضوح قابل تشخیص نبوده و یا تعیین آن با روش‌های متداول دشوار است. یکی از مهم‌ترین مزایای روش پردازش سیگنال قابلیت تمیز دهی بین سیگنال اصلی و نویز بر اساس شکل موج است، زیرا شکل موج بعد از اندازه‌گیری همچنان قابل دسترسی است و مانند آنچه در روش پارامتریک رخ می‌دهد پاک نمی‌شود. همچنین این امکان وجود دارد که از روش‌های مختلف تحلیل سیگنال و نرم‌افزارهای مربوطه استفاده کرد. در صورت استفاده از روش‌های سیگنال محور، اعتبار تفسیر داده‌ها به‌طور

## ۲- مواد و روش‌ها

تمامی نمونه‌های این تحقیق از جنس سنگ فیلیت است که از غرب ایران برداشت شده‌اند. این نمونه‌ها برای آزمایش برزیلی آماده شده‌اند. ابعاد نمونه برزیلی دارای قطر ۵۳ تا ۵۳/۴ و نسبت ارتفاع به قطر بین ۰/۴۵ تا ۰/۵۵ است. سیستم بارگذاری و سیستم انتشار آکوستیک در شکل ۲ نشان داده شده است.



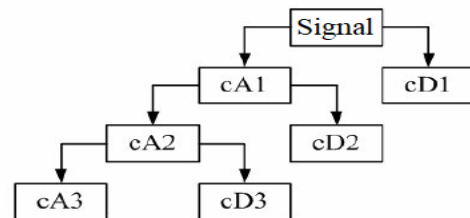
شکل ۲: سیستم بارگذاری و سیستم ثبت داده‌های انتشار آکوستیک

دستگاه مورد استفاده در این آزمایش جهت بارگذاری نمونه‌ها یک دستگاه اعمال بار به صورت فشاری ساخت شرکت کنترلز ایتالیا است. دستگاهی که برای انجام آزمون انتشار آکوستیک مورد استفاده قرار گرفته، سیستم انتشار آکوستیک AMSY-6 است که ساخت شرکت Vallen System GmbH از کشور آلمان است. سنسورها دارای محدوده‌ی فرکانس رزونانس ۱۵۰ کیلوهرتز است. در ابتدا با انجام آزمایش‌های برزیلی بر روی نمونه‌ها، میزان مقاومت کششی هر نمونه تعیین و سپس میزان پیش بارگذاری به صورت درصدی از مقاومت نهایی در نظر گرفته شد. آزمایش‌های برزیلی طبق استاندارد ISRM انجام شده است. آزمایش‌های آکوستیک نیز تحت بارگذاری برزیلی انجام شده است. آزمایش طی دو سیکل صورت گرفته است. در سیکل اول بار بر روی نمونه تا میزان تعیین شده به عنوان پیش بارگذاری اعمال می‌شود. پس از آن باربرداری تا رسیدن به نقطه صفر صورت گرفته و سپس بارگذاری مجدد تا رسیدن به نقطه شکست صورت می‌گیرد. سنسورهای انتشار آکوستیک بین سیکل‌ها مجدداً نصب نمی‌شوند. این به ما اجازه می‌دهد تا شرایط نصب سنسور بر روی نمونه سنگ در سیکل اول و دوم یکسان باشد. معمولاً وقتی سنسور مجدداً در یک موقعیت جدید نصب می‌شود، شرایط نصب

در سال ۱۹۸۹ ملات یک الگوریتم تجزیه و بازسازی موجک سریع را معرفی نمود که تبدیل موجک گسسته نامیده می‌شود [۲۷]. ایده این ابداع، توسعه یک الگوریتم فیلترینگ بود که تبدیل موجک سریع را ارائه می‌دهد. در تبدیل موجک گسسته، پارامتر مقیاس  $a$  و پارامتر موقعیت  $b$  به صورت رابطه (۳) نوشته می‌شود:

$$a = 2^j, b = k2^j, (j, k) \in Z^2 \quad (3)$$

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، هدف از تبدیل موجک تجزیه سیگنال اصلی به یک سری از تقریب‌ها (A) و جزئیات (D) است که بر روی فرکانس‌های باندهی مختلف توزیع شده است که خصوصیات حوزه زمان و حوزه فرکانس را حفظ می‌کند. درخت تجزیه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: درخت تجزیه در روش تبدیل موجک

تبدیل موجک با نوع عملکرد خود تا حد زیادی مشکل رزولوشن را حل می‌کند. دو تفاوت بین تبدیل موجک و تبدیل فوریه کوتاه‌مدت وجود دارد [۲۸]:

۱. تبدیل‌های فوریه برای سیگنال‌های پنجره‌ای شده گرفته نمی‌شود و به همین علت نقطه اوج منفرد مربوط به سیگنال سینوسی مشاهده خواهد شد، یعنی فرکانس‌های منفی محاسبه نمی‌شود.
۲. هنگامی که تبدیل برای هر مؤلفه طیفی منفرد محاسبه می‌شود، عرض پنجره تغییر می‌کند که شاید مهم‌ترین خصوصیت تبدیل موجک باشد.

با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین این مزایا کاربرد تبدیل موجک در پردازش سیگنال‌های غیر ایستا است. با توجه به اینکه سیگنال‌های انتشار آکوستیک از نوع غیر ایستا می‌باشند به همین دلیل از تبدیل موجک استفاده شد؛ بنابراین تبدیلات موجک پاسخ‌های مناسب‌تری نسبت به تبدیلات فوریه و تبدیلات فوریه کوتاه‌مدت ارائه می‌کند.

