

ا

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ
پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی نوع رفتار سنگ در تخمین تنش برجا توسط روش تحلیل نرخ
تغییر شکل (DRA)

نگارنده: عبداللطیف آغیل

استاد راهنما:

دکتر مجید نیکخواه

استاد مشاور:

دکتر شکراله زارع

شهریور ۱۳۹۶

تقدیم به

کسانی که بی چشم داشت و مهربانانه مرا حمایت و کسانی که همیشه و همه جا

در سختی ها و دشواری های زندگی همواره یآوری دلسوز و فداکار و پشتیبانی محکم و استوار برایم بوده اند.

خانواده عزیز و دوست داشتنی ام

شکر و قدردانی

از استاد گرامی ام جناب آقای دکتر مجید نیکخواه بسیار بسیار سپاس گذارم چرا که بدون راهنمایی‌ها و کمک‌های ایشان تامین و به موقع به پایان رساندن این پایان‌نامه بسیار دشوار می‌شد.

از جناب مهندس زیاری مسوول آزمایشگاه مکانیک سنگ، بخاطر زحمات و لطف‌های ایشان در انجام آزمایش‌ها و برای به موقع به انجام رساندن این آزمایش‌ها بسیار سپاسگزارم.

هم‌چنین از دوستان و مهندسان گرامی ام آقایان سامان مشیری، مهدی شیرزاده، فرزاد تیموری، ایمان تقوی، مهدی مهدوی، وحید نعمتی، هاشم تقی‌زاده، نریمان حبیبی، نوید جعفر صالحی، حسین اسفندیاری، سجاد باقری، صادق سلیمانی، سخی نظری، امیر صالح‌نژاد، مهدی حاصلی که مرا در انجام این پایان‌نامه راهنمایی و یاری نموده‌اند، هم‌چنین مسوول آموزش آقای علی‌اکبر رجبی و مسوول دفتر دانشکده آقای حسین شاه‌حسینی کمال تشکر را دارم.

تعهد نامه

اینجانب عبداللطیف آغیل دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک سنگ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه: بررسی نوع رفتار سنگ در تخمین تنش برجا توسط روش تحلیل نرخ تغییر شکل (DRA) تحت راهنمایی دکتر مجید نیکخواه متعهد می شوم.

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

تنش مفهومی بنیادی در اصول مکانیک سنگ و موارد کاربردی در مهندسی سنگ است. آگاهی از وضعیت تنش برجا در طراحی‌های ساختمان اکثر پروژه‌های مهندسی که با حفاری در سنگ ارتباط دارند بسیار حایز اهمیت است. بهترین روش‌های اندازه‌گیری (تخمین) تنش روش‌های اندازه‌گیری مستقیم هستند اما این روش‌ها ملاحظه شده است که بسیار گران و پرهزینه‌اند. از این‌رو، امروزه روش‌های غیرمستقیم (برپایه نمونه‌های مغزه سنگ) برای تخمین تنش پیشین در حال گسترش است. از جمله این روش‌ها، روش‌های بر پایه پدیده حافظه تنش سنگ انتشار آوایی و تحلیل نرخ تغییرشکل هستند. در این پژوهش، برای انجام آزمایش‌ها از روش تحلیل نرخ تغییرشکل استفاده شده است. منحنی رفتار تنش-کرنش یک سنگ تا مرحله شکست شامل نواحی بسته شدن ترک، الاستیک خطی و ناحیه تسلیم است و بر همین اساس تنش‌های پیش بارگذاری طراحی شده‌اند. به منظور بررسی رفتار سنگ در بازیابی تنش در هریک از سه ناحیه فوق و در سطح پیش بارگذاری‌های مختلف برای سنگ‌های مختلف سنگ‌های گرانیت، زیولیت، ماسه‌سنگ و گچ آزمایش‌های DRA¹ صورت گرفت. نتایج نشان می‌دهند که در هر سنگ رفتارهای متفاوتی در هر یک از سه ناحیه فوق اتفاق می‌افتد. همچنین نشان می‌دهند که برای سنگ‌های مختلف مقادیر تنش‌های پیش بارگذاری بازیابی شده در هر ناحیه متفاوت بوده و به‌طور کلی بهترین بازیابی تنش برای سنگ‌های زیولیت و گرانیت، ضعیف‌ترین آن برای سنگ گچ اتفاق افتاده است.

