بررسی اثر زمان تأخیر در اندازه‌گیری تنش برجا به‌کمک اثر کایزر با استفاده از روش انتشار آوایی

محمود خسروی کارشک، مرتضی احمدی*؛
دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مکانیک سنگ

تاریخ: دریافت ۹۲/۷/۲۰ پذیرش ۹۳/۱۰/٤

چکیده

مقدار تنش برجا از پارامترهای مهم در طراحی سازه‌های زیرزمینی است. روش‌های متداول اندازه‌گیری تنش برجا مانند روش شکست هیدرولیکی دو ضعف عمدهٔ الف) زمان زیاد و ب) هزینه‌بر دارند، از این رو، اندازه‌گیری تنش برجا به‌روش‌های غیرمستقیم در حال گسترش است. از جمله روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری تنش برجا، روش انتشار آوایی است که برمبنای تئوری اثر کایزر استوار است. سنگ وقتی تحت تنش قرار می‌گیرد، سیگنال‌های صوتی منتشر می‌کند. این پدیده انتشار آکوستیک نامیده می‌شود و اثر کایزر به‌عنوان فقدان انتشار آکوستیک در سطوح تنش پایین‌تر از تنش ماکزیمم اعمال شده قبلی تعریف می‌شود. به‌عبارت دیگر تا زمانی که سنگ به سطح تنش پیشین خود نرسد، انتشار آکوستیکی چشم‌گیری از خود نشان نمی‌دهد. عوامل متعددی در اثر کایزر مؤثر است که از جمله آن‌ها می‌توان به زمان تأخیر، دما، فابریک سنگ، تخلخل، سطوح درزه و ناپیوستگی و به‌طورکلی ساختارهای زمین‌شناسی اشاره کرد. در این تحقیق بررسی اثر زمان تأخیر در اثر کایزر بررسی شده است. به زمانی که بین عملیات گرفتن مغزه و آزمایش انتشار آوایی سپری می‌شود، زمان تأخیر اطلاق می‌شود. نمونه سنگ‌های آهک برای بررسی انتخاب و پس از پیش‌بارگذاری، آزمایش انتشار آوایی با زمان تأخیرهای مختلف (۵ دقیقه، ۲، ۷، ۲۰، ٤۰ و ۹۰ روز) روی این نمونه‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که نسبت تنش بازیابی شده به تنش پیشین تا یک محدودهٔ زمانی(۲۰ روز)، کم‌تر از یک و بعد از آن روند افزایشی داشته و به یک رسیده (٦۰ روز)تا این‌که بعد از گذشت سه ماه از یک بیش‌تر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تخمین تنش برجا، انتشار آوایی، اثر کایزر، زمان تأخیر

* نویسنده مسئول moahmadi@modares.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3309]

مقدمه

به‌طورکلی سنگ‌ها وقتی تحت تنش قرار می‌گیرند، میکروترک‌هایی در آن‌ها ایجاد می‌شود که شروع و گسترش این میکروترک‌ها باعث ایجاد صدا می‌شود. به این پدیده انتشار آکوستیک یا انتشار آوایی گفته می‌شود. از این پدیده در علوم مختلف، استفاده‌های متعددی می‌شود که از آن جمله توان به بحث تخمین تنش برجا در علم مکانیک سنگ اشاره کرد. از آن‌جاکه آگاهی از مقدار و جهت تنش‌های اولیه و برجا در پروژه‌های سازه‌های زیرزمینی اهمیت زیادی دارد و این روش به‌عنوان روشی با هزینه و محدودیت کم، نتایج خوبی را در تخمین تنش‌های برجا داده است، پژوهش‌های زیادی در بررسی این موضوع و پارامترهای مؤثر بر آن صورت گرفته است. از مهم‌ترین پارامترهایی که در پدیدهٔ اثر کایزر و بازیابی تنش مؤثر است، پارامتر زمان تأخیر است که موضوع اصلی این تحقیق است. زمانی که نمونه با دستگاه حفاری استخراج می‌شود تا زمانی که برای تخمین تنش تحت آزمایش قرار می‌گیرد را زمان تأخیر گویند. در زمینهٔ نحوهٔ تأثیر پارامتر زمان تأخیر در اثر کایزر و بازیابی تنش و این‌که تا چه حد در دقت نتایج مؤثر است، پژوهش‌های زیادی انجام گرفته است.

یوشیکاوا[1] و موگی[2] توانستند اثر کایزر را تا ۵ روز مشاهده کنند. هم‌چنین دریافتند که با گذشت زمان زیاد، مقدار تنش تخمینی با مقدار اولیه بسیار اختلاف دارد و با گذشت زمان به سمت کاهش تنش میل می‌کند [۱].

کوریتا[3] و فوجی[4] گزارش کردند که اثر کایزر را می‌توان تا ۱ ماه مشاهده کرد [۲]. ممییز و حسنی گزارش کردند که تنش قبلی بیش از ۲ هفته در آزمایشگاه قابل بازیابی نیست [۳]. ستو[5] و همکاران به همراه اوتاگاوا[6] و همکاران با توجه به آزمایش‌های انجام داده روی توف، ماسه سنگ و گرانیت در شرایط خشک گزارش کردند که حافظهٔ تنش برای مدت زیادی (بیش‌تر از ۱ سال) قابل بازیابی است [٤]. طبق تحقیقات ستو و ناگ[7] تنش پیشین می‌تواند تا ۱۰ درصد خطا با روش انتشار آوایی تخمین زده شود. در صورتی که تنش پیشین کم‌تر از ۳۰ درصد حداکثر تنش تک محوره است و نمونه‌ها در دمای اتاق باشد، سنگ می‌تواند تا ۷ سال حافظه تنش خود را حفظ کند[٤].

