

ارائه روشی جدید برای تعیین نقطه اثر کایزر در سنگ‌ها

مجید نیکخواه^۱، مرتضی احمدی^{۲*}، عبدالهادی قزوینیان^۳

۱- دانشجوی دکترای مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، madjid.nikkhah@gmail.com

۲- دانشیار مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، moahmadi@modares.ac.ir

۳- دانشیار مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، abdolhadi@yahoo.com

(دریافت ۱۹ دی ۱۳۸۹، پذیرش ۲۵ دی ۱۳۹۰)

چکیده

به‌کارگیری آزمایش انتشار اکوستیک و اثر کایزر (Kaiser Effect) برای تخمین تنش برجا توده سنگ به میزان زیادی افزایش یافته است. در این مقاله یک روش خودکار، مبتنی بر روش‌های شناسایی الگو (Pattern Recognition)، برای تعیین دقیق اثر کایزر با ترکیب نتایج روش‌های مختلف متداول و تصمیم‌گیری برای تعیین مقدار دقیق تر تنش اثر کایزر ارائه شده است. در این روش از داده‌های سیگنال‌های به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های ماسه سنگ پیش بارگذاری شده استفاده شده است. با این روش جدید پیشنهادی، تنش حداکثر قبلی در سنگ‌ها را می‌توان بطور مستقیم و بدون تحلیل بر روی سیگنال‌های جبهه موج تعیین کرد. نتایج تحقیق نشان می‌دهند که روش‌های شناسایی الگو می‌توانند برای تصمیم‌گیری و تعیین نقطه اثر کایزر استفاده شوند و روش توسعه یافته دقت قابل قبول و مطلوبی برای تشخیص و تعیین نقطه اثر دارد.

کلمات کلیدی

انتشار اکوستیک (آوایی)، اثر کایزر، شناسایی الگو، ماسه سنگ، تنش برجا

۱- مقدمه

به طور کلی سنگ‌ها و اغلب مواد، زمانی که تحت تنش واقع می‌شوند از خود صدا و سیگنال‌های لرزه‌ای با فرکانس زیاد ساطع می‌کنند. این پدیده انتشار اکوستیک^۱ نامیده می‌شود. این پدیده در سنگ‌ها به واسطه انسدادهای ریزترک‌ها و توسعه آن‌ها، نابجایی‌ها^۲، حرکت مرز دانه‌ها، انتشار شکستگی‌ها از میان یا بین دانه، ایجاد شکاف در ساختار دانه‌های و گسیختگی برشی ایجاد می‌شود [۱-۴]. پدیده دیگری که موضوع اصلی مقاله حاضر بوده و در این ارتباط تعریف می‌شود، اثر کایزر است. این پدیده به صورت فقدان AE در سطوح تنش پایین‌تر از تنش ماکزیمم اعمال شده قبلی تعریف می‌شود. این پدیده برای بارگذاری چرخه‌ای و در یک مسیر تنش بررسی می‌شود. در طی چرخه اول بارگذاری، فعالیت AE در تمام سطوح تنش مشاهده می‌شود و طی چرخه‌های بعدی، AE در تنش‌های پایین‌تر از تنش حداکثر قبلی، مشاهده نشده و یا مقدار آن کم است. زمانی که تنش اعمالی در چرخه دوم از تنش حداکثر قبلی بیشتر می‌شود، افزایش ناگهانی در AE مشاهده می‌شود [۲]، [۵-۷]. روش‌های متفاوتی برای تعیین اثر کایزر وجود دارند، که توسط محققین مختلفی ارائه شده و هم‌اکنون نیز استفاده می‌شوند. با این وجود، در عمل موارد زیادی وجود دارند که در آن‌ها اثر کایزر به وضوح قابل تشخیص نبوده و یا تعیین دقیق آن با استفاده از روش‌های متداول دشوار است. دشواری و همچنین مواردی ابهام در تعیین نقطه اثر کایزر با استفاده از روش‌های متداول مبتنی بر مشاهده فعالیت‌های انتشار اکوستیک وجود دارد. بنابراین روش جدید ترکیبی برای تخمین دقیق‌تر نقطه اثر کایزر ارائه شده است. در تحقیق حاضر آزمایش‌های انتشار اکوستیک و رفتارنگاری سیگنال‌های ساطع شده در حالت آزمایش تک محوره بر روی تعدادی نمونه‌های استوانه‌ای از جنس ماسه سنگ انجام گرفته و تعیین تنش اثر کایزر بر اساس روش پیشنهادی مورد مطالعه قرار گرفته است و سپس روش جدیدی مبتنی بر شناسایی الگو برای انتخاب دقیق‌تر نقطه اثر کایزر، از نتایج روش‌های مختلف متداول توسعه داده شده است. در روش ارائه شده از چهار پارامترهای اصلی سیگنال‌های انتشار اکوستیک، شامل: انرژی، شمارش^۳، زمان خیز^۴ و مدت زمان^۵ استفاده شده است.

۱- روش‌های مختلف اندازه‌گیری نقطه اثر کایزر

مشکل‌ترین و گمراه‌کننده‌ترین ویژگی روش اثر کایزر، قابلیت تخمین حالت تنش برجا از روی داده‌های به دست آمده از

نمونه‌های مغزه در شرایط آزمایشگاهی است. در بهترین حالت، تا زمانی که تنش پایین‌تر از مقدار بزرگترین تنش قبلی (σ_m) است، هیچ سیگنال AE وجود نداشته و یا سیگنال کمی مشاهده می‌شود. در این سطح تنش (σ_m)، AE بطور ناگهانی پدیدار می‌شود. با این وجود گاهی اوقات فعالیت AE ممکن است در تنش‌های کمتر از تنش بخاطر سپرده شده (σ_m)، که ناشی از حرکت اصطکاکی در طول ترک‌ها است، پدیدار شود. در حالیکه در تنش $\sigma > \sigma_m$ فعالیت انتشار اکوستیک ناشی از رشد و ایجاد ترک است. در چنین حالتی، اثر کایزر می‌تواند به صورت یک انحناء (تغییر شیب) در منحنی تجمعی AE بر حسب تنش مشخص شود [۲]. به جای ضربات و رخدادهای تجمعی، می‌توان از وابستگی نرخ و آهنگ ضربه بر حسب تنش نیز استفاده کرد. نرخ ضربه \dot{N} عبارتست از سیگنال‌های AE دریافت شده در هر ثانیه یا در فواصل افزایشی تنش یک مگاپاسکال. برخی مواقع ممکن است به جای نرخ ضربه مجذور آن $(\dot{N})^2$ نیز بکار برده شود. وابستگی مقادیر تجمعی $(\dot{N})^2$ بر حسب تنش انحنای کایزر تندتری را نسبت به ضربات تجمعی بر حسب تنش نشان داده شده است [۲]. در اغلب کارهای منتشر شده در ادبیات شروع انتشار اکوستیک به طور مستقیم به عنوان شاخص اثر کایزر و تنش حداکثر قبلی بکار برده می‌شود. به منظور بدست آوردن سطح تنش قبلی در یک نمونه تحت بارگذاری، ترسیم نمودار زمان و یا تنش بر حسب تعداد رخدادهای انتشار اکوستیک تجمعی شمارش و یا نرخ آن، مرسوم است. نقطه انحنای منحنی معمولاً برای تخمین تنش با استفاده از روش اثر کایزر بکار برده می‌شود.