سوم شکل ۳ مشاهده می‌شود تا قبل از زمان ۳۱/۳ ثانیه تغییری در داده آکوستیک رخ نداده است. در زمان ۳۱/۳ ثانیه به یکباره افزایش در میزان پارامترهای آکوستیک اتفاق می‌افتد که بیانگر رخداد اثر کایزر در این زمان است. تنش معادل این زمان برابر با ۴/۳ مگا پاسکال است که برابر با تنش اثر کایزر در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین نسبت فلیسیتی برابر با ۱/۱۷ خواهد بود.

شکل ۴ مربوط به نمونه QP2 است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمونه در سیکل اول تا ۳/۲ مگا پاسکال و در سیکل دوم تا بیش از ۹/۳ مگا پاسکال که همان نقطه شکست نمونه است مورد بارگذاری قرار می‌گیرد. با توجه به نمودارهای زمان خیز و زمان استمرار تا قبل از زمان ۱۲۳/۶ ثانیه فقدان افزایش در پارامتر آکوستیک مشاهده می‌شود و ناگهان در این زمان میزان پارامتر آکوستیک افزایش چشمگیری دارد. در این نقطه از زمان اثر کایزر رخ داده است و تنش معادل آن برابر با ۶/۳ مگا پاسکال است.

در شکل ۵ در زمان ۴۶/۵ ثانیه افزایش ناگهانی در میزان پارامترهای زمان خیز و زمان استمرار مشاهده می‌شود. در این زمان که مربوط به نمونه QP3 است اثر کایزر رخ داده است که تنش معادل آن برابر با ۷/۱ مگا پاسکال است و با توجه به میزان پیش بارگذاری ۵/۷ مگا پاسکال در سیکل اول، میزان نسبت فلیسیتی برابر با ۱/۲۵ تعیین شد.

همان‌طور که در شکل‌های ۳ تا ۵ مشاهده می‌شود، داده‌های آکوستیک در سیکل اول نیز وجود دارند. علت این مسئله آن است که سیکل اول معمولاً بیشتر شامل بسته شدن ترک‌هایی است که از قبل در نمونه سنگی موجود بوده است و این اتفاق موجب رخدادهای انتشار آکوستیک می‌شود. البته همان‌طور که مشاهده می‌شود، پارامترهای آکوستیک مربوط به سیکل اول به‌خصوص در مقایسه با سیکل دوم بسیار ناچیز هستند. همچنین در نزدیکی نقطه شکست میزان پارامترهای آکوستیک به‌شدت افزایش می‌یابد. این مسئله ارتباط با شکست‌های بزرگ و با تعداد زیاد و درنهایت گسیختگی نمونه سنگ دارد.

تغییر می‌کند که امکان مقایسه بین مقادیر قطعی فعالیت انتشار آکوستیک در سیکل‌های بارگذاری مختلف وجود ندارد. در جدول ۱ خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه سنگ فیلیت ارائه شده است. با انجام چندین آزمایش و با توجه به نتایج حاصل از آنها، میزان حد آستانه برای آزمایش‌های انتشار آکوستیک برابر با ۴۵ دسی‌بل صورت گرفت.

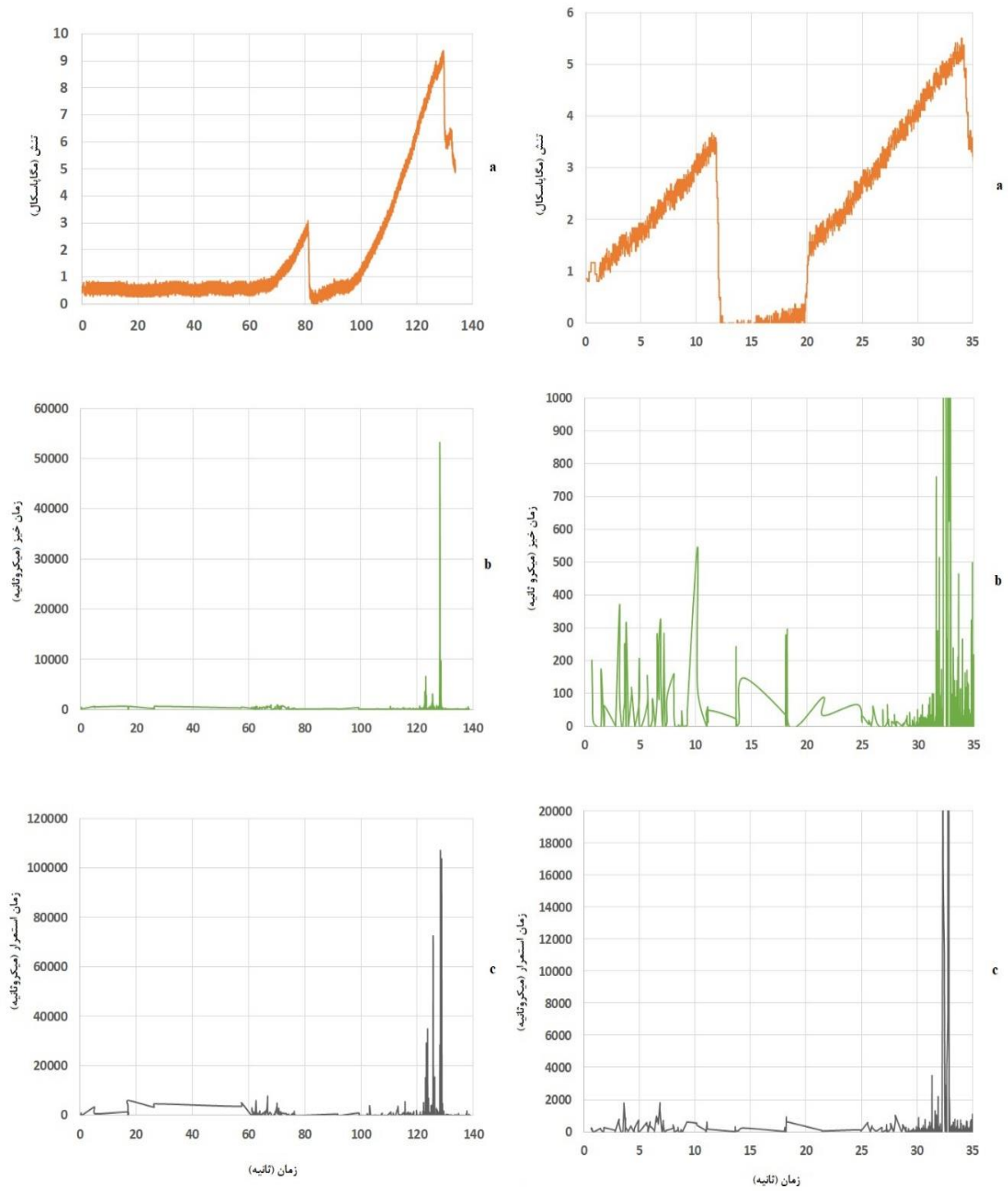
جدول ۱: خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه سنگ فیلیت