1. Yoshikawa 2. Mogi 3. Kurita 4. Fujii 5. Seto 6. Utagawa 7. Nag

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3309]

جین[1] و شی[2] اظهار داشتند بهترین زمان تأخیر در آزمایش آکوستیک ۶۰ روز است. قبل از روز ۶۰ام مقادیر تخمین زده شده، کم‌تر از مقدار پیش بارگذاری شده (تنش قبلی) و بعد از ۶۰ روز این مقدار افزایش می‌یابد [۵]. با این‌که پژوهش‌های محققان منجر به ارائهٔ نظری واحد در خصوص زمان تأخیر نشده است، با این وجود شواهد به‌دست آمده از نتایج آزمایش‌ها حاکی از آن است که انواع سنگ‌ها پاسخ‌های متفاوتی را در برابر تأخیر زمان و مدت زمان حفظ و نگه‌داری تنش دارند و عامل زمان یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در اثر کایزر است.

کلیاتی در رابطه با اثر کایزر و انتشار آکوستیک

سنگ به‌طور پیوسته از تنش کم به زیاد به‌وسیله میکرودرزه‌ها در حال آسیب‌دیدگی است. شکست یا ضعف در سنگ قابل بازسازی نیست و اثر کایزر در واقع ضعف‌ها و شکستگی‌هایی که در بارگذاری قبلی اتفاق می‌افتد را ذخیره می‌کند یا به حافظه می‌سپارد. تا زمانی که مقدار بارگذاری مجدد از مقدار بار قبلی فراتر رود، هیچ ترک جدیدی در سنگ ایجاد نمی‌شود [۶].

اثر کایزر در سنگ و موادی که تحت بارگذاری سیکلی قرار دارند مشاهده می‌شود. در ساده‌ترین حالت سیکلی، مقدار تنش در بارگذاری سیکلی به‌صورت مرحله‌ای افزایش می‌یابد. در مرحلهٔ بعدی تا زمانی که مقدار تنش به مقدار قبلی نرسیده فعالیت صوتی صفر یا نزدیک صفر است، اما به محض این‌که تنش از بیش‌ترین مقدار تنش قبلی بالاتر می‌رود، فعالیت انتشار آکوستیک به‌صورت چشم‌گیری افزایش می‌یابد [۷]. فرضیهٔ اصلی تئوری کایزر این است که افزایش انتشار آوایی فقط بیش‌ترین تنش قبلی را در جهت محوری بارگذاری مشخص می‌کند [۸].

اصطلاحات به‌کار رفته در این تحقیق که لازم است به آن‌ها اشاره شود عبارت است از:

- کانت[3]: یکی از مهم‌ترین پارامترهای انتشار آکوستیک ثبت تعداد دفعاتی‌است که آکوستیک منتشر شده، از حد آستانه عبور کرده است. این پارامتر اغلب برای نشان دادن فعالیت انتشار آکوستیک با شمارش در دورهٔ زمانی به‌کار برده می‌شود. شمارش تعداد رویداد نسبت به زمان انجام می‌شود. کانت تجمعی به مجموع کانت‌ها در سیکل‌های مختلف اطلاق می‌شود.

1. Jin 2. Qi 3. Count

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3309]

- نسبت فلسیتی[1]: وقوع انتشار آکوستیک در بارهای کم‌تر از حداکثر بار قبلی، اثر فلسیتی نامیده می‌شود. با استفاده از این پدیده می‌توان نسبت فلسیتی را به‌صورت نسبت بین باری که در آن آکوستیک چشم‌گیری اتفاق افتاده به حداکثر بار مرحلهٔ قبل که در آن آکوستیک اتفاق افتاده تعریف شده است.

کاربرد اثر کایزر در بازیابی تنش نمونهٔ سنگی

اطلاع از چگونگی وضعیت تنش برجا در پوستهٔ زمین در بسیاری از مسائل مرتبط با سنگ و در زمینهٔ مهندسی عمران، معدن، نفت، ژئوفیزیک و زمین‌شناسی بسیار مهم است. در مهندسی عمران و معدن، تنش‌های برجا، توزیع و بزرگی تنش‌های اطراف سازه‌های زیرزمینی (تونل‌ها، معادن، چاه‌ها یا مغارها) را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. تمرکز تنش در اطراف دیواره‌های سازه‌های زیرزمینی ممکن است بیش‌تر از مقاومت سنگ شود و سبب حرکات و جابه‌جایی‌های محلی و موضعی و یا در مقیاس بزرگ‌تر ایجاد شکست شود. چگونگی وضعیت تنش برجا، هم‌چنین می‌تواند بر جابه‌جایی سقف، حرکت دیواره جانبی و یا نشست زمین مؤثر باشد [۹].

