

محاسبه نسبت فلیسیتی برای نمونه فیلیت با زاویه‌های آنیزوتروپی مختلف در آزمایش تک‌محوره

مهدی خرقانی^۱، کامران گشتاسبی^{۲*}، مجید نیکخواه^۳، کاوه آهنگری^۱

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

۲. دانشگاه تربیت مدرس، گروه مهندسی معدن،

۳. دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

پذیرش ۹۹/۱۲/۰۲

دریافت ۹۹/۰۴/۰۷

چکیده

استفاده از پدیده اثر کایزر طی آزمایش انتشار آکوستیک یک روش نوین به منظور محاسبه میزان تنش برجا در سنگ است که به علت کاهش چشم‌گیر در هزینه و زمان محاسبه تنش برجا، استفاده روزافزونی داشته است. نسبت فلیسیتی معیار دقیق و مناسبی برای بررسی میزان دقت و وضوح در محاسبه اثر کایزر است. عوامل متعددی بر دقت محاسبه تنش اثر کایزر تأثیر دارند. این مقاله تأثیر آنیزوتروپی روی اثر کایزر در سنگ را بررسی می‌کند. بدین منظور انتشار آکوستیک روی نمونه‌های تک‌محوره از جنس فیلیت با زوایای آنیزوتروپی مختلف ارزیابی می‌شود. اثر کایزر سنگ فیلیت برای زوایای ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه محاسبه می‌شود. نتایج آزمایش نشان می‌دهند که در همه نمونه‌ها با زوایای آنیزوتروپی مختلف میزان نسبت فلیسیتی به یک نزدیک است و مقادیر نسبت فلیسیتی در زوایای مختلف آنیزوتروپی اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند. هم‌چنین دقت آزمایش‌های تک‌محوره برای تعیین اثر کایزر بالا است.

واژه‌های کلیدی: انتشار آکوستیک، اثر کایزر، سنگ آنیزوتروپ، نسبت فلیسیتی، سنگ فیلیت

مقدمه

استفاده از انتشار آکوستیک در علوم مهندسی و در مکانیک سنگ با توجه به جنبه‌های مختلف آن در حال گسترش است. سنگ وقتی تحت تنش قرار می‌گیرد، از خود سیگنال‌های آکوستیک منتشر می‌کند، این پدیده انتشار آکوستیک نامیده می‌شود. یکی از کاربردهای این روش اندازه‌گیری تنش برجا با استفاده از پدیده اثر کایزر است. اثر کایزر به‌عنوان فقدان انتشار آکوستیک در سطوح تنش پایین‌تر از تنش بیشینه اعمال شده قبلی تعریف می‌شود. اثر کایزر اولین بار در دهه ۱۹۵۰ به وسیله ژوزف کایزر مشاهده شد [۱]. بعد از آن گودمن در سال ۱۹۶۳ نشان داد که اثر کایزر را در سنگ نیز می‌توان مشاهده کرد. برای تعیین اثر کایزر می‌توان از پارمترهای مختلف آکوستیک از قبیل شمارش، انرژی، دامنه و غیره، استفاده کرد [۲]. تنش‌سنجی با استفاده از این روش در آزمایشگاه و با هزینه کم، نسبتاً آسان و سریع انجام می‌شود. با توجه به مزایای مذکور، در دهه‌های اخیر بررسی‌های بیش‌تری در این زمینه انجام شده و عوامل مؤثر بر اثر کایزر بررسی شده است.

لی و نوردلاند پژوهشی آزمایشگاهی بر اثر کایزر در سنگ‌ها در آزمایش تک‌محوره روی چندین نمونه گرانیتهی انجام دادند. در این تحقیق تأثیر زمان تأخیر بین سیکل‌های بارگذاری و زمان توقف بر اثر کایزر را بررسی شد [۳]. ستو و ویلاسکوزا از روش انتشار آکوستیک برای تعیین میزان تنش برجا در معدنی در استرالیا استفاده کرده و نتایج را با نتایج