فیلیت	جنس سنگ
۱۱۲	مقاومت فشاری تک‌محوره (مگا پاسکال)
۱۱	مقاومت کششی (برزیلی) (مگا پاسکال)
۳/۳	چسبندگی (مگا پاسکال)
۳۷/۶	زاویه اصطکاک (درجه)
۰/۲۴	نسبت پواسون
۴۳/۵۷	مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)

### ۳- نتایج و بحث

در ابتدا داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش انتشار آکوستیک به روش پارامتریک مورد تحلیل قرار گرفت. در هر نقطه زمانی که پارامترهای آکوستیک شروع به افزایش می‌کنند یا افزایش ناگهانی در آن نقطه زمانی رخ دهد، آن نقطه به‌عنوان نقطه رخداد اثر کایزر در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای متعددی برای تعیین نقطه اثر کایزر مورد استفاده قرار می‌گیرد که از آن جمله می‌توان به انرژی، کانت، زمان استمرار، نقطه خیز، دامنه و RMS اشاره کرد. پارامترهای مورد استفاده در این تحقیق زمان خیز و زمان استمرار می‌باشند. زمان خیز عبارت است از فاصله زمانی اولین برخورد سیگنال با حد آستانه و ماکزیمم دامنه سیگنال و زمان استمرار عبارت است از فاصله زمانی اولین و آخرین برخورد سیگنال با حد آستانه.

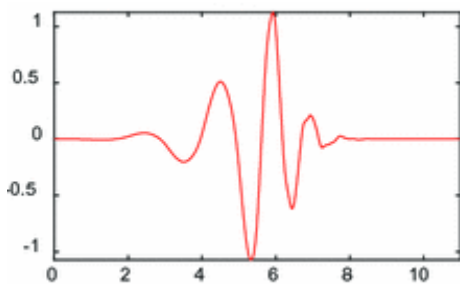
در قسمت اول شکل ۳ مشاهده می‌شود که نمونه QP1 تا تنش ۳/۷ مگا پاسکال مورد پیش بارگذاری قرار می‌گیرد و پس از باربرداری، در سیکل دوم، بارگذاری تا شکست نمونه ادامه می‌یابد. در تمام طول آزمایش داده‌های آکوستیک نیز ثبت می‌شود. همان‌طور که در قسمت دوم و



شکل ۴: نمودار بارگذاری، زمان خیز و زمان استمرار برای نمونه QP2

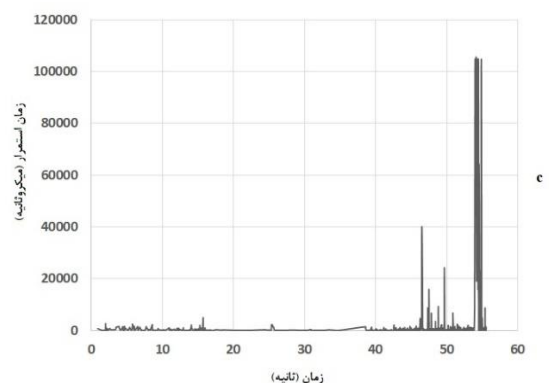
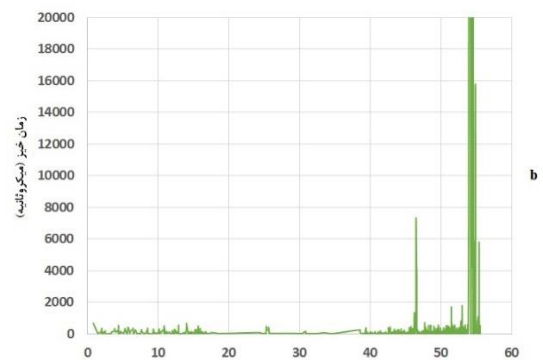
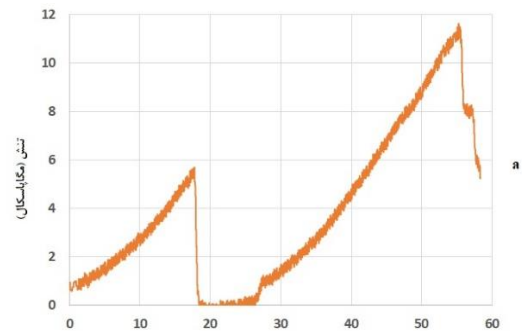
شکل ۳: نمودار بارگذاری، زمان خیز و زمان استمرار برای نمونه QP1