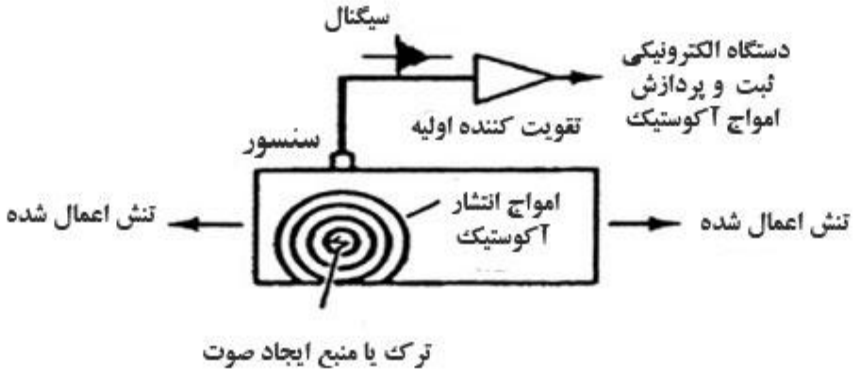
مهم‌ترین روش‌های غیرمستقیم تخمین تنش برجا، روش‌های بازیابی کرنش (بازیابی کرنش غیرالاستیک و آنالیز منحنی کرنش تفاضلی) و روش‌های اثر کایزر (انتشار آکوستیک، AE)[2] و تحلیل نرخ تغییر شکل(DRA)[3] هستند.

این روش‌ها به‌عنوان روش‌های اندازه‌گیری تنش غیرمستقیم قلمداد می‌شوند، به‌طوری‌که به‌صورت مستقیم تنش (و یا کرنش) در محل اندازه‌گیری نمی‌شود، بلکه از انجام آزمایش بر روی مغزه اخذ شده از محل و ساختگاه، در آزمایشگاه تنش (و یا کرنش) اندازه‌گیری می‌شوند. بعد از این‌که مغزه‌های اصلی به آزمایشگاه منتقل شد از این مغزه‌ها نمونه‌هایی با نسبت طول به قطر ۲ به ۱ و با استانداردهای انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ آماده می‌شود. سپس هر نمونه تحت بارگذاری مجدد قرار گرفته و رخدادهای انتشار آوایی با استفاده از سنسورهای دستگاه برداشت می‌شود. زمانی‌که بار اعمالی به نمونه از سطح تنش قبلی تجاوز کند، اثر کایزر به‌عبارتی مقدار تنش پیشین مشخص می‌شود [۱۰].

1. Felicity ratio 1. Acoustic Emission 3. Deformation Rate Analysis

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3309]

در شکل ۱ شماتیکی از پایه و اساس عمل‌کرد روش انتشار آوایی ملاحظه می‌شود. چنان‌که در شکل مشاهده می‌شود به محض رشد ریز ترک‌های جدید نمونه از خود امواج صوتی ساطع می‌کند. سنسورهای دستگاه این امواج صوتی را دریافت کرده و به دستگاه می‌فرستند و این رخدادها را به‌صورت آنلاین قابل مشاهده در کامپیوتر است.



شکل ۱. پایه و اساس عملکرد روش انتشار آوایی [۱۱].

چنان‌که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود فرایند انتشار آوایی شامل چندین مرحله می‌شود. مرحلهٔ اول A-B مربوط به زمانی است که میکروترک‌ها بسته شده و دانه‌ها روی یک‌دیگر می‌لغزند تا به حالتی پایدار برسند.

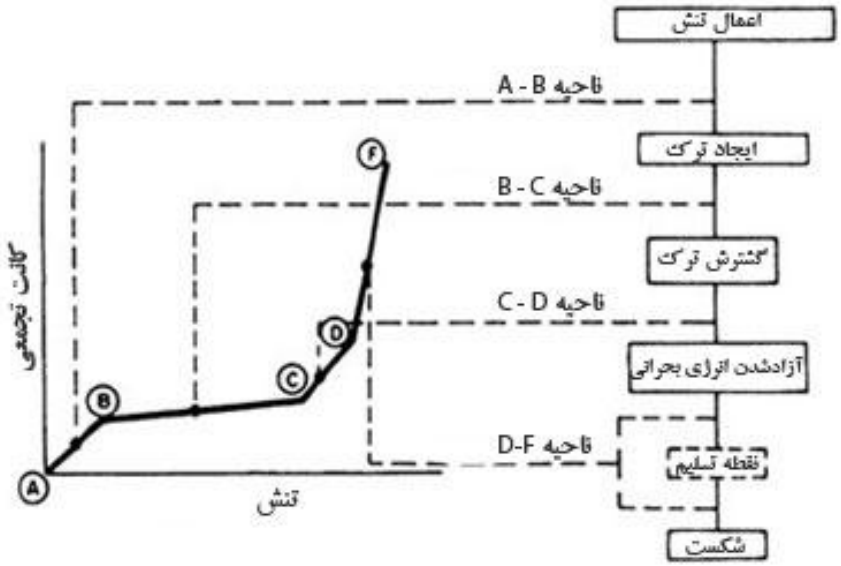
در مرحلهٔ دوم B-C کانت زیادی مشاهده نمی‌شود به‌دلیل این‌که میکروترک‌ها و دانه‌های تشکیل‌دهندهٔ سنگ به حالتی تقریباً پایداری رسیده‌اند و با افزایش بار کانت‌ها به‌آرامی افزایش می‌یابند. مرحلهٔ سوم C-D زمانی است که تنش به میزان تنش قبلی رسیده و ترک‌های جدید شروع به رشد می‌کنند. چنان‌که ملاحظه می‌شود در این مرحله افزایش چشم‌گیر رخدادهای انتشار آوایی به‌وجود می‌آید. از این مرحله به بعد ترک‌ها به رشد خود ادامه داده و رخدادهای انتشار آکوستیک با شیب زیادی افزایش پیدا می‌کنند تا بار به مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ برسد [۱۱].