*نویسنده مسئول: goshtasb@modares.ac.ir

حاصل از روش بیش‌مغزه‌گیری مقایسه کردند [۴]. هسیه و همکارانش نشان دادند که اثر کایزر زمانی قابل مشاهده است که تنش قبلی در محدوده‌ای معین از تنش باشد و این محدوده در نمونه‌های مختلف متفاوت است [۵]. فو و همکاران نشان دادند که به‌غیر از تنش فشاری موجود، تنش کششی موجود در مرمر را می‌توان با استفاده از روش اثر کایزر اندازه‌گیری کرد [۶]. زیانچیان و همکاران فناوری انتشار آکوستیک در کشش دینامیکی تک‌محوره را بررسی کردند. اثر کایزر عمدتاً سطح آسیب داخلی نمونه‌های بتن را مشخص می‌کند [۷]. چن و همکاران آزمایش برزیلی را بر روی نمونه‌های گرانیت با بارگذاری دوره‌ای به‌همراه افزایش دامنه تنش انجام دادند. نتایج آزمایشگاهی وجود اثر کایزر در سنگ‌های تحت کشش را تأیید می‌کند [۸]. سینگ و همکاران یک روش برای تشخیص رفتار خزشی سنگ نمکی با استفاده از دستگاه تست فشار معرفی کردند. انتشار آکوستیک برای تشخیص رفتار سنگ نمکی استفاده شده است [۹]. ژائو و همکاران انتشار آکوستیک بار دوره‌ای تک‌محوره ماسه‌سنگ و گل سنگ را آزمایش کردند. ویژگی‌های تغییر شکل و خرابی، و قانون حاکم بر انتشار آکوستیک بررسی شد [۱۰]. منگ و همکاران قوانین تکاملی انتشار آکوستیک دوره‌ای با تغییرات تنش- کرنش سنگ در مراحل بارگذاری و باربرداری را تجزیه کردند. تأثیر افزایش چشم‌گیر در مقیاس رویدادهای انتشار آکوستیک بر اثر فلیسیتی بررسی شد [۱۱]. سان و همکاران ارتباط بین تنش و داده انتشار آکوستیک را با استفاده از روش‌های تئوری فراکتال و الگوریتم‌های گرسبرگر- پروکاکیا برای ارزیابی آسیب و درجه نقص زغال سنگ و تخته سنگ تحت بارگذاری دینامیکی چند سطحی محاسبه کردند [۱۲]. ژو و همکاران اثر آب را در فرایند شکست سنگ بررسی کردند. فعالیت ترک‌های سنگ‌های اشباع شده در نواحی کلیدی تنش ارزیابی می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که آب باعث افزایش خاصیت انعطاف‌پذیری و خزش سنگ می‌شود [۱۳]. دکسینگ و همکاران برای مشاهده پیش‌سازهای آسیب براساس شاخص‌های متعدد انتشار آوایی، آزمایش‌های بارگذاری-باربرداری روی نمونه‌های گرانیت و مرمر را انجام دادند. نتایج نشان می‌دهد نسبت فلیسیتی یک معیار برای آسیب سنگ و به‌صورت معکوس با میزان آسیب مواد متناسب است [۱۴]. ما و همکاران مکانیسم‌های انتشار ترک و شکست مواد شکننده در آزمایش‌های برزیلی را بررسی کردند. شبیه‌سازی انتشار آکوستیک در روش المان مجزا انجام می‌گیرد. تانسورهای ممان به‌طور مستقیم به‌وسیله نیروها و حرکت ذرات محاسبه و به قسمت‌های ایزوتروپیک و انحرافی تبدیل شدند [۱۵]. تیان و همکاران اثر فلیسیتی را در بارگذاری سیکلی تک‌محوره برای تعیین محدوده پایین‌تری از آستانه تنش ترک بررسی کردند، براساس سیگنال‌های انتشار آکوستیک، رابطه بین پارامتر آسیب و نسبت فلیسیتی در مراحل مختلف رشد ترک ارزیابی شد [۱۶]. گجست و همکاران نشان دادند که انتشار آکوستیک اندازه‌گیری شده در نمونه‌های سنگ به فراوانی آسیب بستگی دارد. اثر کایزر با تطبیق بین شروع سیگنال‌های آکوستیک و رشد آسیب تحت بارگذاری سیکلی تعیین می‌شود [۱۷].