واژه‌های کلیدی: روش غیرمستقیم، حافظه سنگ، تنش برجا توده سنگ، روش DRA، بازیابی تنش.

¹ Deformation Rate Analysis

لیست مقاله‌های استخراج شده

عبدالطیف آغیل، مجید نیکخواه. "بررسی حافظه سنگ و تعیین نقطه اثرکایزر توسط روش تحلیل نرخ تغییرشکل (DRA)". اولین کنفرانس بین المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر در تاریخ ۲۵ مرداد ۱۳۹۶ توسط دانشگاه اسوه-تهران-دانشگاه شهید بهشتی.

عبدالطیف آغیل، مجید نیکخواه. "بررسی پیش تنش و تاثیر زمان تاخیر در تخمین تنش برجا توسط روش تحلیل نرخ تغییرشکل". اولین کنفرانس بین المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر در تاریخ ۲۵ مرداد ۱۳۹۶ توسط دانشگاه اسوه-تهران-دانشگاه شهید بهشتی.

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۲-۱ ضرورت انجام پژوهش ۳

۳-۱ سابقه پژوهش ۵

۴-۱ مراحل انجام پژوهش ۹

۵-۱ ساختار پایان نامه ۱۰

۲ فصل دوم: حافظه‌ش سنگ و روش‌های اندازه‌گیری‌ش AE و DRA ۱۳

۱-۲ مقدمه ۱۴

۲-۲ مقایسه انواع روش‌های مستقیم و غیرمستقیم اندازه‌گیری تنش ۱۴

۳-۲ حافظه سنگ ۱۶

۴-۲ اثر کایزر و اثر مناسبت ۱۷

۵-۲ روش انتشار آوایی (AE) ۲۰

۱-۵-۲ سیگنال‌های AE ۲۱

۲-۵-۲ مکانیزم منابع انتشار آوایی ۲۲

۳-۵-۲ آزمون و اندازه‌گیری توسط روش AE ۲۴

۲-۶ روش تحلیل نرخ تغییرشکل (DRA) ۲۵

۱-۶-۲ اصول روش تحلیل نرخ تغییرشکل ۲۵

۲-۶-۲ مکانیزم اثر حافظه تغییر شکل (DME) ۳۷

۲-۷ جمع بندی ۳۹

۳ فصل سوم: بررسی عوامل تاثیرگذار در بازسازی تنش در روش های مبتنی بر اثر کایزر ۴۱

۳-۱ مقدمه ۴۲

۳-۲ رفتار سنگ تحت بارگذاری تک محوره ۴۲

۳-۳ بررسی وابستگی جهت دار روش DRA و AE ۴۵

۳-۴ میکرو مکانیک آسیب سنگ ۴۹

۳-۵ عوامل موثر در بازسازی تنش و ارزیابی آن در تخمین تنش ۵۷

۳-۵-۱ اثر خمش ۵۸

۳-۵-۲ نوپزهای الکتریکی ۶۲

۳-۵-۳ جریان هوا ۶۳

۳-۵-۴ رطوبت و گرما ۶۳

۳-۵-۵ ارزیابی پیش تنش و زمان تاخیر ۶۴

۳-۶ بررسی نوع سنگ و مرحله بارگذاری ۶۹

۳-۷ جمع بندی ۷۰

۴ فصل چهارم: بررسی امکان بازیابی تنش سنگ با توسط آزمایش DRA ۷۳

۴-۱ مقدمه ۷۴

۴-۲ تهیه نمونه ۷۴

۴-۳ تجهیزات آزمایش ۷۸

۷۸	سیستم اندازه گیری ۱-۳-۴
۷۹	دستگاه بارگذاری و مشخصات آن ۲-۳-۴
۸۰	تعیین ویژگی های فیزیکی و مکانیکی سنگ ها ۴-۴
۸۴	آماده سازی نمونه ها و انجام آزمایش DRA ۵-۴
۹۱	نتایج آزمایش DRA روی نمونه های هر یک از سنگ های مورد آزمایش ۶-۴
۹۱	نمونه های سنگ گرانیت ۴-۶-۱
۹۷	نمونه های سنگ زیولیت ۴-۶-۲
۱۰۰	نمونه های سنگ ماسه سنگ ۴-۶-۳
۱۰۶	نمونه های سنگ گچ ۴-۶-۴
۱۰۹	آزمایش DRA بر روی نمونه ها با زمان تاخیر ۵-۶-۴
۱۱۱	تجزیه و تحلیل نتایج ۷-۴
۱۱۷	جمع بندی ۴-۸