بررسی اثر تأخیر زمان در اثر کایزر

به‌طورکلی حافظه تنش سنگ‌ها به: الف) مدت زمان سپری شده بین پیش بارگذاری و بارگذاری مجدد و ب) مدت زمان پیش بارگذاری شده بر نمونه‌ها، بستگی دارد. تعیین اثر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3309]

زمان سپری شده پس از باربرداری در اثر کایزر اهمیت دارد، به‌دلیل این‌که بین مغزه‌گیری نمونه‌های سنگی، پیش بارگذاری و بارگذاری مجدد در شرایط آزمایشگاهی و هم‌چنین در شرایط عملی پس از حفر گمانه و ارسال مغزه حفاری شده و تهیهٔ نمونه و در نهایت انجام آزمایش تک‌محوره فشاری در آزمایشگاه همواره، زمانی سپری می‌شود که به‌طور قطع در نتایج تخمین تنش با استفاده از روش انتشار آوایی مؤثر است [۱۲].



شکل ۲. مراحل مختلف انتشار صوت در نمودار کانت تجمعی انتشار اکوستیک برحسب تنش [۱۱].

اندازه‌گیری و تخمین مقادیر تنش برجا با استفاده از روش انتشار آوایی مزایایی از قبیل هزینهٔ کم، زمان کم در انجام آزمایش و سریع بودن را دارد ولی باید توجه داشت که این روش صرف نظر از مزیت‌های زیاد، تحت تأثیر شرایط زیادی است که نتایج آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از جمله مهم‌ترین این پارامترها می‌توان به پارامترهای سنگ، زمان تأخیر اشاره کرد. به همین دلیل برای این‌که نتایج قابل قبول باشد باید تا حد ممکن به این پارامترها توجه و اثر آن‌ها را مد نظر گرفت. هر چه زمان تأخیر زیادتر شود، تنش بازیابی شده از میزان تنش پیشین فاصله گرفته و درصد خطای تخمین تنش زیاد می‌شود. هدف از انجام این تحقیق بررسی اثر

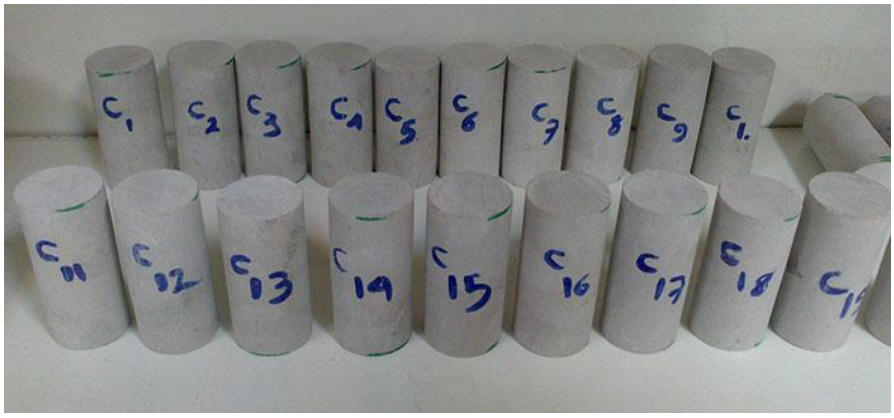
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3309]

زمان تأخیر در بازیابی تنش نمونه‌های سنگی است که برای رسیدن به این هدف، ابتدا روی نمونه‌های آهکی که از عمق مشخصی از یک گمانه اکتشافی استخراج شده‌اند، مقدار مشخصی بار پیش بارگذاری شده، سپس این نمونه‌ها در زمان تأخیرهای مختلف با روش انتشار آوایی آزمایش می‌شوند. براساس نتایج به‌دست آمده در زمان تأخیرهای مختلف نمودار نسبت مناسبت[1] یا درصد خطای تنش بازیابی شده در زمان‌های مختلف رسم خواهد شد تا تأثیر آن در بازیابی تنش مشخص شود.

آماده‌سازی نمونه‌ها و ایجاد حافظه تنش

برای بررسی روش انتشار آوایی در تخمین تنش‌های پیشین و پارامترهای مؤثر بر آن باید خصوصیات فیزیکی و مکانیکی برای نمونه‌های انتخاب شده مشابه باشد و شرایط آزمایش برای تمامی نمونه‌ها یک‌سان باشد. نمونه‌ها باید حتماً استوانه‌ای بوده و نسبت ارتفاع به قطر ۱/۵ تا ۲/۵ داشته باشند [۱۳].