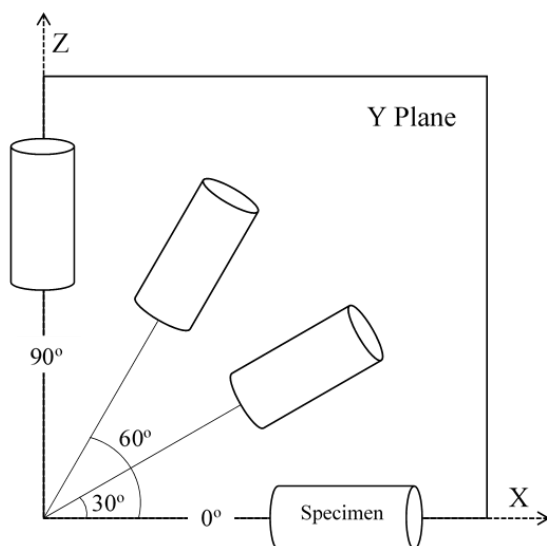
با بررسی ادبیات گذشته مشاهده می‌شود که تاکنون آنیزوتروپی که عاملی مؤثر بر مقاومت، نحوه شکست و بسیاری پارامترهای دیگر سنگ است، بررسی نشده است. در این مقاله به انتشار آکوستیک نمونه‌های آنیزوتروپ با زوایای مختلف پرداخته و تأثیر آنیزوتروپی نمونه‌های تک‌محوره به‌وسیله اثر کایزر را بررسی می‌کنیم.

مجموعه آزمایش

آماده‌سازی نمونه‌ها

همه نمونه‌های این تحقیق از جنس فیلیت هستند که از زون زمین‌شناسی سنج-سیرجان که در ۵ کیلومتری شرق شهر سقز واقع شده است، برداشت شده‌اند. مغزه‌گیری از نمونه‌های بلوکی در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشکده

معادن دانشگاه تربیت مدرس و همه آزمایش‌ها در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود انجام گرفت. برای انجام آزمایش‌های انتشار آکوستیک روی نمونه فیلیت در هر زاویه آنیزوتروپی دو مغزه تهیه شد زوایای آنیزوتروپی عبارتند از ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه. تصویری شماتیک از نحوه مغزه‌گیری از بلوک سنگ در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. تصویری شماتیک از نحوه مغزه‌گیری از بلوک سنگی

نمونه‌های استوانه‌ای با قطر بین ۵۳/۱ و ۵۳/۷ میلی‌متر و نسبت ارتفاع و به قطر بین ۲ تا ۲/۳ برابر قطر است. نمونه‌ها برای چهار زاویه ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه آماده‌سازی شدند. در مقاله نمونه‌های استوانه‌ای با نماد SC مشخص می‌شوند. تعدادی از نمونه‌های آماده‌سازی شده در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. نمونه‌های استوانه‌ای آماده‌سازی شده

تجهیزات و روش

دستگاه استفاده شده در این آزمایش برای بارگذاری نمونه‌ها یک دستگاه اعمال بار به صورت فشاری ساخت شرکت کنترلز ایتالیا مدل C53B02 و تولید سال ۲۰۱۶ است. این دستگاه وزنی حدود ۱ تن و ظرفیت حداکثر نیروی ۳۰۰۰ کیلو نیوتن را دارد و می‌تواند بارگذاری‌های تراکمی را روی نمونه‌ها اعمال کند.