شکل امواج به‌دست‌آمده توسط دستگاه ثبت داده‌های آکوستیک وارد نرم‌افزار شده و مورد تحلیل قرار گرفت. برای این منظور از تبدیل موجک گسسته استفاده شد. هر نمونه شامل چندین هیت است که تبدیل موجک گسسته بر روی تمامی هیت‌ها اعمال شد. در این تحقیق چندین موجک مادر مورد آزمایش قرار گرفت که در نهایت با توجه به خصوصیات از قبیل تقارن و تعامد و همچنین نوع سیگنال‌های غیر ایستای آکوستیک و استفاده از پارامترهای ضریب همبستگی و نسبت نویز به سیگنال، برای اعمال تبدیل موجک گسسته موجک مادر db6 به‌عنوان موجک مادر مناسب انتخاب شد و تبدیل موجک تا ۶ سطح ادامه یافت. سپس نسبت به استخراج ویژگی اقدام شد. شکل موج مادر db6 در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: موجک مادر db6

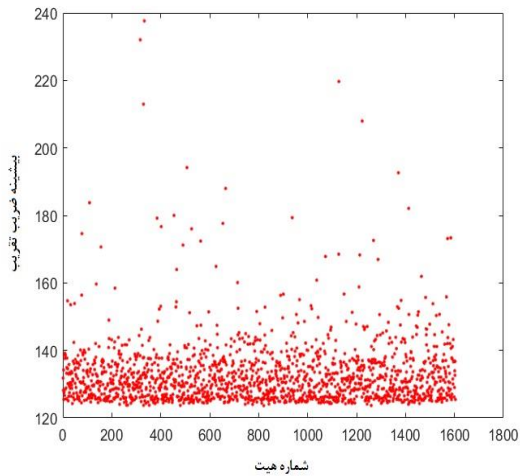
در بین ویژگی‌های مختلف آماری از قبیل بیشینه، میانگین، انحراف معیار که بر روی مقادیر ضریب تقریب و ضریب جزئیات اعمال گردید، بیشینه ضریب تقریب به‌عنوان پارامتر مناسب تعیین شد. در شکل‌های ۷ تا ۹ نمونه‌هایی از تبدیل موجک گسسته انجام‌شده بر روی نمونه‌های مورد آزمایش نشان داده شده است. در شکل ۷ تبدیل موجک اعمال‌شده بر روی هیت شماره ۳۲۸ نمونه QP1 نشان داده شده است. همچنین در شکل ۸ و ۹ به ترتیب تبدیل موجک اعمال‌شده بر هیت ۳۵۰ مربوط به نمونه QP2 و هیت ۸۴۴ مربوط به نمونه QP3 نشان داده شده است. در تمامی این شکل‌ها قسمت اول سیگنال (هیت) اصلی به‌دست‌آمده از دستگاه انتشار آکوستیک را نشان می‌دهد. قسمت دوم تا هفتم میزان ضریب جزئیات را از سطح ۱ تا سطح ۶ به نمایش می‌گذارد و قسمت آخر ضریب تقریب را نشان می‌دهد که همان‌طور که در بالا اشاره شد، میزان بیشینه این ضریب به‌عنوان پارامتر مناسب



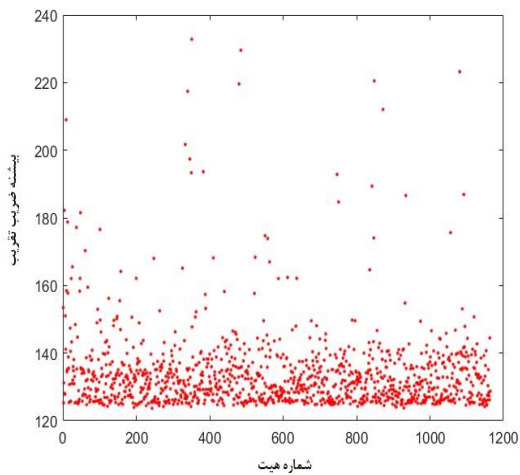
شکل ۵: نمودار بارگذاری، زمان خیز و زمان استمرار برای نمونه QP3

با توجه دقیق‌تر به نمودار پارامتریک به این نکته نیز می‌توان اشاره نمود که پیش بارگذاری‌های بیش از ۵۰ درصد مقاومت کششی در نمونه‌های QP1 و QP3 موجب شده است وضوح اثر کایزر بیشتر باشد و نسبت فلیسیته نزدیک‌تر به یک به دست آید ولی در مورد نمونه QP2 با توجه به اینکه میزان پیش بارگذاری چیزی کمتر از ۳۰ درصد مقاومت نهایی موجب شده است تا نسبت فلیسیته برای این نمونه نزدیک به ۲ به دست آید.

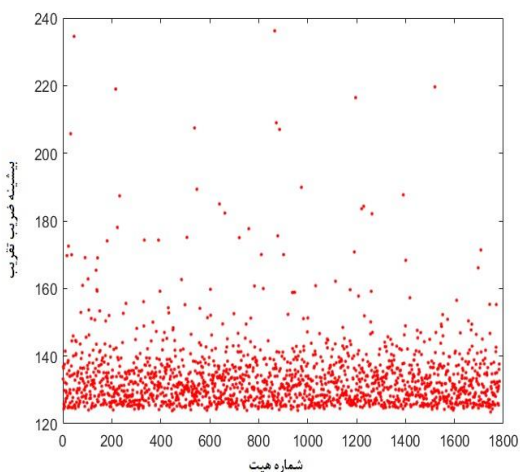
به‌منظور تحلیل سیگنال موردبررسی قرار گرفت. مقادیر بیشینه ضریب تقریب مربوط به تمامی هیت‌ها برای نمونه‌های QP1، QP2 و QP3، به ترتیب در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، تعداد هیت‌های ثبت‌شده برای نمونه‌های مختلف با توجه به زمان انجام آزمایش متفاوت است. به‌عنوان مثال برای نمونه QP1 تعداد ۱۶۰۰ هیت و برای نمونه‌های QP2 و QP3 به ترتیب تعداد ۱۱۶۰ هیت و ۱۸۰۰ هیت ثبت شده است.