۵ فصل پنجم: تیرگی و روش ها ۱۱۹

۱۲۰	۱-مقدمه ۵-۱
۱۲۰	۲-نتیجه گیری ۵-۲
۱۲۳	۳-پیشنهادها ۵-۳

۶ منابع و مراجع ۱۲۵

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: نمونه ای از اثر کایزر (محور افقی تنش محوری و محور قائم تعداد تجمعی رخدادهای AE) [۳۰]. ۱۹
- شکل ۲-۲: مجموع ضربات AE برحسب تنش در دو چرخه متوالی از تراکم تک محوری [۳۳]. ۲۰
- شکل ۳-۲: خصوصیات سیگنال AE [۳۰]. ۲۲
- شکل ۴-۲: انواع سیگنال های AE، سیگنال نوع پیوسته (بالا) و سیگنال نوع گذرا (پایین) [۳۰]. ۲۳
- شکل ۵-۲: منحنی مجموع شمارشهای AE برحسب تنش فشاری در اندازه گیری تنش از یک نمونه مغزه سنگ با استفاده از روش AE [۱۰]. ۲۵
- شکل ۶-۲: قاعده اصلی روش تحلیل نرخ تغییرشکل [۴ و ۶]. ۲۷
- شکل ۷-۲: (a) منحنی تابع تفاضل کرنش، (b) منحنی DRA [۲۰]. ۲۷
- شکل ۸-۲: نمونه ای از نمودار تفاضل کرنش برای نمونه مغزه گیری شده [۱۳]. ۲۹
- شکل ۹-۲: منحنی تنش-کرنش کاهش یافته برای نمونه گرانودیوریت تحت بارگذاری تک محوری (محور افقی تنش و محور قائم تفاضل کرنش) [۱۴]. ۳۰
- شکل ۱۰-۲: الف: شیوه بارگذاری نمونه گرانودیوریت، ب-منحنی تنش-تفاضل کرنش مربوط به نمونه گرانودیوریت [۱۴]. ۳۱
- شکل ۱۱-۲: تابع تفاضل کرنش مابین بارگذاری اول و پنجم مربوط به گرانیب اینادا [۵]. ۳۲
- شکل ۱۲-۲: تابع تفاضل کرنش مابین بارگذاری دوم و پنجم مربوط به ماسه سنگ شیراهاما [۵]. ۳۲
- شکل ۱۳-۲: منحنی تنش - تفاضل کرنش مربوط به نمونه A_1 [۴۰]. ۳۳
- شکل ۱۴-۲: منحنی تنش - تفاضل کرنش ($\Delta \varepsilon_{2,1}$) بدست آمده، برای نمونه‌های حاصل از عمق ۱۰۰ متری ایساشی [۱۴]. ۳۴
- شکل ۱۵-۲: تغییرات تفاضل کرنش-تنش محوری در ناحیه الاستیک خطی نمونه‌های (a) ماسه سنگ و (b) توف [۸]. ۳۶
- شکل ۱-۳: دیاگرام شماتیک تنش-کرنش یک نمونه ی سنگ تحت فشار تک محوری [۱۴]. ۴۳
- شکل ۲-۳: مراحل بوجود آمدن ترک [۴۹]. ۴۴