برای این منظور ۱۹ نمونه با استفاده از دستگاه مغزه‌گیر از سنگ‌آهک، آماده‌سازی شد. شکل ۳ نمونه‌های آهکی آماده شده را نشان می‌دهد. در جدول ۱ مشخصات نمونه انتخابی ارائه شده است.



شکل ۳. نمونه‌های استوانه‌ای آماده‌شده برای آزمایش

1. Felicity rate

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3309]

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های انتخاب شده برای تحقیق

جنس سنگ	σ_c (MPa)	E_s (GPa)	دانسیته خشک (ρ_d) (gr/cm^3)	ضریب پواسون
آهک	۱۰۲	۲۷	۲/٤٤	۰/۲۳

یکی از مهم‌ترین مراحل تحقیق، مرحلهٔ پیش‌بارگذاری نمونه‌های سنگی است. در این مرحله روی تمامی نمونه‌های آماده شده باید مقدار مشخصی بار در مدت زمان مشخصی اعمال شود. این‌که چه میزان بار به نمونه وارد شود و این‌که در چه مدت زمانی و در چند مرحله این بار اعمال شود، اهمیت زیادی دارد. زیرا حافظه تنشی که قرار است در سنگ ایجاد شود باید به‌طور کامل در سنگ ایجاد شود.

با توجه به بررسی‌های انجام شده، در این تحقیق مقدار تنش پیش‌بارگذاری معادل ۰,۳ مقاومت تک‌محوره سنگ یعنی ۳۰ مگاپاسکال انتخاب شد. حال این‌که این میزان تنش در چه مدت زمانی، در چند مرحله و با چه نرخی به نمونه وارد شود مورد سوال است. اگر نسبت نرخ بارگذاری در اولین و دومین چرخه برعکس هم باشد (چرخه اول آرام و چرخه دوم سریع) اثرکایزر در سیکل دوم به‌خوبی مشاهده می‌شود.

طبق مشاهدات مستقیم کرانز[1] در طول بارگذاری با سرعت زیاد رشد ترک‌های بزرگ مرتبط به‌هم بیش‌تر از ترک‌های ریز است، به‌عبارتی ترک‌های کوچک رشد نمی‌کنند. اما در طول بارگذاری مجدد با سرعت کم ترک‌های کوچک زمان کافی برای رشد دارند، اما این ترک‌ها در تنش کم‌تر از تنش قبلی شروع به رشد می‌کنند زیرا در مرحلهٔ بارگذاری اول (سرعت زیاد) نتوانسته‌اند رشد کنند. در نتیجه در مرحلهٔ دوم نقطه کایزر در مقدار کم‌تر از تنش قبلی یا به محض بارگذاری خود را نشان می‌دهد[۱٤].

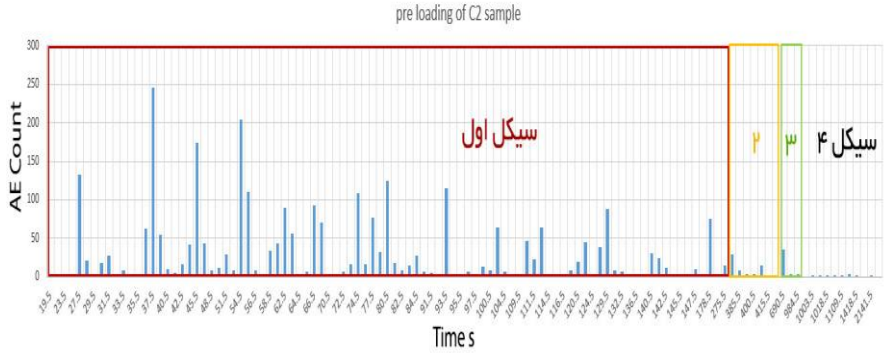
از این رو، نرخ پیش‌بارگذاری ۰,۱ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد. پیش‌بارگذاری نمونه‌ها باید به‌صورت سیکلی انجام شود زیرا ممکن است در سیکل اول پیش‌بارگذاری هنوز دانه‌هایی از سنگ موجود باشند که به‌طورکامل روی یک‌دیگر قرار نگرفته‌اند. زمانی برای انجام آزمایش AE بارگذاری مجدد روی نمونه‌های انجام می‌شوند این دانه‌ها تمایل دارند روی یک‌دیگر حرکت

1. Kranz

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3309]

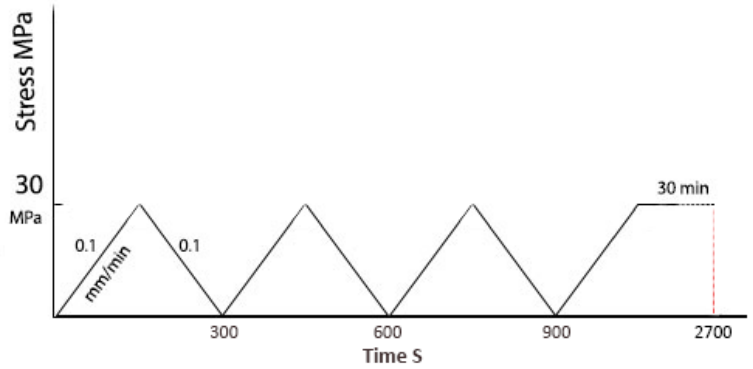
کرده و به‌حالت پایدار برسند که این خود باعث به‌وجود آمدن نویز می‌شود و تشخیص اثر کایزر را سخت می‌کند.