بویس در سال ۱۹۸۱ یک روش مفهومی را برای تنش اثر کایزر از داده‌های آزمایشگاهی استفاده کرد. به طوری که مماس‌هایی بر قسمت‌های ساکت و همچنین بخش فعال تر بعدی AE، بر حسب تنش اعمال شده ترسیم می‌شوند. آنگاه محل تقاطع مماس‌ها برای تعیین مقدار تنش کایزر استفاده می‌شود [۲]. یوشیکاوا و موگی در سال ۱۹۸۹ روشی را ارائه کردند که می‌توان از آن در آزمایش‌هایی که در هر چرخه بارگذاری در تنش‌های پایین‌تر از تنش حفظ شده، فعالیت AE زیادی وجود داشته، استفاده نمود [۹، ۲]. این روش را برای مواردی که اثر کایزر بخوبی توسط ترسیم داده‌های آزمایشگاهی مشخص نباشد پیشنهاد کردند. طبق این روش، دو چرخه بارگذاری مجدد، با تنش حداکثر یکسان، که باید بیشتر از تنش حداکثر پیش بارگذاری (σ_m) باشد، اعمال می‌شود. وابستگی‌های نرخ ضربه AE بر حسب تنش، برای هر چرخه بارگذاری مجدد

مذکور دچار خطای بیشتر شده و بنابراین معیار و روش مناسبی برای بهترین انتخاب و تعیین اثر کایزر کمک شایانی بر تصمیم-گیری خواهد داشت.

۲- روش آزمایش و رفتارنگاری انتشار اکوستیک

برای انجام آزمایش‌ها، نمونه‌های بلوکی ماسه سنگ از رخنمون‌های سازند شمشک در ناحیه پروژه تعریض جاده در حال کوه بری، جمع‌آوری شدند. با توجه به عمق روباره کم ناحیه (حداکثر عمق ۱۲ متر) استخراج شده، می‌توان گفت که سنگ سطح تنش کمی را در حافظه خود ثبت کرده است.

آزمایش‌های رفتارنگاری انتشار اکوستیک بر روی نمونه مغزه‌های استوانه ای دارای قطر ۲۵/۱-۲۴/۸ mm و نسبت ارتفاع به قطر ۲ تا ۲/۵ انجام شده است. برای ایجاد یک حافظه تنش در سنگ، لازم است سنگ به مدت کافی تحت بار قرار گیرد. بدین منظور و برای القاء یک حافظه تنش، تا سطح تنش معینی بار (ناحیه الاستیک در منحنی رفتاری تنش- کرنش سنگ) به نمونه‌ها اعمال شده است. مراحل انجام پیش بارگذاری نمونه‌ها طی یک مرحله صورت پذیرفته است، به طوری که چرخه اول تا رسیدن به تراز تنش تعیین شده با نرخ ثابت ۰/۲ mm/min بارگذاری شده و به مدت ۵ دقیقه در همان سطح تنش ثابت نگه داشته شده است. پس از هر مرحله پیش بارگذاری، آزمایش انتشار اکوستیک بدون تاخیر با اعمال تنش بارگذاری بیش از سطح تنش پیش بارگذاری قبلی، انجام گرفته است. شکل ۱ آرایش و ترتیبات روش آزمایش انتشار اکوستیک را نشان می‌دهد.

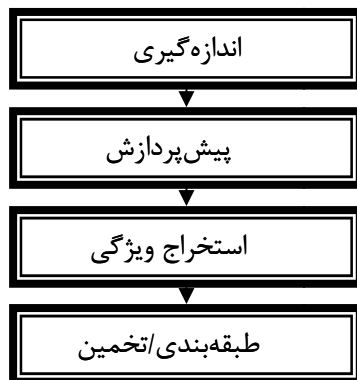
انتشار اکوستیک (AE) بوسیله دو حسگر متصل شده به نمونه اندازه‌گیری می‌شود. در شکل ۲ دو نمونه از نتایج و نمودارهای شمارش‌های تجمعی AE و میزان تنش بارگذاری نسبت به زمان برای سیکل‌های مختلف بارگذاری مشاهده می‌شود. چنانچه ملاحظه می‌شود، رخدادهای انتشار اکوستیک تا رسیدن به سطح بار حداکثر سیکل قبلی ایجاد نشده و در این نقطه، رخدادهای پیوسته و افزایشی AE مجدداً شروع شده‌اند و بدین ترتیب تنش نقطه اثر کایزر به وضوح خودش را به صورت یک انحناء (تغییر شیب) در نمودار تعداد تجمعی رخدادهای بر حسب تنش محوری، در همه موارد به خوبی نمایان بوده است.

ترسیم می‌شوند. میزان تنشی که این دو منحنی از هم تفکیک می‌شوند، بر تنش حداکثر پیش بارگذاری (σ_m) منطبق است. در تنش‌های کمتر از σ_m ، این دو منحنی برهم منطبق‌اند، در صورتی که از این نقطه به بعد، منحنی دومین چرخه بارگذاری مجدد زیر منحنی اولین چرخه بارگذاری قرار می‌گیرد و اختلاف بین آن‌ها با افزایش تنش، افزوده می‌شود. با ترسیم کردن اختلاف بین وابستگی‌های "نرخ ضربه بر حسب تنش" در اولین و دومین چرخه‌های بارگذاری مجدد، مقدار σ_m را، حتی زمانیکه نویز قابل توجهی در هر چرخه در تنش‌های پایین وجود دارد به طور دقیقی مشخص می‌شود [۲].

میز و همکاران روش دیگری را برای پردازش منحنی انتشار اکوستیک ارائه کردند. در این روش که به نام روش حداکثر انحنای منحنی^۷ معرفی شده است، تغییر شیب منحنی انتشار اکوستیک تجمعی ضربات بر حسب تنش با محاسبه مقدار انحناء، در طول منحنی تجمعی تعیین می‌شود [۹]. مقدار تنش منطبق بر بیشینه انحناء، به عنوان تنش اثرکایزر در نظر گرفته شده و تغییر شیب و خمیدگی به عنوان شاخصی از اثر بار اعمال شده قبلی است. توسط ویلاسکوزا و همکاران در سال ۲۰۰۲ روشی پیشنهاد شده است که در این روش از تغییرات شیب نرمال شده منحنی "مجموع انتشار اکوستیک تجمعی بر حسب تنش" استفاده می‌شود. در این طریقه حداکثر تغییر، به عنوان مقدار تنش بخاطر سپرده شده در سنگ در نظر گرفته می‌شود [۱۰].

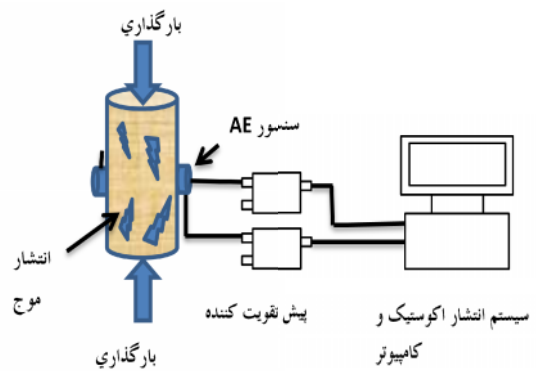
برای یک دوره زمانی طولانی، تنها روش تعیین تنش اثر کایزر از داده‌های آزمایش انتشار اکوستیک، ترسیم منحنی زمان یا تنش/بار بر حسب شمارش انتشار اکوستیک تجمعی و سپس تخمین مشاهده ای نقطه انحناء در منحنی بوده است. اگرچه از این شیوه ممکن است نتایج خوبی را در صورتی که داده‌های نمودار به اندازه کافی بوده و روند افزایشی نمودار در یک نقطه مشخصی محسوس باشد به دست آید، با این وجود در شناسایی و تعیین دقیق نقطه انحناء بعنوان نقطه اثر کایزر و جایی که تغییر شیب اتفاق افتاده نیاز به تجربه دارد. مواردی وجود دارد که اثر کایزر را نمی‌توان به وضوح با ترسیم داده‌ها و استفاده از روش‌های مذکور مشاهده کرد. تعیین نقطه اثر کایزر که به صورت عینی از روی نمودارهای تجمعی شمارش و یا نرخ شمارش تعیین می‌شود، در صورتی که حتی اثر کایزر واضحی مشاهده شود، می‌تواند تعیین آن به صورت مشاهده‌ای به راحتی امکان پذیر نباشد و تعیین نقطه مذکور، می‌تواند با خطای قابل ملاحظه‌ای همراه باشد و حال اگر اثر کایزر مبهم باشد و یا چندین نقطه انحناء در نمودار وجود داشته باشد، تعیین نقطه