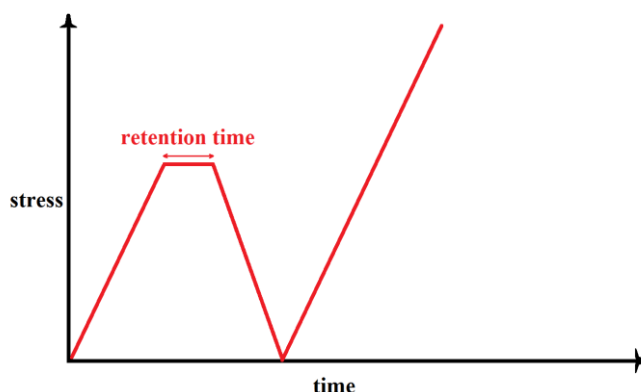
دستگاهی که برای انجام آزمون انتشار آکوستیک استفاده شده است، سیستم انتشار آکوستیک AMSY-6 است که ساخت شرکت Vallen System GmbH از کشور آلمان است. سنسورها دارای محدوده فرکانس رزونانس ۱۵۰ کیلو هرتز است. این سیستم قابلیت نمایش هم‌زمان نمودارهای انتشار آکوستیک را روی کامپیوتر دارد. سیستم AMSY-6، جدیدترین نسل از دستگاه‌های اندازه‌گیری دیجیتال انتشار آکوستیک شرکت Vallen از سال ۱۹۸۵ تاکنون است. سیستم AMSY-6 چند کانال دارد که به‌طور موازی با هم کار می‌کنند. هر کانال به‌طور مجزا همه فرآیندهای دریافت موج، تقویت موج و پردازش را انجام می‌دهد. به‌ازای هر کانال یک سنسور، پیش‌تقویت‌کننده و کابل انتقال داده وجود دارد. وظیفه سنسور دریافت سیگنال و تبدیل آن به سیگنال‌های الکتریکی است، که به‌وسیله پیش‌تقویت‌کننده، تقویت اولیه شده و با استفاده از کابل ارتباطی به دستگاه منتقل می‌شود. در دستگاه این سیگنال‌ها به داده‌های دیجیتال تبدیل می‌شوند. در شکل ۳ نحوه قرارگیری نمونه‌های تک‌محوره تحت بارگذاری و هم‌چنین اتصال سنسورهای آکوستیک نشان داده شده است.



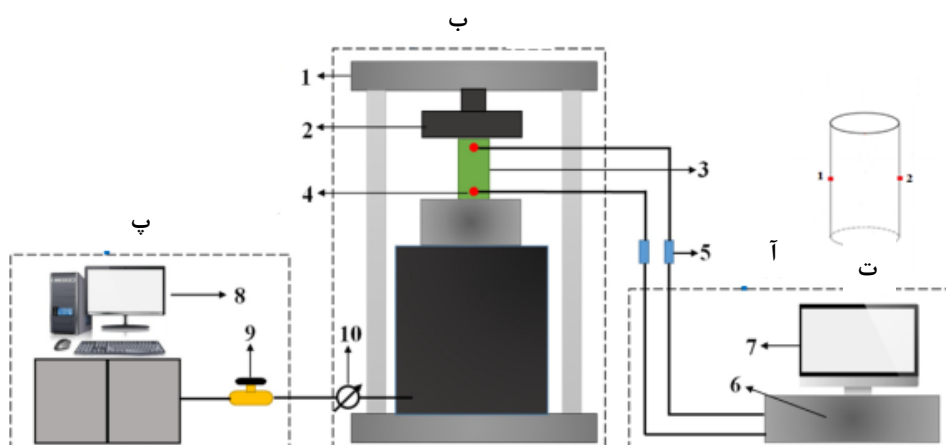
شکل ۳. نحوه قرارگیری و نصب سنسورهای آکوستیک

پس از آماده سازی نمونه‌ها، به‌منظور تعیین سطح تنش پیش‌بارگذاری در آزمایش‌های آکوستیک، آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری تک‌محوره روی آنها انجام شد. پس از تعیین سطح تنش پیش‌بارگذاری، سنسورهای آکوستیک روی نمونه‌ها نصب شدند و نمونه‌ها تحت بارگذاری قرار گرفتند. ابتدا نمونه‌ها تا سطح تنش پیش‌بارگذاری تعیین شده، بارگذاری شدند. سپس بار به‌طور کامل برداشته شده و پس از آن تا سطح تنشی بیش‌تر از میزان تنش قبلی، مورد بارگذاری قرار گرفتند. در شکل ۴ پروتکل بارگذاری استفاده شده در این تحقیق نشان داده شده است. زمان نگاه‌داری

بار در این تحقیق صفر در نظر گرفته شده است. به‌طور هم‌زمان داده‌های آکوستیک و داده‌های میزان بار وارده ثبت شدند (شکل ۵). میزان حد آستانه برابر با ۴۵ دسی بل تنظیم شد.