برای درک بهتر این موضوع در حین انجام پیش‌بارگذاری سنسورهای دستگاه انتشار آوایی به نمونه متصل شد تا احتمال ایجاد نویز در سیکل‌های مختلف بررسی شود. در شکل ٤ نمودار کانت بر حسب زمان برای سیکل‌های مختلف ارائه شده است.



شکل ٤. نمودار کانت بر حسب زمان برای سیکل‌های مختلف پیش بارگذاری

شکل ۵ مراحل ایجاد تنش پیشین در نمونه‌های سنگی را نشان می‌دهد. چنان‌که ملاحظه می‌شود برای ایجاد تنش پیشین، در سه سیکل متوالی بار ۳۰ مگاپاسکال با نرخ ۰٫۱ میلی‌متر بر دقیقه به نمونه اعمال و در سیکل چهارم این بار به‌مدت ۳۰ دقیقه ثابت نگه داشته شد.



شکل ۵. روند پیش‌بارگذاری نمونه‌ها

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3309]

آزمایش انتشار آوایی

برای بررسی اثر زمان تأخیر ۱۲ نمونه پیش‌بارگذاری شد. این نمونه‌ها با تأخیر زمان‌های ۵ دقیقه، ۲، ۷، ۲۰، ٤۰ و ۹۰ روز مورد آزمایش انتشار آوایی قرار گرفتند. جدول ۲ مشخصات و نتایج آزمایش‌های صورت گرفته را نشان می‌دهد.

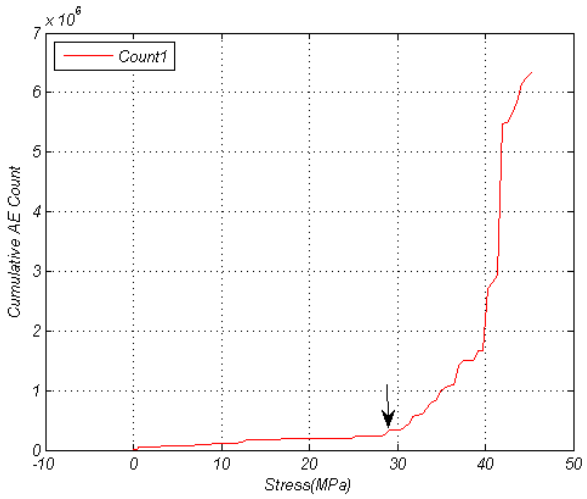
چنان‌که نتایج نشان می‌دهد تنش پیشین تا حدود٤۰ روز با دقت خوبی بازیابی شده است و خطای اندازه‌گیری تنش تا حدود ٦۰ الی ۷۰ روز از روش انتشار آکوستیک حداکثر حدود ٪۸± است. چنان‌که ملاحظه می‌شود با افزایش زمان تأخیر تا حدود ۹۰ روز مقدار تنش بازیابی شده بیش‌تر از تنش پیشین به‌دست آمده است.

در شکل ٦ نمودار کانت تجمعی بر حسب تنش برای یکی از نمونه‌های آزمایش شده ارائه شده است که معرف تمام آزمایش‌ها است.

جدول ۲. مشخصات و نتایج آزمایش انتشار آوایی برای بررسی تأخیر زمان

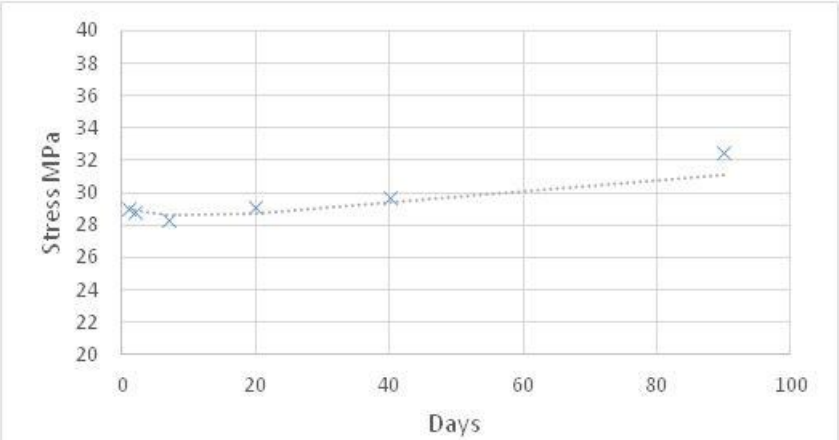
نام نمونه	زمان تأخیر	میانگین تنش (MPa)	نسبت فلسیتی FR	خطا ٪
C1	۵ دقیقه	۲۹	۰,۹٦٦	۳,۳
C2	۵ دقیقه			
C3	۲ روز	۲۸,۸	۰,۹٦	٤
C4	۲ روز			
C5	۷ روز	۲۸,۳۷	۰,۹٤٦	۵,٤
C6	۷ روز			
C9	۲۰ روز	۲۹,۱۱	۰,۹۷	۲,۹
C10	۲۰ روز			
C7	٤۰ روز	۲۹,٦۹	۰,۹۸۹	۱,۱
C8	٤۰ روز			
C11	۹۰ روز	۳۲,۵	۱,۰۸	۸,۳
C12	۹۰ روز			