گوسی^{۱۱}، مدل مخفی مارکو^{۱۲} شبکه‌های عصبی مصنوعی^{۱۳}، ماشین بردار پشتیبان^{۱۴} اشاره کرد. هر یک از این روش‌ها، مزایا و معایب خاص خود را داشته و در کاربردهای مختلف می‌توانند نسبت به یکدیگر برتری نسبی داشته باشند. در هر سیستم شناسایی الگو، ابتدا توسط حسگرهایی از محیط یا شی مورد نظر اندازه‌گیری‌هایی انجام می‌شود. سپس پیش‌پردازش‌هایی بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده انجام می‌شود که از جمله مهمترین این پیش‌پردازش‌ها عملیات کاهش نویز است. بعد از آن بر اساس دانش زمینه، ویژگی‌هایی از داده‌ها استخراج می‌شوند. توجه به این نکته بسیار مهم است که نوع ویژگی‌ها و نحوه استخراج آن‌ها به‌طور کامل وابسته به دانش زمینه است و از کاربردی به کاربرد دیگر متفاوت است. در نهایت نوبت به طبقه‌بندی داده‌هاست. این بخش از سیستم موضوع اصلی علم شناسایی الگو است. ساختار کلی یک سیستم شناسایی الگو در شکل ۴ نشان داده شده است [۱۱].

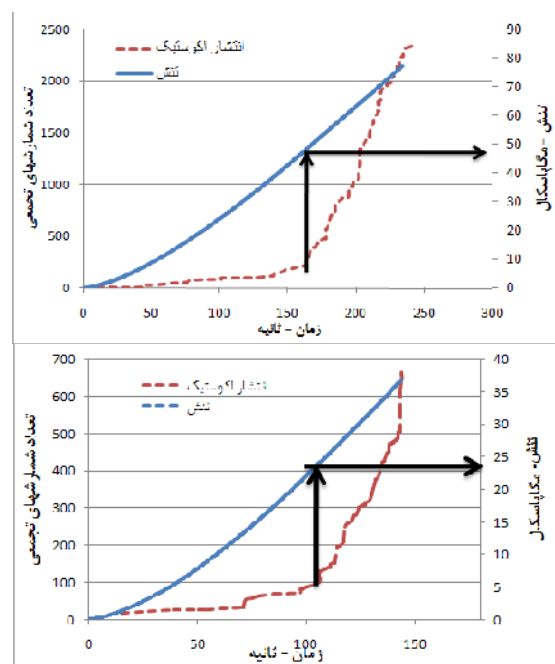


شکل ۳: ساختار کلی سیستم شناسایی الگو.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، بخش‌هایی سیستم ممکن است عملیات طبقه‌بندی یا تخمین باشد. تفاوت ظریفی میان طبقه‌بندی و تخمین وجود دارد. در طبقه‌بندی هدف جداسازی یک سری داده در کلاس‌های مجزا و گسسته است و تعداد این کلاس‌ها باید محدود باشد. اما در تخمین، هدف تفکیک داده‌ها به کلاس‌های محدود و گسسته نیست، بلکه هدف، تخمین یک نگاشت پیوسته از داده‌های ورودی به یک فضای پیوسته است. به عبارت دیگر طبقه‌بندی حالت خاصی از تخمین است به طوری که در طبقه‌بندی هدف تخمین یک نگاشت میان داده‌های ورودی به یک فضای گسسته و محدود است. مسئله مورد بحث در این پژوهش از دسته شناسایی سیستم است، به همین دلیل به جای «طبقه‌بندی‌کننده» از «تخمین‌گر» استفاده می‌شود.



شکل ۱: آرایش و ترتیبات روش آزمایش انتشار اکوستیک.



شکل ۲: نمودار شمارش تجمعی انتشارهای اکوستیک و بار نسبت به زمان در سطوح مختلف تنش پیش بارگذاری ۴۹ مگاپاسکال (شکل بالا) و تنش پیش بارگذاری ۲۳ مگاپاسکال (شکل پایین).

۳- مقدمه‌ای بر شناسایی الگو

شناسایی الگو علم روش‌های تحلیل داده به منظور جداسازی و طبقه‌بندی آن‌ها بر اساس یکسری از ویژگی‌ها است. هدف در شناسایی الگو طراحی روش‌هایی برای طبقه‌بندی دسته‌ها در یک مسئله طبقه‌بندی است، به نحوی که خطای طبقه‌بندی به حداقل ممکن برسد. به اطلاعاتی که بر اساس آن‌ها طبقه‌بندی انجام می‌شود، ویژگی و به روش طبقه‌بندی، طبقه‌بندی‌کننده می‌گویند [۱۱]. در این ارتباط روش‌ها و ابزارهای مختلفی برای طبقه‌بندی ابداع شد که از جمله آن‌ها می‌توان به طبقه‌بندی‌کننده‌های ساده مانند بیز^{۱۵}، نزدیکترین همسایه^{۱۶}، پنجره پارزن^{۱۷} و طبقه‌بندی‌کننده‌های پیچیده مانند مدل مخلوط

۴- روش کار

۳) نقطه‌ای که کمترین مقدار خطای برازش e دارد، به عنوان نقطه کایزر انتخاب می‌شود.

۴-۱- معیارها و روش‌های تخمین نقطه اثر کایزر

روش‌ها و معیارهای به کار برده شده در این تحقیق به همراه چگونگی پیاده سازی و فرمول‌بندی آن‌ها در ادامه بیان شده است:

روش اول: در این روش نقطه اثر کایزر با برازش دو خط مستقیم و رگرسیون دو خطی، تعیین می‌شود. به طوری که مشتمل بر ترسیم مماس‌های کلی بر دو قسمت بالا و پایین نقطه اثر کایزر بوده و پس از محاسبه خطاهای خطوط برازش شده، نقطه‌ای که حداقل خطا را دارد نقطه اثر کایزر خواهد بود. مراحل این روش عبارت است از:

۱) به ازای هر نقطه p از منحنی $f(\cdot)$ ، (منحنی تجمعی پارامتر AE) عملیات زیر انجام می‌شود.

i. بر تمام نقاط منحنی که در سمت چپ نقطه p قرار گرفته‌اند $f(x < p)$ ، خطی برازش شده و خطای آن e_1 نامگذاری می‌شود.

ii. بر تمام نقاط منحنی که در سمت راست نقطه p قرار گرفته‌اند $f(p < x)$ ، خطی برازش شده و خطای آن e_2 نامگذاری می‌شود.

iii. خطای کل برازش چنین خواهد شد: $e = e_1 + e_2$

۲) نقطه‌ای که کمترین مقدار خطای برازش e دارد، به عنوان نقطه کایزر انتخاب می‌شود.

روش دوم: طبق این روش، مشابه روش اول خطوطی در دو سمت چپ و راست نقطه اثر کایزر برازش می‌شوند، با این تفاوت که برازش محلی بوده در حالی که در روش اول برازش کلی است. در ادامه گام‌های این روش بیان شده است:

۱) فرض می‌شود: $k = \max(10, \text{length}(f(\cdot)))$

۲) به ازای هر نقطه p از منحنی $f(\cdot)$ ، عملیات زیر انجام می‌شود:

i. بر k نقطه منحنی که در سمت چپ نقطه p قرار گرفته‌اند $f(p - k < x < p)$ ، خطی برازش شده و خطای آن e_1 نامگذاری می‌شود.

ii. بر k نقطه منحنی که در سمت راست نقطه p قرار گرفته‌اند $f(p < x < p + k)$ ، خطی برازش شده و خطای آن e_2 نامگذاری می‌شود.

iii. خطای کل برازش چنین خواهد شد: $e = e_1 + e_2$

روش سوم: بر مبنای این روش ابتدا اختلاف بین مجذور پارامتر تجمعی مورد نظر از مقدار پارامتر تجمعی مورد نظر محاسبه شده و سپس از روش اول برای تعیین اثر کایزر از تابع بدست آمده استفاده می‌شود. مراحل انجام این روش در به شرح ذیل است:

۱) منحنی $g(\cdot)$ طبق معادله روبرو از منحنی $f(\cdot)$ محاسبه می‌شود:

$$g(x) = f^2(x) - f(x) \quad (1)$$

۲) به ازای هر نقطه p از منحنی $g(\cdot)$ ، عملیات زیر انجام می‌شود:

i. بر تمام نقاط منحنی که در سمت چپ نقطه p قرار گرفته‌اند $g(x < p)$ ، خطی برازش شده و خطای آن e_1 نامگذاری می‌شود.

ii. بر تمام نقاط منحنی که در سمت راست نقطه p قرار گرفته‌اند $g(p < x)$ ، خطی برازش شده و خطای آن e_2 نامگذاری می‌شود.

iii. خطای کل برازش چنین خواهد شد: $e = e_1 + e_2$

۳) نقطه‌ای که کمترین مقدار خطای برازش e را دارد، به عنوان نقطه کایزر انتخاب می‌شود.