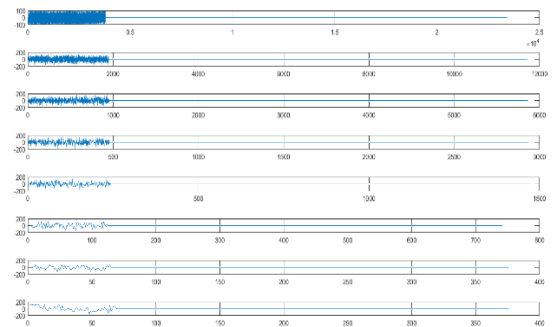
شکل ۱۰: مقادیر بیشینه ضریب تقریب برای نمونه QP1



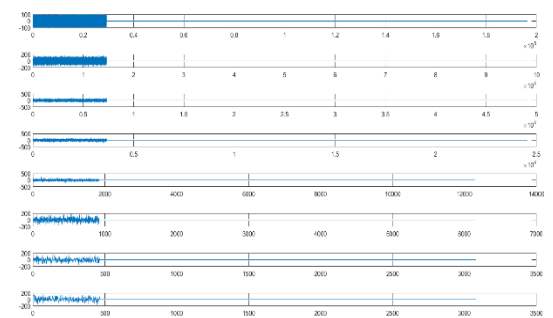
شکل ۱۱: مقادیر بیشینه ضریب تقریب برای نمونه QP2



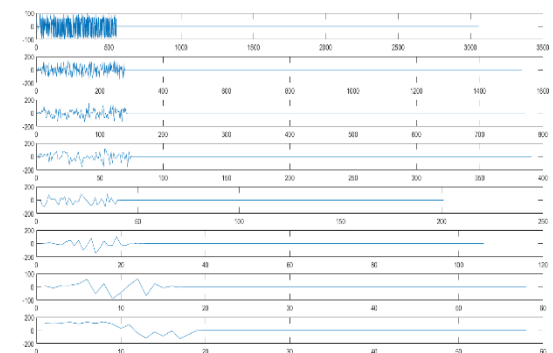
شکل ۱۲: مقادیر بیشینه ضریب تقریب برای نمونه QP3