شکل ۴. پروتکا، بارگذاری



شکل ۵. سیستم آزمایش، (آ) سیستم پردازش داده‌های آکوستیک، (ب) سیستم بارگذاری، (پ) سیستم کنترل بارگذاری، (ت) تصویر شماتیک از نحوه جانمایی سنسورها، (۱) سیستم بارگذاری، (۲) فک، (۳) نمونه سنگی، (۴) سنسورهای آکوستیک، (۵) پیش تقویت‌کننده‌ها، (۶) سیستم جمع‌آوری داده آکوستیک، (۷) کامپیوتر جهت نمایش داده‌های آکوستیک، (۸) کامپیوتر جهت نمایش و کنترل بارگذاری، (۹) شیر تنظیم، (۱۰) سیستم سنجش فشار

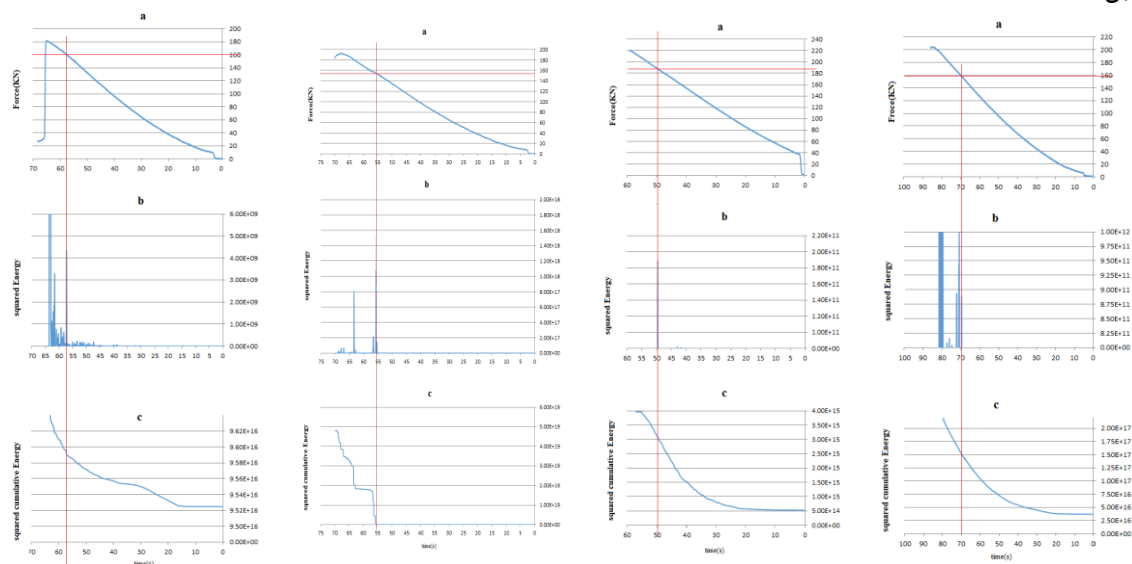
نتایج آزمایشگاهی

برای پیدا کردن نقطه اثر کایزر، پارامتر انرژی بررسی شد. هنگامی که پارامتر انرژی به‌طور چشم‌گیری شروع به افزایش می‌کند، آن نقطه به‌عنوان نقطه اثر کایزر مد نظر قرار می‌گیرد.

در شکل‌های ۶ تا ۱۳ نتایج حاصل از آزمایش بارگذاری تک‌محوره بر نمونه‌های استوانه‌ای به نمایش گذاشته شده‌اند. همه شکل‌های ترسیم شده شامل سه نمودار هستند، نمودار a نمودار بارگذاری بر حسب زمان را نشان

می‌دهد، نمودار b نمودار انرژی به‌توان دو و نمودار c انرژی تجمعی به‌توان دو است. علت به‌توان دو رساندن پارامتر انرژی این است که تغییرات با وضوح بیشتری دیده شود.