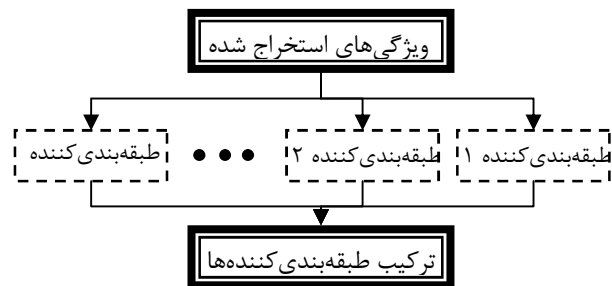
روش چهارم: در این روش که در واقع همان روش ویلاسکوزا و همکاران است، از تغییرات شیب نرمال شده منحنی تجمعی پارامترهای AE استفاده می‌شود، با این تفاوت که حد آستانه شیب ۲۰ درجه و ۱۰ نقطه به جای ۵ نقطه به منظور وسیع‌تر نمودن بازه ناحیه بررسی در رابطه مربوط در نظر گرفته شده است. در زیر مراحل انجام روش مذکور بیان شده است:

۱) فرض می‌شود: $\delta = 10$ (بازه ۱۰ نقطه ای) و حد آستانه $th = 0.2$

۲) به ازای هر نقطه p از منحنی $f(\cdot)$ ، شیب محلی نقطه p توسط رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$m = \frac{f(p + \delta) - f(p - \delta)}{\sigma_{p+\delta} - \sigma_{p-\delta}} \quad (2)$$

۳) پس از محاسبه شیب منحنی m برای تمام نقاط، مقادیر m توسط رابطه زیر نرمال شده تا منحنی mn به دست آید:



شکل ۴: ساختار طبقه‌بندی کننده‌های موازی برای ترکیب آن‌ها.

همان‌طور که از شکل ۴ پیداست، چندین طبقه‌بندی کننده به طور موازی در کنار یکدیگر قرار دارند. ورودی این طبقه‌بندی کننده‌ها یکسان است، اما هر طبقه‌بندی کننده ممکن است خروجی‌های مختلفی تولید کند. بنابراین لازم است تا برای تصمیم‌گیری نهایی از روش‌های ترکیب طبقه‌بندی کننده‌ها استفاده شود. یکی از ساده‌ترین روش‌های استفاده شده برای ترکیب نتایج حاصل از چند طبقه‌بندی کننده، استفاده از رای اکثریت^{۱۷} است که به سه شکل قابل استفاده می‌باشد: الف) رای مطلق^{۱۸}، ب) رای اکثریت ساده^{۱۹} و ج) رای ائتلافی^{۲۰}، اما اغلب از روش رای ائتلافی استفاده می‌شود. به این معنی که خروجی سیستم بر اساس رای اکثریت تعیین می‌شود. روش رای اکثریت برای ترکیب طبقه‌بندی کننده‌ها که کلاس‌ها به طور کامل گسسته و محدود است استفاده می‌شود. برای ترکیب تخمین‌گرها می‌توان از روش میانگین‌گیری استفاده کرد. روش میانگین‌گیری نیز می‌تواند به دو شکل انجام شود: الف) میانگین‌گیری ساده^{۲۱} و ب) میانگین‌گیری وزن‌دار^{۲۲} [۱۲]. در میانگین‌گیری ساده، میانگین خروجی تمام تخمین‌گرها به عنوان خروجی نهایی تعیین می‌شود. اگر N تخمین‌گر مانند E_i داشته باشیم که خروجی هر کدام y_i باشد، روش میانگین‌گیری ساده چنین عمل می‌کند [۱۲]:

$$y_{SA} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \quad (5)$$

در این روش، خروجی تمام تخمین‌گرها به یک اندازه اهمیت دارند، اما در عمل ممکن است میزان اعتماد ما به خروجی هر یک از تخمین‌گرها یکسان نباشد. به عنوان مثال، در صوتی که بخواهیم تأثیر برخی از تخمین‌گرها را در میانگین‌گیری کم کرده و تأثیر برخی دیگر را بیشتر کنیم. در این حالت می‌توان با نسبت دادن وزن به خروجی هر یک از تخمین‌گرها، میزان تأثیر آن‌ها را در میانگین‌گیری تغییر داد. به این روش میانگین‌گیری وزن‌دار می‌گویند. در میانگین‌گیری وزن‌دار اگر N تخمین‌گر مانند E_i داشته باشیم که خروجی هر کدام y_i و وزن متناظر با

$$mn = \frac{m - \min(m)}{\max(m) - \min(m)} \quad (3)$$

(۴) اولین نقطه‌ای از منحنی mn که مقدار آن بیشتر از آستانه th باشد، نقطه اثر کایزر قلمداد می‌شود.

روش پنجم: (روش پیشنهادی) بر اساس این روش نقطه اثر کایزر با محاسبه شیب نقاط واقع بر منحنی تجمعی پارامتر با طی نمودن منحنی از چپ به راست تعیین می‌شود. نقطه‌ای که بیشینه شیب را دارد به عنوان نقطه اثر کایزر در نظر گرفته می‌شود. گام‌های زیر چگونگی انجام و پیاده‌سازی این روش را توصیف می‌کند:

(۱) شیب نقطه x نسبت به نقطه p از منحنی $f(\cdot)$ ، توسط رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$m = \frac{f(x) - f(p)}{x - p} \quad (4)$$

(۲) به ازای هر نقطه p از منحنی $f(\cdot)$ ، عملیات زیر انجام می‌شود.

- i. مجموع شیب تمام نقاط منحنی که در سمت راست نقطه p قرار گرفته‌اند $f(p < x)$ ، نسبت به نقطه p محاسبه و m نامگذاری می‌گردد.
- ii. نقطه‌ای که بیشترین مقدار m را دارد، به عنوان نقطه کایزر انتخاب می‌شود.

۴-۲- ترکیب تخمین‌گرها

یکی از مباحث مهم در علم شناسایی الگو که اخیراً در علوم مختلف بسیار مورد توجه قرار گرفته، ترکیب طبقه‌بندی کننده‌ها^۴ است. علاوه بر اصطلاح ترکیب طبقه‌بندی کننده‌ها، از واژه‌های همجوشی طبقه‌بندی کننده‌ها^{۱۵} و مجمع طبقه‌بندی کننده‌ها^{۱۶} نیز در ادبیات شناسایی الگو استفاده می‌شود. می‌توان نشان داد که ترکیب چند طبقه‌بندی کننده ضعیف (با دقت کم) می‌تواند منجر به یک طبقه‌بندی کننده قوی (با دقت بالا) شود [۱۲]. ترکیب طبقه‌بندی کننده‌ها می‌تواند ساختارهای بسیار متنوعی داشته باشد. یکی از ساختارهای رایج برای یک سیستم طبقه‌بندی مبتنی بر ترکیب طبقه‌بندی کننده‌ها، ساختار موازی است که در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

کند، اما روش کارآمدی نیست. چرا که این روش تا حدود زیادی تحت تأثیر داده پرت^{۳۳} قرار می‌گیرد. داده‌های پرت به داده‌ای گفته می‌شود که فاصله نسبتاً زیادی از مرکز اصلی تجمع داده‌ها دارد. به نوعی می‌توان داده پرت را نوعی نویز محسوب کرد، اما تفاوت ظریفی بین این دو مفهوم وجود دارد.