شکل ۷: ضرایب تقریب و جزئیات برای هیت شماره ۳۲۸ از نمونه QP1

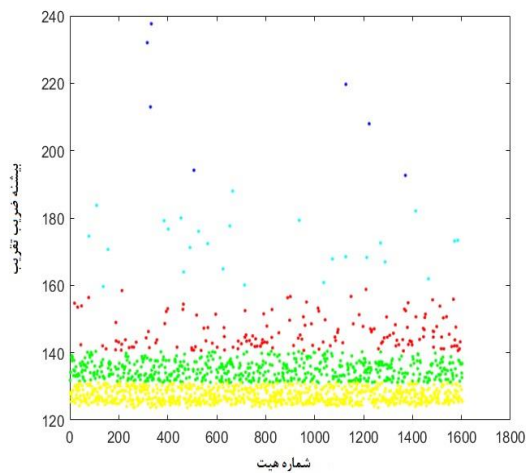


شکل ۸: ضرایب تقریب و جزئیات برای هیت شماره ۳۵۰ از نمونه QP2

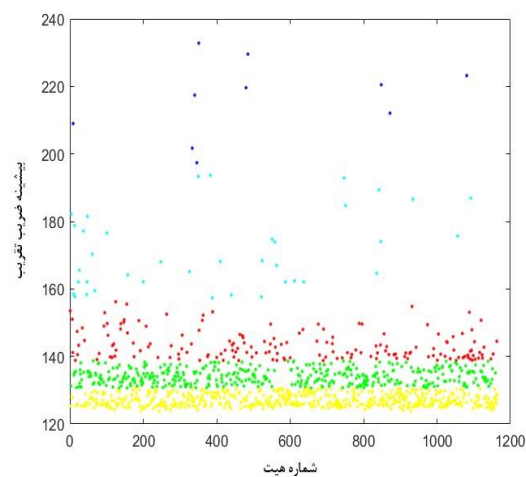


شکل ۹: ضرایب تقریب و جزئیات برای هیت شماره ۸۴۴ از نمونه QP3

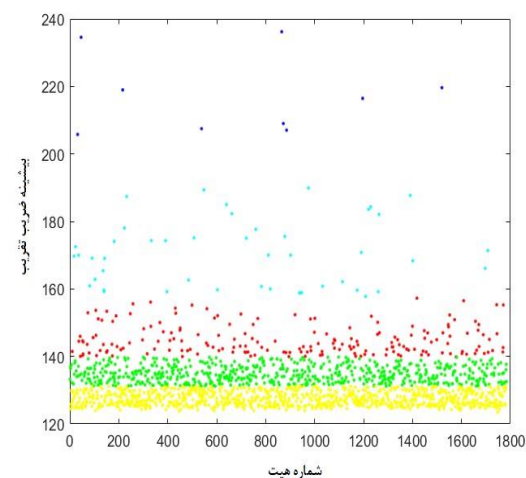




شکل ۱۳: مقادیر بیشینه ضریب تقریب خوشه‌بندی شده برای نمونه QP1



شکل ۱۴: مقادیر بیشینه ضریب تقریب خوشه‌بندی شده برای نمونه QP2

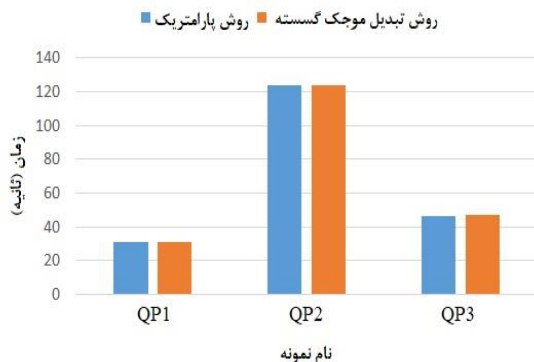


شکل ۱۵: مقادیر بیشینه ضریب تقریب خوشه‌بندی شده برای نمونه QP3

با استفاده از خوشه‌بندی به روش K-means ضرایب به‌دست‌آمده به ۵ محدوده مختلف طبقه‌بندی شد. علت استفاده از خوشه‌بندی اهمیت داده‌های با ضرایب بالا است. در نظر گرفتن تمامی داده‌ها از کمترین مقدار تا بیشترین مقدار موجب گمراهی در تحلیل می‌شود. این مطلب ارتباط مستقیم با مکانیزم رخداد اثر کایزر و به دنبال آن منابع رخدادهای انتشار آکوستیک دارد. با توجه به انتقال داده‌های سیگنال از حوزه زمان به حوزه فرکانس و از سوی دیگر با توجه به مکانیزم رخداد اثر کایزر که بیانگر رخداد این پدیده در فرکانس‌های بالا است [۲۹]. به همین علت محدوده پنجم بیشینه ضریب تقریب که منطبق با فرکانس‌های بالا است برای تحلیل مورد توجه قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود ۵ محدوده طبقه‌بندی شده برای نمونه QP1 به ترتیب عبارت‌اند از: محدوده اول ۱۲۰ تا ۱۳۰ به رنگ زرد، محدوده دوم ۱۳۰ تا ۱۴۰ به رنگ سبز، محدوده سوم ۱۴۰ تا ۱۶۰ به رنگ قرمز، محدوده چهارم ۱۶۰ تا ۱۹۰ به رنگ آبی و محدوده پنجم ۱۹۰ تا ۲۴۰ به رنگ بنفش. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود تراکم در ضرایب با مقدار کم، بیشتر و در ضرایب با مقدار زیاد، کمتر است. در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مقادیر بیشینه ضریب تقریب خوشه‌بندی شده به ترتیب برای نمونه‌های QP2 و QP3 نشان داده شده است.

در این پژوهش به منظور تعیین نقطه اثر کایزر از پارامتری تحت عنوان چگالی داده‌ها استفاده شده است. به این مفهوم که زمان آزمایش به بازه‌های شامل ۲۵ هیت تقسیم شده است. علت انتخاب پارامتر چگالی داده‌ها این است که در زمان رخداد اثر کایزر نرخ هیت، یعنی تعداد سیگنال‌هایی که در یک بازه زمانی خاص دریافت می‌شود زیاد است. مشاهده می‌شود که تراکم نقاط در ضرایب کم بیشتر است و این به علت نوع ترک‌ها و به دنبال آن نوع سیگنال آکوستیکی است که دستگاه آکوستیک در اثر ایجاد این ترک‌ها دریافت می‌کند. پس از انجام خوشه‌بندی و به دست آوردن محدوده‌های پنج‌گانه برای مقادیر بیشینه ضریب تقریب، با توجه به مکانیزم رخداد اثر کایزر و مؤثر بودن ایجاد و گسترش ترک در نمونه در این مکانیزم، توجه به مقادیر بیشینه ضریب تقریب در بالاترین محدوده تحلیل مناسبی به منظور تعیین نقطه اثر کایزر ارائه خواهد کرد.

تعیین شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اختلاف نتایج به‌دست‌آمده از روش پارامتریک و روش تبدیل موجک گسسته بسیار ناچیز بوده و به دنبال آن اختلاف تنش اثر کایزر و نسبت فلیسیتی به‌دست‌آمده از دو روش قابل‌چشم‌پوشی است. در شکل ۱۷ نیز تنش اثر کایزر به‌دست‌آمده از روش پارامتریک و روش تبدیل موجک گسسته با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۱۶: مقایسه زمان‌های به‌دست‌آمده برای نقطه اثر کایزر در روش پارامتریک و روش موجک گسسته

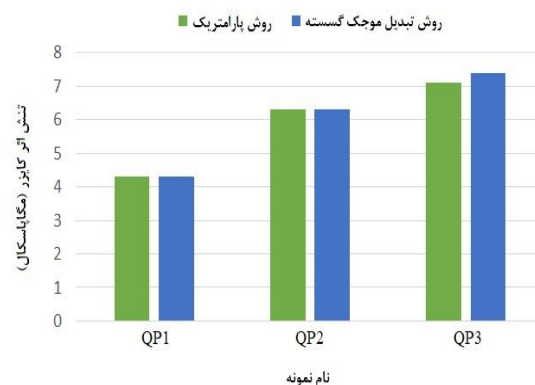
با توجه به شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ مشاهده می‌شود که تراکم نقاط برای نمونه‌های QP1، QP2 و QP3 به ترتیب در محدوده هیتهای شماره ۳۵۰، ۳۵۰ و ۸۵۰ بیشترین مقدار خود را دارد که این شماره هیتهای به‌دست‌آمده متناظر با زمان‌های ۳۱/۳، ۱۲۳/۵ و ۴۶/۹ ثانیه می‌باشند که این نقاط زمانی به‌عنوان نقاط رخداد اثر کایزر تعیین شده‌اند.