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3309]



شکل ٦. نمودار کانت تجمعی بر حسب تنش برای نمونه C_1

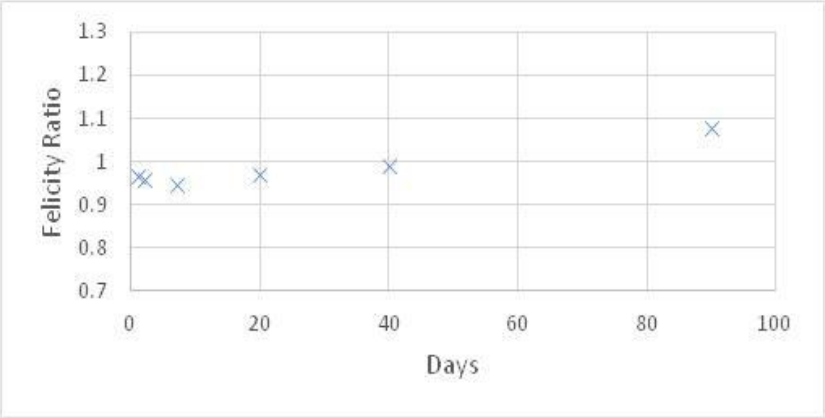
نتایج به‌دست آمده در نمودار نسبت فلیسیتی بر حسب زمان رسم شد و ملاحظه شد که تنش تا حدود ۲۰ روز کم‌تر از مقدار پیش‌بارگذاری بازیابی شده است و این مقدار از روز ۲۰ افزایش یافته، به‌طوری‌که در زمان تأخیر حدود ۵۵ الی ٦۰ روز نسبت فلسیتی به ۱ می‌رسد و بعد از آن به بیش‌تر از مقدار ۱ افزایش می‌یابد. شکل ۷ روند تغییرات تنش بازیابی شده بر حسب زمان را نشان می‌دهد.



شکل ۷. تغییرات تنش بازیابی شده در واحد زمان

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3309]

شکل ۸. روند تغییرات نسبت فلسیتی (تنش بازیابی شده به تنش پیشین) نسبت به زمان را نشان می‌دهد.

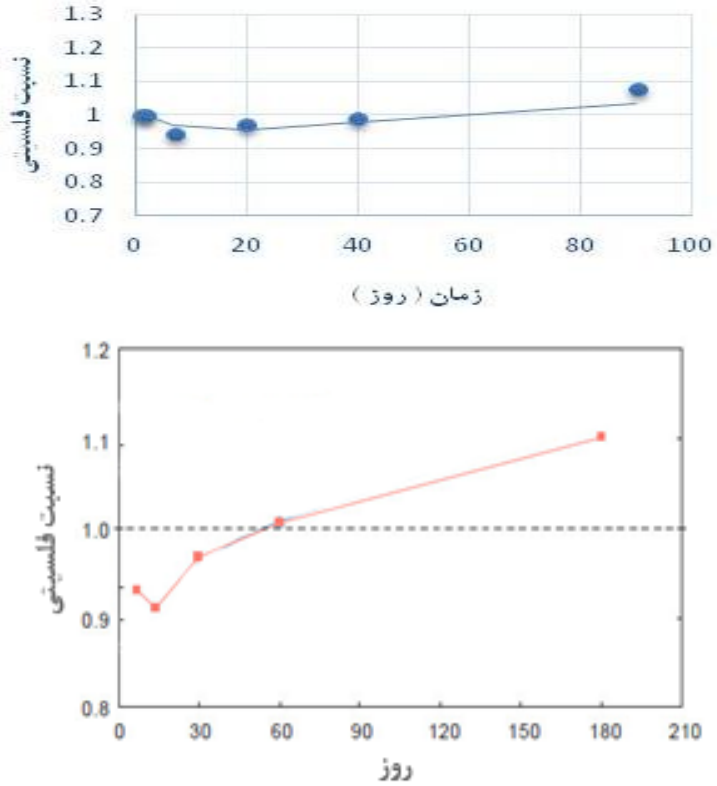


شکل ۸. روند تغییرات نسبت فلسیتی در واحد زمان

مقایسه نتایج تحقیق با پژوهش‌*های* پیشین

عوامل زیادی از جمله دما، فابریک سنگ، تخلخل، سطوح درزه و ناپیوستگی و به‌طورکلی ساختارهای زمین‌شناسی و پارامترهای مکانیک سنگی در اثر کایزر سنگ مؤثر است و پاسخ سنگ در برابر تنش‌های اعمال شده، متفاوت است. از این رو، مقایسهٔ نتایج بررسی تأخیر زمان در بازیابی تنش با استفاده از اثر کایزر برای نمونه سنگ‌های مختلف، نتیجه‌ای مستدل را در بر نخواهد داشت. از آن‌جاکه جین و شی بروی نمونه سنگ‌های آهکی کار کردند شرایط این آزمایش تا حدود زیادی مشابه بوده، از این رو، نتایج این تحقیق با نتایج پژوهش‌های این محققان مقایسه شد. بررسی نشان داد نتایج به‌دست آمده مطابقت خوبی دارد [۵]. در شکل ۹ تشابه روند تغییرات نسبت فلسیتی نسبت به زمان در تحقیقات جین و شی و این تحقیق ارائه شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3309]