در سیستم پیشنهادی داده پرت ممکن است به دلیل اشتباه یک تخمین‌گر در تخمین نقطه کایزر از روی یک پارامتر خاص سیگنال AE رخ دهد. استفاده از میانگین‌گیری نیز، مشروط به اینکه تعداد نمونه‌ها به اندازه کافی باشد امکان‌پذیر است. با توجه به اینکه تعداد مقادیر تخمینی اولیه در سیستم پیشنهادی محدود است، استفاده از روش میانگین‌گیری چندان توجیه‌پذیر نیست. روش دیگری که می‌توان استفاده نمود، میانگین‌گیری وزن‌دار است. در میانگین‌گیری وزن‌دار به هر یک از خروجی تخمین‌گرها وزنی در بازه $[0,1]$ تعلق می‌گیرد که این وزن میزان اهمیت آن خروجی را مشخص می‌کند. نکته مهم در استفاده از میانگین‌گیری وزن‌دار این است که وزن هر یک از خروجی‌ها چگونه تعیین شود؟ در این مقاله، از دانش مکانیک سنگ و حدود برآوردی تنش مورد انتظار، برای وزن‌دهی به هر یک از خروجی‌ها استفاده شده است. بدین ترتیب که بر اساس تجربه، حدود تنش در سنگ و عبارتی نقطه کایزر برای یک نمونه حدس زده می‌شود که در حدود چه سطح تنشی رخ می‌دهد.

در آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها تا سطح تنش مشخصی که در اینجا دو برابر تنش حدس زده شده برای نقطه کایزر است تحت بارگذاری قرار می‌گیرد. از این رو انتظار می‌رود، نقطه کایزر در حدود میانی تنش اعمال شده به سنگ واقع شود. بنابراین با استفاده از یک تابع ساده دوزنقه‌ای، اقدام به وزن‌دهی خروجی‌ها گردید. به عبارت دیگر اگر نقطه تقریبی کایزر برای یک سنگ P_G حدس زده شود، سنگ مورد نظر به طور تقریبی خطی از فشار صفر تا $2 \times P_G$ تحت بارگذاری قرار می‌گیرد. سپس با اعمال روش‌های مختلف تخمین بر روی پارامترهایی که از امواج انتشاریافته AE بدست می‌آیند، چندین مقدار تقریبی برای نقطه کایزر محاسبه می‌شود. این نقاط در بازه $[0, 2P_G]$ قرار دارد. در این روش نقاطی که به P_G نزدیک‌ترند، وزن بیشتری داده شده و به نقاطی که از مرکز دورترند، وزن کمتری تعلق می‌گیرد. در شکل ۵ نحوه مقداردهی به مقادیر مختلف حاصل تخمین‌گرهای مختلف نشان داده شده است.

آن W_i باشد، خروجی نهایی ترکیب تخمین‌گرها طبق رابطه ۶ خواهد شد [۱۲]:

$$y_{WA} = \frac{\sum_{i=1}^N W_i y_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (6)$$

در رابطه فوق مقدار W_i ها در بازه $[0,1]$ قرار دارد. میانگین‌گیری ساده حالت خاصی از میانگین‌گیری وزن‌دار است به شرطی که وزن تمام تخمین‌گرها یکسان باشد. حال این سوال مطرح می‌شود که وزن هر کدام از تخمین‌گرها چگونه تعیین می‌شود.

برای تعیین وزن تخمین‌گرها دو روش عمده وجود دارد. روش اول بر اساس وزن‌دهی دستی است، که در این روش وزن هر تخمین‌گر بر اساس دانش زمینه یک فرد خبره و به شکل ثابت تعیین می‌شود. روش دیگر تعیین وزن‌دهی به صورت خودکار است. در این روش ابتدا یک معیار برای میزان مناسب بودن تخمین‌گرها تعیین شده و سپس بر اساس این که معیار متناظر با هر یک از این تخمین‌گرها چقدر باشد، وزن هر کدام تعیین می‌شود. روش خودکار می‌تواند مزایای بهتری داشته باشد، به شرطی که معیار مناسبی برای ارزیابی تخمین‌گرها تعریف شده باشد. هرچند معیارهای مختلفی برای ارزیابی تخمین‌گرها وجود دارد، اما اغلب تعریف معیار بر اساس دانش زمینه بوده و به نوع کاربرد بستگی دارد [۱۲].

۴-۳- روش پیشنهادی ترکیب تخمین‌گرها

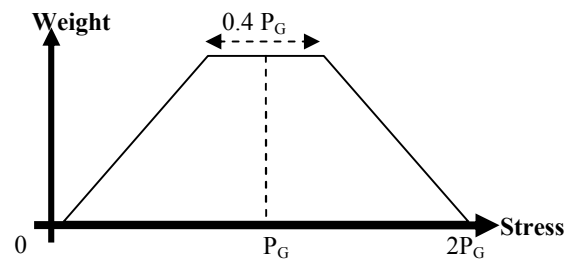
مرحله مهم و اساسی روش پیشنهادی، نحوه ترکیب خروجی تخمین‌گرها از پارامترهای مختلف است. اگر N پارامتر از سیگنال‌های AE استخراج شود و M تخمین‌گر برای محاسبه نقطه کایزر از این پارامترها استفاده شود، در مجموع تعداد M ضربدر N خروجی از تخمین‌گرها حاصل می‌شود که هر کدام از آن‌ها می‌تواند به عنوان نقطه کایزر مورد استفاده قرار گیرد. اما می‌توان با ترکیب و تجمیع این مقادیر، تصمیم دقیق‌تری در مورد نقطه کایزر داشت. اگرچه ساده‌ترین روش ترکیب خروجی چند طبقه‌بندی‌کننده در فضای گسسته و محدود، رای اکثریت است. اما در سیستم پیشنهادی، خروجی تخمین‌گرها در فضای پیوسته و نامحدود تعریف می‌شود. بنابراین استفاده از رای اکثریت امکان‌پذیر نیست. در فضای پیوسته و نامحدود می‌توان از میانگین‌گیری خروجی‌ها استفاده کرد. این روش اگرچه بسیار ساده است و می‌تواند تا حدودی در تعیین بهتر نقطه کایزر کمک

پیشنهادی، برای خوشه‌بندی خروجی تخمین‌گرها، ابتدا هیستوگرام داده‌ها در ۲۰ بازه با فواصل مساوی از بازه $[0, 2P_G]$ محاسبه می‌شود. به این ترتیب با محاسبه هیستوگرام، نوعی خوشه‌بندی ساده داده‌ها صورت می‌گیرد. این روش دارای سه ویژگی است: (۱) خوشه‌ها اندازه‌های یکسان دارند، (۲) برخی از خوشه‌ها خالی هستند و (۳) حجم محاسبات بسیار کم است. هرچند در روش پیشنهادی سیگاری و همکارانش [۱۳] از روش Isodata برای خوشه‌بندی استفاده شده، اما در کاربرد کنونی، استفاده از خوشه‌بندی Isodata و سایر روش‌های خوشه‌بندی می‌تواند منجر به تولید خوشه‌هایی با اندازه‌های مختلف در بازه $[0, 2P_G]$ شود.