در جدول ۲ نتایج حاصل برای ۳ نمونه آزمایش‌شده، ارائه شده است. همچنین در شکل ۱۶ زمان‌های به‌دست‌آمده از روش پارامتریک و روش تبدیل موجک گسسته باهم مقایسه شده‌اند. زمان‌های به‌دست‌آمده برای روش تبدیل موجک گسسته عبارت‌اند از میانگین زمان در بازه‌های در نظر گرفته‌شده. همان‌طور که در جدول ۲ ارائه شده است میزان پیش بارگذاری برای نمونه QP1 برابر با ۳/۷ مگا پاسکال است. با توجه به زمان رخداد اثر کایزر و انطباق آن با نمودار بارگذاری نمونه مذکور، نسبت فلیسیتی برابر با ۱/۱۷ تعیین شد. همچنین این نسبت برای نمونه‌های QP2 و QP3 به ترتیب برابر با ۱/۹۷ و ۱/۲۹

جدول ۲: نتایج حاصل از روش پارامتریک و روش تبدیل موجک گسسته

نام نمونه	QP1	QP2	QP3
پیش بارگذاری (مگا پاسکال)	۳/۷	۳/۲	۵/۷
زمان رخداد اثر کایزر به روش پارامتریک (ثانیه)	۳۱/۳	۱۲۳/۶	۴۶/۵
زمان رخداد اثر کایزر به روش تبدیل موجک گسسته (ثانیه)	۳۱/۳	۱۲۳/۵	۴۶/۹
تنش اثر کایزر به روش پارامتریک (مگا پاسکال)	۴/۳	۶/۳	۷/۱
تنش اثر کایزر به روش تبدیل موجک گسسته (مگا پاسکال)	۴/۳	۶/۳	۷/۴
نسبت فلیسیتی به روش پارامتریک	۱/۱۷	۱/۹۷	۱/۲۵
نسبت فلیسیتی به روش تبدیل موجک گسسته	۱/۱۷	۱/۹۷	۱/۲۹

به‌منظور تأیید نتایج حاصل از روش پیشنهادی، نمونه QP4 موردبررسی قرار گرفت. در این نمونه افزایش پارامتر آکوستیک به‌صورت تدریجی بود که این مسئله تعیین نقطه رخداد اثر کایزر را به روش پارامتریک مشکل می‌کرد؛ بنابراین با استفاده از روش تبدیل موجک گسسته اقدام به تعیین نقطه اثر کایزر شده است. در شکل ۱۸ مقادیر بیشینه ضریب تقریب خوشه‌بندی شده برای نمونه QP4 نشان داده شده است. با توجه به تراکم نقاط به‌دست‌آمده از محدوده پنجم، مشاهده می‌شود که نقاط در محدوده هیتهای شماره ۷۷۵ دارای بیشترین تراکم هستند که متناظر با



شکل ۱۷: مقایسه تنش اثر کایزر در روش پارامتریک و روش موجک گسسته

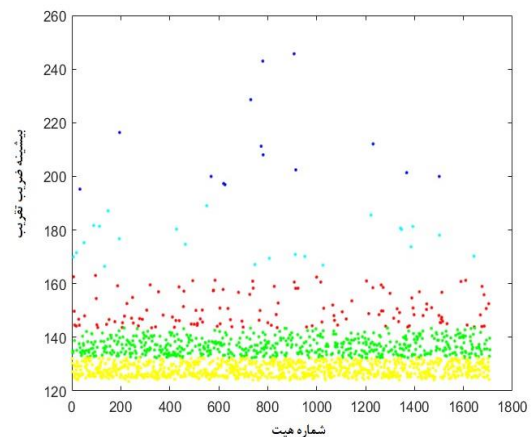
پارامتریک داشت. علاوه بر این روش پیشنهادی مزیتی نسبت به روش پارامتریک برای تعیین اثر کایزر در مواردی داشت که اثر کایزر به صورت واضح مشخص نیست.

(۵) بر اساس نتایج به دست آمده، با استفاده از روش پردازش سیگنال‌های انتشار آکوستیک و جبهه موج سیگنال‌های انتشار آکوستیک قابلیت تعیین نقطه اثر کایزر وجود دارد و می‌توان با روش پیشنهادی ارائه شده در این تحقیق نقطه اثر کایزر را تعیین کرد.

### مراجع

- [1] Kaiser, J., An investigation into the occurrence of noises in tensile tests, or a study of acoustic phenomena in tensile tests. Doctor of Philosophy, Technical University of Munich, Munich, Germany, 1950.
- [2] Li, C. and E. Nordlund, Experimental verification of the Kaiser effect in rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1993. 26(4): p. 333-351.
- [3] Lavrov, A., The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003. 40(2): p. 151-171.
- [4] Pestman, B. and J. Van Munster. An acoustic emission study of damage development and stress-memory effects in sandstone. in *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*. 1996. Elsevier.
- [5] Stuart, C., et al. Anisotropic crack damage and stress-memory effects in rocks under triaxial loading. in *The 34th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. 1993. OnePetro.
- [6] Seto, M., et al., In situ stress determination by acoustic emission technique. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997. 34(3-4): p. 281. e1-281. e16.
- [7] Chen, Z., et al., Confinement effects for damage and failure of brittle rocks. *International journal of rock mechanics and mining sciences* (1997), 2006. 43(8): p. 1262-1269.
- [8] Kyriazis, P., et al., Wavelet analysis on pressure stimulated currents emitted by marble samples. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2006. 6(6): p. 889-894.
- [9] Zhao, K., et al., Advances in Kaiser effect of rock acoustic emission based on wavelet analysis, in *Boundaries of Rock Mechanics*. 2008, CRC Press. p. 993-996.