چنان‌که در شکل ۶ که مربوط به نمونه sc1-0 است، مشاهده می‌شود در قسمت b یک افزایش ناگهانی در مقدار پارامتر انرژی در ثانیه ۶۹ رخ داده است در قسمت c نیز شیب نمودار در همین زمان بیش‌ترین مقدار خود را دارد. که نشان‌دهنده آن است که در این زمان اثر کایزر رخ داده است. در شکل ۸ که مربوط به نمونه sc1-30 است قسمت b افزایش ناگهانی پارامتر انرژی در ثانیه ۵۶ رخ داده است. چنان‌که مشاهده می‌شود تا قبل از این زمان پارامتر انرژی مقادیر چشم‌گیری را به‌خود اختصاص نداده و در این زمان یک افزایش قابل توجه در این پارامتر مشاهده می‌شود در قسمت c نیز در همین زمان افزایش ناگهانی در مقادیر نمودار تجمعی انرژی مشاهده می‌شود. در شکل ۱۰ که مربوط به نمونه sc1-60 است قسمت b و c تا قبل از ثانیه ۸۷ داده آکوستیک چشم‌گیری مشاهده نمی‌شود در ثانیه ۸۷ ام افزایش شدید پارامتر انرژی نشان‌دهنده رخداد اثر کایزر در این زمان است. در شکل ۱۲ که مربوط به نمونه sc1-90 است نیز مشاهده می‌شود که در ثانیه ۴۲ نمودار انرژی و انرژی تجمعی شروع به افزایش می‌کند و این افزایش تا رسیدن به نقطه شکست ادامه می‌یابد از این‌رو، پدیده اثر کایزر در ثانیه ۴۱ رخ داده است. در سایر نمونه‌ها نیز این روند قابل مشاهده است.