تولید خوشه‌هایی با اندازه غیر یکسان می‌تواند باعث کاهش دقت تخمین نقطه کایزر شود. بنابراین لازم است تا از روش هیستوگرام استفاده شود تا اندازه خوشه‌ها در بازه $[0, 2P_G]$ به‌طور کامل یکسان باشند. به این ترتیب خروجی تخمین‌گرها با استفاده از هیستوگرام در ۲۰ خوشه تقسیم‌بندی می‌شود. حال به هر یک از خوشه‌ها وزنی تعلق می‌گیرد که نحوه وزن‌دهی به خوشه‌ها شبیه روش وزن‌دهی به داده‌ها است که پیشتر توضیح داده شد. به عبارت دیگر، با استفاده از یک تابع دوزنقه‌ای، وزن خوشه‌ها طوری تعیین می‌شود که خوشه‌هایی که به مرکز نزدیک‌ترند، وزن بیشتری دارند. پس از وزن‌دهی به خوشه‌ها، خوشه‌ای که حاصل ضرب فراوانی آن در وزن آن خوشه بیشترین مقدار را دارا باشد، به عنوان خوشه‌ای اصلی انتخاب می‌شود. اگر مرکز این خوشه به عنوان تخمین نهایی معرفی شود، ممکن است خطای زیادی داشته باشد. برای تعیین دقیق‌تر تخمین نهایی، از میانگین داده‌هایی که درون این خوشه قرار دارند، استفاده می‌شود تا خطای کمتری داشته باشد. به این ترتیب خروجی نهایی، میانگین داده‌هایی است که از خوشه اصلی انتخاب می‌شود.

۵- تجزیه و تحلیل

در این بخش از مقاله، نتایج حاصل از بکارگیری روش‌های مختلف تخمین اثر کایزر و روش‌های ترکیبی برای تعیین دقیق‌تر خودکار بر روی ۳۲ آزمایش انتشار اکوستیک انجام شده بر روی ماسه سنگ مورد بحث قرار می‌گیرد. پیاده‌سازی روش‌ها با استفاده از نرم افزار Matlab صورت پذیرفته است. میزان درصد خطای تخمین‌گرهای ساده برای تخمین نقطه کایزر بر اساس هر یک از پارامترهای انتشار اکوستیک محاسبه شده در جدول ۱ آورده شده است. همچنین متوسط خطای هر روش در ستون انتهایی و متوسط خطای استفاده از هر پارامتر در سطر انتهایی



شکل ۵: تابع وزن دهی تخمین گرها.

چنانچه در شکل ۵ مشاهده می‌شود، از یک تابع دوزنقه‌ای برای وزن‌دهی استفاده شده است. دانش زمینه در مورد میزان قابلیت اعتماد به اینکه آیا مقدار واقعی نقطه کایزر در حدود P_G قرار دارد یا خیر، در شکل دوزنقه پدیدار می‌شود. اگر بر اساس دانش زمینه با اعتماد بسیار بالایی بدانیم که نقطه کایزر در وسط $[0, 2P_G]$ رخ می‌دهد، می‌توان عرض ضلع بالایی دوزنقه را کاهش داد، به طوری که شکل نهایی به مثلث میل کند. اما اگر هیچ دانش زمینه‌ای در مورد محل وقوع نقطه کایزر نداشته باشیم، می‌توان ضلع بالایی دوزنقه را تا انتهای دو سر بازه ادامه داد، به طوری که شکل نهایی به یک مستطیل میل کند. در این حالت اگر شکل دوزنقه به شکل مستطیل تبدیل شود، به جای میانگین‌گیری وزن دار، میانگین‌گیری ساده انجام شده است و آنگاه هیچ یک از اعداد تخمینی به دست آمده نسبت به دیگری ارجحیت ندارد. بنابراین روش پیشنهادی برای وزن‌دهی خروجی‌ها وفقی بوده و مطابق با دانش و تجربه افراد خبره قابل تغییر است. در این سیستم، به خاطر اینکه تا حدودی از وقوع نقطه کایزر در مرکز بازه $[0, 2P_G]$ اطمینان وجود دارد، از شکل دوزنقه‌ای با مشخصاتی که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، استفاده می‌شود. روش دیگری برای ترکیب خروجی تخمین‌گرها توسط سیگاری و همکارانش [۱۳] معرفی شده است که بر اساس خوشه‌بندی داده‌ها عمل می‌کند.

در این روش که برای تخمین دقیق‌تر دوره تناوب سیگنال‌ها ارائه شده، ابتدا خروجی تخمین‌گرهای مختلف خوشه‌بندی شده، سپس همانند روش رای اکثریت، خوشه‌ای که بیشترین فراوانی را دارد به عنوان خوشه برنده انتخاب می‌شود. پس از انتخاب خوشه برنده، برای تعیین دقیق خروجی نهایی، از میانگین‌گیری وزن دار برای داده‌های آن خوشه استفاده شده است. این روش، ایده استفاده از رای اکثریت برای ترکیب تخمین‌گرهایی که خروجی آن‌ها در فضای پیوسته است را میسر می‌کند. چرا که با خوشه‌بندی داده‌ها فضای پیوسته به فضای گسسته تبدیل می‌شود. در نتیجه می‌توان از روش رای اکثریت برای انتخاب خوشه برنده استفاده کرد. در روش پیشنهادی نیز از روشی مشابه روش سیگاری و همکارانش استفاده می‌شود. در روش

جدول ۱: میزان درصد خطای روش‌های مختلف برای سیگنال تجمعی پارامترهای انتشار اکوستیک

میانگین خطا	پارامتر				روش
	مدت زمان	انرژی	شمارش	زمان خیز	
۵/۳۱	۵/۱۶	۶/۱۳	۵/۱	۴/۸۴	روش اول
۴۱/۸۱	۴۴/۷۳	۲۳/۱۱	۵۰/۷۲	۴۸/۷	روش دوم
۱۳/۲۵	۱۳/۴۱	۱۶/۷	۱۲/۲۴	۱۰/۶۴	روش سوم
۲۶/۰۵	۲۲/۶۸	۲۱/۳۸	۲۷/۰۵	۳۳/۰۸	روش چهارم
۹/۷۶	۸/۱۹	۱۶/۰۷	۸/۵۶	۶/۲۲	روش پنجم
۱۹/۲۴	۱۸/۸۳	۱۶/۶۸	۲۰/۷۳	۲۰/۷۰	میانگین خطا

جدول ۲: میزان درصد خطای روش‌های مختلف برای سیگنال تجمعی نرخ پارامترهای انتشار اکوستیک

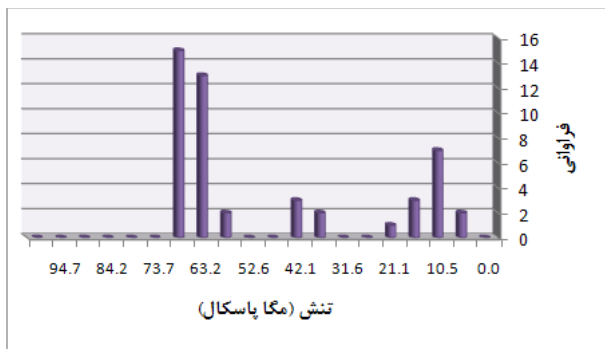
میانگین خطا	پارامتر				روش
	مدت زمان	انرژی	شمارش	زمان خیز	
۵/۳۳	۵/۲۳	۶/۳۶	۴/۶۱	۵/۱۵	روش اول
۴۲/۶۲	۴۵/۳۵	۲۳/۸۵	۴۸/۶۱	۵۲/۶۵	روش دوم
۱۴/۱۷	۱۴/۴۴	۱۷/۴۸	۱۳/۳۳	۱۱/۴۲	روش سوم
۲۰/۰۷	۲۰/۴۷	۲۸/۳۶	۲۶/۱۶	۳۳/۲۸	روش چهارم
۸/۷۴	۸/۷۶	۱۳/۱۰	۹/۰۲	۴/۹۹	روش پنجم
۱۹/۵۸	۱۸/۸۵	۱۷/۸۳	۲۰/۳۴	۲۱/۳۲	میانگین خطا