زمان ۳۵/۲ ثانیه است و این زمانی است که اثر کایزر در آن رخ داده است. تنش متناظر با زمان به دست آمده برابر با ۵/۳ مگا پاسکال است.



شکل ۱۸: مقادیر بیشینه ضریب تقریب خوشه‌بندی شده برای نمونه QP4

### ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به مزایای روش انتشار آکوستیک، این روش جایگزین مناسبی برای روش‌های متداول تعیین تنش برجا خواهد بود. در این تحقیق با توجه به مزایای روش تبدیلات ریاضی به منظور تحلیل سیگنال‌های حاصل از روش انتشار آکوستیک از این روش به منظور تعیین تنش برجا استفاده و نتایج زیر حاصل شد:

- (۱) در این تحقیق با توجه به نوع سنگ که از جنس فیلیت بوده و همچنین نوع سیگنال‌های به دست آمده، موجک مادر db6 به عنوان موجک مناسب تعیین شد.
- (۲) با انجام استخراج ویژگی بر روی سیگنال‌های به دست آمده از آزمایش انتشار آکوستیک، از میان تمامی ویژگی‌ها با توجه به مکانیزم اثر کایزر، ویژگی بیشینه ضریب تقریب به عنوان ویژگی مناسب تعیین شد.
- (۳) سنگ فیلیت قابلیت حافظه تنش داشته و با بازیابی تنش توسط روش انتشار آکوستیک و تعیین نقطه اثر کایزر می‌توان تنش برجا در این نوع سنگ را تخمین زد.
- (۴) نتایج حاصل از روش پیشنهادی مبتنی بر تبدیل موجک گسسته انطباق خوبی با نتایج حاصل از روش

- [20] Wang, Y., et al., Study on crack dynamic evolution and damage-fracture mechanism of rock with pre-existing cracks based on acoustic emission location. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021. 201: p. 108420.
- [21] Wang, Z., et al., Crack propagation process and acoustic emission characteristics of rock-like specimens with double parallel flaws under uniaxial compression. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2021. 114: p. 102983.
- [22] Zhou, Z., et al., Microscopic Failure Mechanism Analysis of Rock Under Dynamic Brazilian Test Based on Acoustic Emission and Moment Tensor Simulation. *Frontiers in Physics*, 2021. 8: p. 619.
- [23] Kharghani, M., et al., Investigation of the Kaiser effect in anisotropic rocks with different angles by acoustic emission method. *Applied Acoustics*, 2021, 175.
- [24] Dinmohammadpour, M. et al., Application of Wavelet Transform in Evaluating the Kaiser Effect of Rocks in Acoustic Emission Test. *Measurement*, 2022, 192.
- [25] Ramos, R., et al., The discrete wavelet transform and its application for noise removal in localized corrosion measurements. *International Journal of Corrosion*, 2017. 2017.
- [26] Percival, D.B. and A.T. Walden, *Wavelet methods for time series analysis*. Vol. 4. 2000: Cambridge university press.
- [27] Soundararajan, V., H. Atharifar, and R. Kovacevic, Monitoring and processing the acoustic emission signals from the friction-stir-welding process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2006. 220(10): p. 1673-1685.
- [28] Polikar, R., *The wavelet tutorial*. 1996.
- [29] Dinmohammadpour, M., et al. The Mechanism of Kaiser Effect in Phyllite under Indirect Tensile Loading. *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin*, 2022, 59. DOI: 10.17794/rgn.2022.3.2
- [10] Nikkhah, M., M. Ahmadi, and A. Ghazvinian. Application of pattern recognition analysis of rock acoustic emission for determination of Kaiser Effect. in 12th ISRM Congress. 2011. OnePetro.
- [11] Sagar, R.V., B.R. Prasad, and R. Singh, Kaiser effect observation in reinforced concrete structures and its use for damage assessment. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2015. 15(2): p. 548-557.
- [12] Cao, A., et al. Mining-induced static and dynamic loading rate effect on rock damage and acoustic emission characteristic under uniaxial compression. *Safety Science*, 2019. 116: p. 86-96.
- [13] Liu, W.-r., J.-k. Liu, and C. Zhu, Multi-scale effect of acoustic emission characteristics of 3D rock damage. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019. 12(22): p. 1-13.
- [14] Gajst, H., et al., Relating strain localization and Kaiser effect to yield surface evolution in brittle rocks. *Geophysical Journal International*, 2020. 221(3): p. 209. 1-2103
- [15] Jiang, Z., et al., Acoustic emission characteristics in hydraulic fracturing of stratified rocks: a laboratory study. *Powder Technology*, 2020. 371: p. 267-276.
- [16] Seto, M., D. Nag, and V. Vutukuri, Evaluation of rock mass damage using acoustic emission technique in the laboratory, in *Rock Fragmentation by Blasting*. 2020, CRC Press. p. 139-145.
- [17] Chen, Z., L. Xu, and Y. Shang, Influence of joint angle on the acoustic emission evolution characteristics and energy dissipation rule of rock mass. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2021. 39(2): p. 1621-1635.
- [18] King, T., et al., Acoustic emission waveform picking with time delay neural networks during rock deformation laboratory experiments. *Seismological Society of America*, 2021. 92(2A) :p. 923-932.
- [19] Li, Z. and R. Xu, An early-warning method for rock failure based on Hurst exponent in acoustic emission/microseismic activity monitoring. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021: p. 1-15.