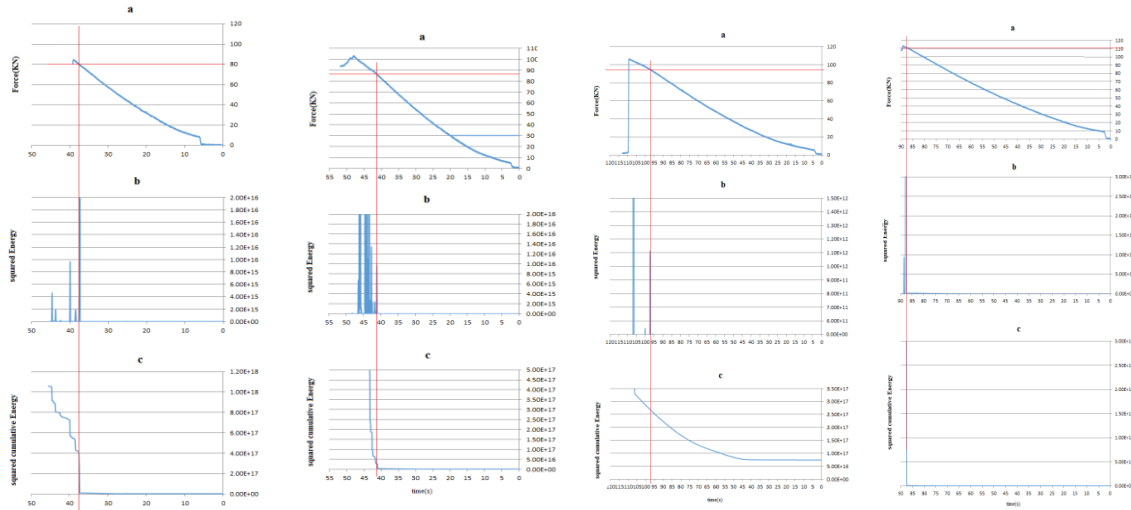


شکل ۶. نمودار بارگذاری، انرژی و انرژی تجمعی بر حسب زمان برای نمونه sc1-0

شکل ۷. نمودار بارگذاری، انرژی و انرژی تجمعی بر حسب زمان برای نمونه sc2-0

شکل ۸. نمودار بارگذاری، انرژی و انرژی تجمعی بر حسب زمان برای نمونه sc1-30

شکل ۹. نمودار بارگذاری، انرژی و انرژی تجمعی بر حسب زمان برای نمونه sc2-30



شکل ۱۰. نمودار بارگذاری، انرژی و انرژی تجمعی بر حسب زمان برای نمونه sc1-60

شکل ۱۱. نمودار بارگذاری، انرژی و انرژی تجمعی بر حسب زمان برای نمونه sc2-60

شکل ۱۲. نمودار بارگذاری، انرژی و انرژی تجمعی بر حسب زمان برای نمونه sc1-90

شکل ۱۳. نمودار بارگذاری، انرژی و انرژی تجمعی بر حسب زمان برای نمونه sc2-90

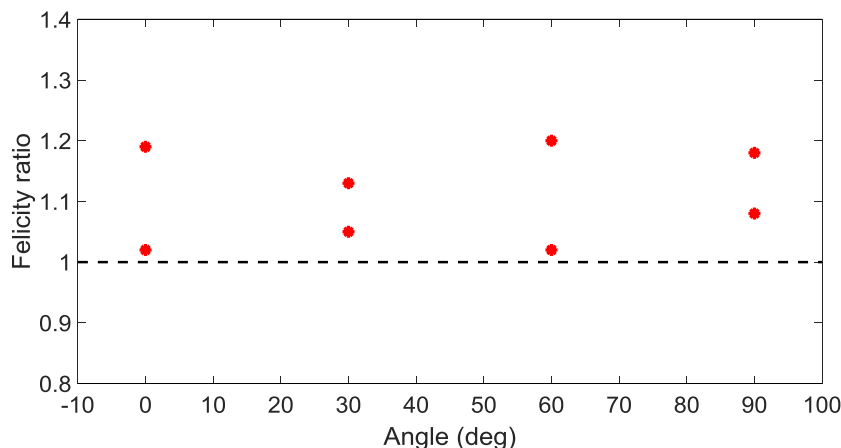
نسبت فلیسیتی عبارت است از نسبت تنش اثر کایزر به تنش قبلی وارد شده بر نمونه. این نسبت معیار دقیق و مناسبی برای بررسی میزان دقت و وضوح در محاسبه اثر کایزر است [۳]. نسبت فلیسیتی بیان‌گر دقت در اثر کایزر است و علاوه بر این می‌توان از نسبت فلیسیتی به‌عنوان اندازه‌گیری درجه شکست اثر کایزر استفاده کرد. اگر $FR < 1$ باشد، اثر فلیسیتی وجود دارد و اگر $FR > 1$ ، اثر کایزر وجود دارد. هرچه FR به ۱ نزدیک‌تر شود، توانایی حافظه تنش بهتر است. به‌طورکلی هرچه نسبت فلیسیتی کوچک‌تر باشد، آسیب یا نقص آن نیز بدتر خواهد شد. در جدول ۱ مقادیر نسبت فلیسیتی برای نمونه‌ها مشخص شده‌اند. همچنین، زمان وقوع اثر کایزر، مقدار باری که اثر کایزر در آن رخ داده است و مقدار بار پیش‌بارگذاری ارائه شده است. برای مثال: اثر کایزر برای نمونه sc1-30 در ثانیه ۵۶ رخ داده است و میزان نسبت فلیسیتی ۱/۰۵ است.

جدول ۱. نسبت فلیسیتی نمونه‌ها در زوایای مختلف آنیزوتروپی در آزمایش تک‌محوره

نمونه	زمان رخداد اثر کایزر (s)	مقدار بار اثر کایزر (kN)	مقدار بار پیش بارگذاری (kN)	نسبت فلیسیتی (FR)
sc1-0	69	158	155	1.02
sc2-0	49	185	155.1	1.19
sc1-30	56	150	143	1.05
sc2-30	57	160.1	141.9	1.13
sc1-60	87	111	92.5	1.2
sc2-60	97	93.7	92.2	1.02
sc1-90	41	86.1	72.9	1.18
sc2-90	38	79.2	73.1	1.08

نمودار نسبت فلیسیتی برحسب زوایای مختلف در شکل ۱۴ به نمایش گذاشته شده‌است. چنان‌که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، نسبت فلیسیتی برای تمامی نمونه‌ها در آزمایش‌های تک‌محوره به یک نزدیک است و اختلاف نسبت

فلیسیتی در نمونه‌های مختلف نیز کم است. این موضوع نشان‌دهنده آن است که زاویه آنیزوتروپی تأثیر چندانی در دقت تعیین اثر کایزر ندارد. در این نمونه‌ها میزان درصد خطای نسبی نیز به صفر نزدیک است. بنابراین، تعیین اثر کایزر با دقت زیادی صورت گرفته است.