جدول مذکور درج شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، روش‌های مختلف می‌توانند درصد خطای متفاوتی را بر روی هر یک از پارامترها داشته باشند. به عبارت دیگر هر پارامتر ممکن است برای یک روش بیشتر مناسب باشد و نقطه کایزر با درصد خطای کمتری تخمین زده شود. در بهترین حالت، در روش اول بر اساس پارامتر زمان خیزش کمترین درصد خطا بدست آمده است. همچنین به لحاظ کلی می‌توان گفت بهترین روش، روش اول و بهترین پارامتر پارامتر انرژی بوده است. در بررسی دیگری، به جای استفاده از پارامترهای سیگنال AE، نرخ هر پارامتر استفاده شده است. در جدول ۲ درصد خطای تخمین‌گرهای ساده برای تخمین نقطه کایزر بر اساس نرخ هر یک از پارامترها نشان داده شده است. براساس نتایج، اگرچه همچنان روش اول در میان روش‌ها و پارامتر انرژی در میان پارامترها به ترتیب بهترین روش و پارامتر هستند، اما در بهترین حالت روش اول بر روی نرخ پارامتر شمارش کمترین خطا را داشته است. مقایسه دو جدول ۱ و ۲ نشان می‌دهد که تفاوت چندانی میان استفاده از پارامترهای سیگنال AE و نرخ آن‌ها وجود ندارد.

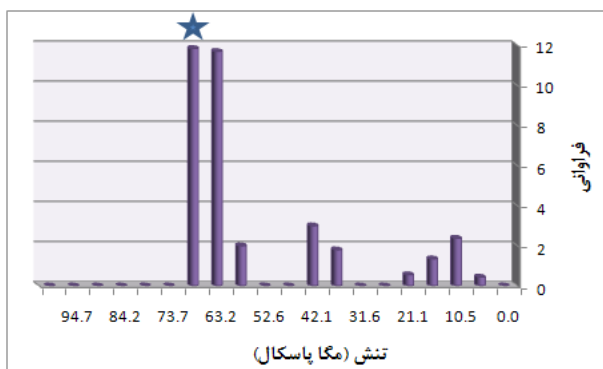
در این تحقیق، سه روش مختلف بکاربرده شده برای ترکیب تخمین‌گرها عبارت بودند از: میانگین‌گیری ساده، میانگین‌گیری وزن‌دار و روش پیشنهادی (ترکیب خوشه‌بندی داده‌ها و میانگین‌گیری وزن‌دار). نتایج این مطالعه و بررسی در جدول ۳ آورده شده است. در جدول مذکور درصد خطای هر یک از روش‌های ترکیب برای هر یک از نمونه‌ها و میانگین و انحراف معیار کلی روش‌ها بر روی تمام نمونه‌ها نشان داده شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود، اگر چه درصد خطای روش‌های مختلف بر روی هر یک از نمونه‌ها متفاوت است، اما در حالت کلی، میانگین خطای روش پیشنهادی نسبت به دو روش دیگر تفاوت معناداری دارد. همچنین روش میانگین‌گیری وزن‌دار برتری نسبی نسبت به میانگین‌گیری ساده دارد. میزان انحراف معیار هر یک از این سه روش نشان می‌دهد که روش پیشنهادی دارای کمترین انحراف معیار بوده و از اطمینان پذیری و پایداری بیشتری برای استفاده در نمونه‌های مختلف برخوردار است. بنابراین چه از جنبه میانگین درصد خطا و چه از جنبه انحراف معیار خطا، روش پیشنهادی از دو روش دیگر عملکرد بسیار بهتری را نشان می‌دهد. به طوری که متوسط خطای روش پیشنهادی در تخمین نقطه کایزر حدود ۳/۷٪ است.

			60KN
۰/۳۶	۱۰/۵۸	۶/۵۳	AE test up to 75KN
۳/۷۰	۱۲/۱۸	۱۳/۶۹	میانگین
۴/۵۸	۸/۸۴	۱۱/۵۰	انحراف معیار

برای درک بهتر روش پیشنهادی ترکیب تخمین‌گرهای ساده، در این قسمت نحوه ترکیب تخمین‌گرها برای نمونه TEST3st13-ch1 مورد بررسی و بحث قرار می‌گیرد. پس از محاسبه محل وقوع نقطه کایزر توسط تخمین‌گرهای مختلف بر روی هر یک از پارامترها، هیستوگرام مقادیر تخمینی در شکل ۶ نشان داده شده است. در شکل مذکور پیدا است که طبق روش رای اکثریت، ستونی از هیستوگرام که بیشترین فراوانی را دارا باشد، به عنوان ستون برنده انتخاب می‌شود، اما پیش از آن باید وزن خوشه‌ها نیز اعمال شود. پس از اعمال وزن خوشه‌ها مطابق آنچه در بخش‌های قبل توضیح داده شد، هیستوگرام وزن‌دار به صورت شکل ۷ بدست می‌آید. حال می‌توان خوشه برنده را بر اساس بیشترین میزان فراوانی وزن‌دار انتخاب نمود. در شکل ۷ خوشه برنده با نماد ستاره مشخص شده است. پس از آن در خوشه برنده، از روش میانگین‌گیری وزن‌دار برای تعیین دقیق‌تر نقطه کایزر استفاده شده است.



شکل ۶: هیستوگرام مقادیر تخمینی نقطه کایزر حاصل از روش‌ها و پارامترهای مختلف (نمونه TEST3st13-ch1).



شکل ۷: هیستوگرام وزن‌دار مقادیر تخمینی نقطه کایزر حاصل از روش‌ها و پارامترهای مختلف (نمونه TEST3st13-ch1).

پس از انجام میانگین‌گیری وزن‌دار در خوشه برنده، مقدار

جدول ۳: درصد خطای روش‌های مختلف ترکیب بر روی داده‌های آزمایش‌های انتشار اکوستیک

شماره نمونه	روش		ترکیب خوشه بندی و میانگین‌گیری ی وزن‌دار
	میانگین‌گیری ی ساده	میانگین‌گیری ی وزن‌دار	
TEST2b8x,ch1	۵/۵۹	۹/۸	۱/۲۸
TEST2b8x,ch2	۱۱/۲۹	۴/۶۷	۰/۰۶
TEST1b14xz, ch1	۰/۲۵	۵/۴۳	۱۵/۱۳
TEST1b14xz, ch2	۲/۱۲	۶/۳۳	۳/۳۵
TEST1b14y, ch1	۴/۹۵	۲۰/۷۸	۹/۵۲
TEST1b14y, ch2	۱۱/۶۸	۱۷/۳۸	۹/۳۶
TEST2st11,ch 1	۸/۰۹	۰/۵۷	۳/۴۳
TEST2st11,ch 2	۰/۱۳	۱/۳۵	۵/۸۱
TEST2st13,ch1	۵۲/۴۶	۳۵	۲/۹۷
TEST2st13,ch2	۲/۵۸	۰/۹۸	۳/۰۶
TEST3st13,ch1	۲۱/۷۴	۱۶/۶۵	۱
TEST3st13,ch2	۱۴/۸۲	۱۲/۳۵	۶/۱۳
TEST2st15,ch1	۱۷/۹۶	۹/۰۳	۴/۵
TEST2st15,ch2	۱۱/۶۷	۱۱/۵۶	۵/۹۷
TEST2st17,ch1	۵/۳۵	۵/۴۱	۲/۹۹
TEST2st17,ch2	۹/۲۲	۸/۸۷	۳
TEST3st17,ch1	۱۸/۲۷	۱۳/۸۷	۰/۲۹
TEST3st17,ch2	۲۴/۲۸	۱۸/۱۲	۰/۶۴
TEST2stu1,ch2	۹/۰۶	۷/۷۶	۱/۷۲
TEST2stu1,ch3	۸/۴۷	۶/۴۸	۱/۰۸
TEST 3stu1,ch2	۳۹/۰۱	۳/۰۸	۲۰/۸۸
TEST stu1,ch3	۳/۷۷	۵/۹۶	۶/۲۱
TEST stu1,ch3	۱۰/۹۹	۱۹/۵	۲/۶۹
TEST6stu1,ch1	۱۷/۲۶	۱۴/۴۹	۱/۱۷
TEST6stu1,ch2	۱۴/۰۷	۱۴/۵۵	۰/۷۳
TEST6stu1,ch3	۳۵/۶۴	۳۷/۱۳	۰/۰۳
TEST9stu1, ch1	۱۱/۱۱	۱۲/۸۹	۱/۱۱
TEST9stu1, ch2	۱۸/۴۷	۱۹/۹۱	۰/۷۷
TEST9stu1, ch3	۲۰/۴۹	۲۴/۵۲	۱/۹۴
up to 35KN .#1	۷/۴۱	۱۱/۸۶	۰/۱۶
AE test up to	۳/۵۷	۳/۰۲	۱/۳۶