شکل ۹. مقایسه روند تغییرات نسبت فلسیتی در زمان تأخیرهای متفاوت (نمودار سمت راست نتایج این تحقیق و نمودار سمت چپ نتایج پژوهش‌های جی و شی است [۵])

نتیجه‌گیری

۱. برای بررسی پارامترهای مؤثر بر اثر کایزر، پیش‌بارگذاری نمونه‌ها باید به‌صورت چند سیکل متوالی صورت گیرد تا تنش مدنظر به‌طور کامل در نمونه سنگ ثبت شود. زیرا ممکن است در سیکل اول پیش‌بارگذاری هنوز دانه‌هایی از سنگ موجود باشند که به‌طور کامل روی یک‌دیگر قرار نگرفته و در زمان انجام آزمایش AE با حرکت روی یک‌دیگر به‌منظور رسیدن به یک حالت پایدار، ایجاد نویز کرده و تشخیص اثر کایزر را با مشکل مواجه کنند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3309]

۲. انجام آزمایش انتشار آکوستیک بعد از ٤٠ روز بر نمونه‌های سنگی نشان داد نمونه‌های آهکی در این مدت حافظه تنش پیشین را به‌خوبی حفظ کرده و تنش پیش‌بارگذاری با دقت خوبی قابل بازیابی است.

۳. آزمایش‌های انجام شده بر نمونه سنگ‌های آهک و ماسه سنگ نشان داد که نسبت تنش بازیابی شده به تنش پیش‌بارگذاری شده در حدود ۲۰ روز اولیه بعد از پیش‌بارگذاری، کم‌تر از یک و بعد از ۲۰ روز یک روند افزایشی به‌خود می‌گیرد به‌طوری‌که در زمان تأخیر حدود ۵۵ الی ٦٠ روز نسبت فلسیتی به یک نزدیک می‌شود و بعد از آن به بیش‌تر از ۱ افزایش می‌یابد.

٤. با توجه به نتایج به‌دست آمده از تحقیق و این‌که امکان ارسال بلافاصله نمونه‌های مغزه‌گیری شده، برای آزمایش تخمین تنش با استفاده از روش انتشار آکوستیک نیست، توصیه می‌شود آزمایش انتشار آکوستیک بعد از حدود ۲۰ روز از زمان مغزه‌گیری و حداکثر تا حدود ۷۰ روز بعد از آن انجام شود.

منابع

1. Yoshikawa S., Mogi K., "Experimental studies on the effect of stress history on acoustic emission activity-a possibility for estimation of rock stress", Journal of acoustic emission, vol. 8, No. 4 (1989) 113-123.
2. Kurita K., Fujii N., "Stress memory of crystalline rocks in acoustic emission", Geophysical Research Letters, Volume 6, Issue 1 (January 1979) 9-12.
3. Momayez M., Hassani F.P., "Application of Kaiser effect to measure in-situ stresses in underground mines", Rock Mechanics, Tillerson JR and Wawersik, WR (eds), Proceeding og the 33rd US symposium on rock mechanics, Santa Fe, New Mexico, AA Balkema, Rotterdam (1992) 979-987.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3309]

4. Seto M., et al, "The relation between the variation of AE hypocenters and the Kaiser effect of Shirahama sandstone", Proc. 8th Int. Cong on Rock Mechanics, Vol. 1, Tokyo, Japan (1995) 201-205.
5. Jin Y., Z. Qi, et al., "Time-sensitivity of the Kaiser effect of acoustic emission in limestone and its application to measurements of in-situ stress", Petroleum Science 6(2) (2009) 176-180.
6. Li Y., Yang Y., Liu J., Zhao X., "Experimental and theoretical analysis on the procedure for estimating geo-stresses by the Kaiser effect", International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, Volume 17, Number 5 (October 2010) 514.
7. Lavrov A., "The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 40 (2003) 151-171.
8. Li H., Zhang B., "Laboratory determination of in-situ stress tensor using AE method", Rock Stress, Sugawara, Obara & Sato (eds), © 2003 Swets & Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 5809 6394.
9. Amadei B., Stephansson O., "Rock stress and its measurement", Published by: Chapman & Hall, London (1997).
10. Villaescusa E., Seto M., Baird G., "Stress measurements from oriented core" Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci. 39 (2002) 603-615.
11. Lehtonen A., Cosgrove J., et al. "An examination of in situ rock stress estimation using the Kaiser effect." Engineering Geology 124 (2012) 24-37.
۱۲. نیکخواه مجید، *بررسی آزمایشگاهی و عددی تأثیر بارگذاری سه‌محوره بر اثر کایزر*، رساله دکتری، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۹۲).
13. The Working Group for estimating the primary state of stress in a rock

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3309]

mass using the acoustic emission technique, "Suggested method for in-situ stress measurement from a rock core using the acoustic emission technique", Proc, 5th International workshop on application of Geophysics in Rock Engineering, July 7, Toronto, Canada (2002) .

۱٤. آرینفر علی، *مقایسه روش‌های AE و DRA در اندازه‌گیری تنش برجا و مطالعه موردی: سد سیمره*، پایان نامهٔ کارشناسی ارشد دانشکدهٔ فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۹۰).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3309]