شکل ۱۴. نمودار نسبت فلیسیتی بر حسب زوایا برای آزمایش تک‌محوره نمونه‌ها

نتیجه‌گیری

یک روش مفید برای تخمین میزان تنش برجا در سنگ، استفاده از اثر کایزر در پدیده انتشار آکوستیک است. با توجه به بررسی مطالعات گذشته، این مقاله تأثیر آنیزوتروپی بر اثر کایزر را مبنا قرار داده است و نمونه‌های تک‌محوره از جنس فیلیت با زوایای آنیزوتروپی مختلف به‌وسیله انتشار آکوستیک بررسی شده‌اند. در آزمایش‌های تک‌محوره در تمامی نمونه‌ها با زوایای آنیزوتروپی مختلف میزان نسبت فلیسیتی به یک نزدیک است و مقادیر نسبت فلیسیتی در زوایای مختلف آنیزوتروپی اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند. بنابراین، دقت آزمایش‌های تک‌محوره به‌منظور تعیین اثر کایزر بالا است.

منابع

1. Kaiser J., "An investigation into the occurrence of noises in tensile tests, or a study of acoustic phenomena in tensile tests", Unpublished Doctoral Thesis, Tech. Hosch, Munich, (1950).
2. Lavrov A., "Kaiser effect observation in brittle rock cyclically loaded with different loading rates", *Mechanics of Materials*, 33 (2001) 669-677.
3. Li C., Nordlund E., "Experimental verification of the Kaiser effect in rocks", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 26 (1993) 333-351.
4. Seto M., Villaescusa E., "In Situ Stress Determination by Acoustic Emission Techniques from McArthur River Mine Cores", *Proceedings 8th Australia New Zealand Conference on Geomechanics, Australia*, (1999) 929-934.

5. Hsieh A., Dight P., Dyskin A.V., "The rock stress memory unrecoverable by the Kaiser effect method", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 75 (2015) 190-195.
6. Fu X., Xie Q., Liang L., "Comparison of the Kaiser effect in marble under tensile stresses between the Brazilian and bending tests", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74 (2015) 535-543.
7. Xiangqian F., Shaowei H., Jun L., Congjie W., "Acoustic emission properties of concrete on dynamic tensile test", *Construction and Building Materials*, 114 (2016) 66-75.
8. Chen Y., Muhammad Irfan M., Song C., "Verification of the kaiser effect in rocks under tensile stress: Experiment using the Brazilian test", *International Journal of Geomechanics*, 18 (2018) 04018059.
9. Singh A., Kumar C., Kannan L. G., Rao K. S., Ayothiraman R., "Estimation of creep parameters of rock salt from uniaxial compression tests", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 107 (2018) 243-248.
10. Zhao G., Wang C., Liang D., "Comparative experimental studies of acoustic emission characteristics of sandstone and mudstone under the impacts of cyclic loading and unloading", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 14 (2018) 1550147718795552.
11. Meng Q., Zhang M., Han L., Pu H., Chen Y., "Acoustic emission characteristics of red sandstone specimens under uniaxial cyclic loading and unloading compression", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51 (2018) 969-988.
12. Sun H., Liu X. L., Zhu J. B., "Correlational fractal characterisation of stress and acoustic emission during coal and rock failure under multilevel dynamic loading," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 117 (2019) 1-10.
13. Zhu J., Deng J., Huang Y., He Z., "Influence of Water on the Fracture Process of Marble with Acoustic Emission Monitoring", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23 (2019) 3239-3249.
14. Dexing L., Enyuan W., Xiangguo K., Haishan J., Dongming W., Muhammad A., "Damage precursor of construction rocks under uniaxial cyclic loading tests analyzed by acoustic emission", *Construction and Building Materials*, 206 (2019) 169-178.
15. Ma J., Wu S., Zhang X. P., Gan Y., "Modeling acoustic emission in the Brazilian test using moment tensor inversion", *Computers and Geotechnics*, 123 (2020) 103567.
16. Tian Y., Yu R., Zhang Y., "Application of Felicity Effect in Crack Stress Identification and Quantitative Damage Assessment of Limestone", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, (2020) 1-7.

17. Gajst H., Shalev E., Weinberger R., Marco S., Lyakhovsky V., "Relating strain localization and Kaiser effect to yield surface evolution in brittle rocks", *Geophysical Journal International*, 221 (2020) 2091-2103.