انتشار اکوستیک به دست آمده از آزمایش‌های انتشار اکوستیک انجام شده بر روی نمونه‌های پیش بارگذاری شده است و ماسه-سنگ تحت شرایط تک‌محوره به کار برده شد. نتایج بیان‌گر آن است که از روش‌های شناسایی الگو و روش پیشنهادی می‌توان برای تعیین و شناسایی نقطه اثر کایزر با دقت قابل قبولی استفاده کرد. در روش ارائه شده از پارامترهای اصلی سیگنال‌های انتشار اکوستیک شامل انرژی، شمارش، زمان خیز و مدت زمان استفاده شده است. پارامترهای ذکر شده در برگیرنده ساز و کار منشاء انتشار موج نبوده با این وجود توافق بسیار مطلوبی در نتایج روش پیشنهادی ترکیب خوشه‌بندی و میانگین‌گیری وزن دار بدست آمده است. ساز و کار و الگوی پیشنهادی برای استفاده در تحقیقات مشابه سایر سنگ‌ها نیز می‌تواند قابل استفاده و مفید واقع شود.

۷- تشکر و قدردانی

همکاری آقای مهندس محمد حسین سیگاری دانشجوی دکترا کامپیوتر در پیاده سازی برنامه‌ها شایسته قدردانی فراوان است.

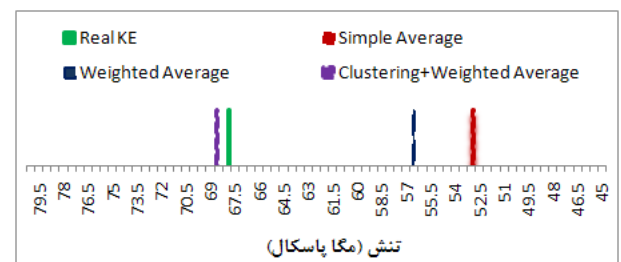
منابع

- [1]. A. Lavrov., "Fracture-induced physical phenomena and memory effects in rocks: A Review", Strain Journal, 41, pp. 135-149, 2005.
- [2]. Lavrov. A., "The Kaiser Effect in rocks: principles and stress estimation techniques", Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci., PP. 151-171, 2003.
- [3]. Li. C., "A theory for the Kaiser Effect in rocks and its potential applications", Proceedings of the Sixth Conference. AE/MA in Geologic Structures and Materials, pp. 171-85, 1998.
- [4]. D.J. Holcomb, "General theory of the Kaiser Effect" Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 30, pp. 929-935, 1993.
- [5]. Eberhardt, D. Stead, B. Stimpson, and R.S. Read, "Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock", Can. Geotech. J. 35, pp. 222-233, 1998.
- [6]. Tang, Z. H. Chen, X. H. Xu, and C. Li, "A theoretical model for Kaiser Effect in rock", j. Pure appl. Geophys, pp. 203-215, 1997.
- [7]. Vervoort. A., "Effect of tri-axial loading and unloading on fracturing of rock", Rock Stress, Balkema, 2003.
- [8]. Tuncay. E., Ulusay. R., "Relation between Kaiser Effect levels and pre-stresses applied in the laboratory", Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci., pp. 524-537, 2008.
- [9]. Momayez, M. and Hassani, F. P., "Application of Kaiser Effect to measure in-situ stresses in

نهایی برای نقطه کایزر ۶۸/۶۸ مگاپاسکال بدست می‌آید. این در حالی است که مقدار پیش بارگذاری، که به عنوان نقطه مبنای مقایسه و نقطه اثر کایزر نزدیک به مقدار واقعی در نظر گرفته شده برای این نمونه در نقطه ۶۸ مگاپاسکال رخ می‌دهد. در جدول ۴ نتایج روش‌های ترکیب مختلف برای این نمونه نشان داده شده است. در این جدول مقدار نهایی بدست آمده از هر روش، قدرمطلق خطا و درصد خطا نسبت به مقدار نزدیک به مقدار واقعی (تنش پیش بارگذاری شده) مشاهده می‌شود. مطابق نتایج این جدول، روش پیشنهادی کمترین خطا را در تخمین نقطه کایزر دارد. در شکل ۸ به طور گرافیکی مقدار تخمینی روش‌های مختلف ترکیب نشان داده شده است. همچنین می‌توان به صورت دیداری نیز میزان خطای هر روش نسبت به مقدار واقعی را مشاهده کرد.

جدول ۴: مقایسه درصد خطای روش‌های مختلف ترکیب تخمین گرها (نمونه TEST3st13-ch1)

روش	پارامتر	
	تنش اثر کایزر (مگاپاسکال)	درصد خطا
میانگین‌گیری ساده	۵۳/۲۱	۲۱/۷۴
میانگین‌گیری وزن دار	۵۶/۶۷	۱۶/۶۵
ترکیب خوشه‌بندی و میانگین‌گیری وزن دار	۶۸/۶۸	۱/۰



شکل ۸: نمایش گرافیکی میزان خطای روش‌های مختلف ترکیب تخمین گرها نسبت به مقدار واقعی نقطه کایزر

۶- نتیجه گیری

در مقاله حاضر روش‌های مختلف ارزیابی و تعیین نقطه اثر کایزر، بر روی داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های انتشار اکوستیک مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق یک روش ترکیبی به منظور تشخیص و انتخاب نقطه اثر کایزر مبتنی بر روش‌های شناسایی الگو ارائه شد. در این راستا از داده‌های

<p>rise time ^۴ duration ^۵ Hit Rate ^۶ Maximum curvature method ^۷ Bayesian Classifier ^۸ K-Nearest neighbor (KNN) ^۹ Gaussian Mixture Model (GMM) ^{۱۰} Hidden Markov Model (HMM) ^{۱۱} Artificial Neural Networks (ANN) ^{۱۲} Support Vector Machine (SVM) ^{۱۳} Combining Classifiers ^{۱۴} Fusion of Classifiers ^{۱۵} Ensemble Classifiers ^{۱۶} Majority Voting ^{۱۷} Unanimity ^{۱۸} Simple Majority Vote ^{۱۹} Plurality Vote ^{۲۰} Averaging Simple ^{۲۱} Weighted Averaging ^{۲۲} Outlier ^{۲۳}</p>	<p><i>underground mines</i>”, Rock Mechanics, Balkema, Rotterdam pp. 979–987, 1992. [10]. Villaescusa. E., Seto, M.G. Baird, “<i>Stress measurements from oriented core</i>” Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci. 39, pp. 603-615, 2002 [11]. Richard O. Duda, Peter E. Hart, David G. Stork, “<i>Pattern classification</i>”, second edition, Wiley Interscience, 2001. [12]. Kuncheva. Ludmila I., “<i>Combining pattern classifiers, Methods and Algorithms</i>, Wiley Interscience, 2004. [13]. Sigari, M.H, Sigari, M. H, Nasirzadeh, M, “Period Estimation in [14]. Noisy Semi-Periodic Signals using Ensemble Estimators and Isodata [15]. Clustering Algorithm”, 2nd Iranian Data Mining Conference (IDMC), Tehran, Iran, November 2008.</p>
---	---

Acoustic emission-AE ^۱
 dislocations ^۲
 count ^۳