- شکل ۳-۳: تعداد تجمعی ترک-تنش در آزمایش برزیلین در برنامه بارگذاری اول [۲۰]. ۴۸.....
- شکل ۳-۴: تعداد تجمعی ترک-تنش برای بارگذاری‌ها در آزمایش برزیلین در جهت Y [۱۹]. ۴۹.....
- شکل ۳-۵: دو نوع از ریزشکست‌ها (a) ترک‌های بین دانه‌ای/کریستالی، (b) ترک‌های درون دانه‌ای/کریستالی [۶]. ۵۱.....
- شکل ۳-۶: ریزترک‌ها که بوسیله‌ی جهتشان نسبت به تنش تفاضلی متمایز می‌شوند: (a) ترک‌های برشی، (b) ترک‌های کششی [۶]. ۵۲.....
- شکل ۳-۷: لغزش اصطکاکی و شکلی از کشش (a) ترک متقاطع (b) ترک بال شکل [۶]. ۵۲.....
- شکل ۳-۸: $\Delta \varepsilon$ پسماند از لغزیدن و یا شکافتن ریزترک‌های غیرقابل جبران [۶]. ۵۴.....
- شکل ۳-۹: تفاضل کرنش برای یک نمونه گرانیث (قبلا تحت تنش محوری 31.5MPa و فشار جانبی 15MPa) [۵،۶]. ۵۵.....
- شکل ۳-۱۰: تابع تفاضل کرنش در پیش‌بارگذاری‌های مختلف: (a) 15.4MPa ، (b) 35.9MPa . ۵۶.....
- شکل ۳-۱۱: قاب بارگذاری و موقعیت‌های کرنش سنج روی یک نمونه [۲۲]. ۶۰.....
- شکل ۳-۱۲: نقاط انحنا برای نمونه‌های B_۱، B_۲ و B_۳ [۲۲]. ۶۰.....
- شکل ۳-۱۳: نویز در نمودار DRA بزرگ‌تر از ۲۰۰ میکروکرنش [۲۲]. ۶۲.....
- شکل ۳-۱۴: خط سیاه نمودار DRA حاصل از یک آزمایش بدون پوششی برای توقف جریان هوا است. خط خاکستری نمودار هنگامی که نمونه مشابه مجدداً چند روز بعد با پوشش پلاستیکی آزمایش شده [۲۲]. ۶۳.....
- شکل ۳-۱۵: نمونه‌ای از منحنی مدول مماسی-تنش در چرخه بارگذاری برای ماسه‌سنگ شیراهاما. ۲۱ به ترتیب اولین و دومین چرخه بارگذاری است. نقطه انحنا در پیش تنش 15.4MPa مشاهده شده است [۵۲]. ۶۵.....
- شکل ۳-۱۶: تصاویر نمادین تغییرشکل غیرخطی سنگ، الف) منحنی تنش-کرنش (چپ)، ب) منحنی مدول تانژانت-تنش (راست) [۵۲]. ۶۶.....
- شکل ۳-۱۷: الگوی بارگذاری [۵۲]. ۶۸.....
- شکل ۳-۱۸: منحنی‌های مدول مماسی-تنش، با پیش تنش و تنش بزرگ‌تر-زمان کوتاه به ترتیب 12MPa و 16MPa [۵۲]. ۶۸.....
- شکل ۳-۱۹: FR در دومین چرخه بارگذاری تراکم تک محوره-نسبت حداکثرتنش اولین چرخه بارگذاری به مقاومت تراکم تک محوره سنگ [۳۳]. ۶۹.....

- شکل ۴-۱: تصویر دستگاه مغزه‌گیری مورد استفاده. شکل ۷۶
- شکل ۴-۲: تصویر دستگاه برش سنگ. شکل ۷۶
- شکل ۴-۳: نمونه‌های مغزه تهیه شده از بلوک سنگ گرانیت جهت آزمایش DRA. شکل ۷۷
- شکل ۴-۴: نمونه‌های مغزه تهیه شده از بلوک سنگ آهک جهت آزمایش DRA. شکل ۷۷
- شکل ۴-۵: نمونه‌های مغزه تهیه شده از بلوک سنگ ماسه سنگ جهت آزمایش DRA. شکل ۷۷
- شکل ۴-۶: نمونه‌های مغزه تهیه شده از بلوک سنگ گچ جهت آزمایش DRA. شکل ۷۸
- شکل ۴-۷: نمونه‌های مغزه تهیه شده از بلوک سنگ زیولیت جهت آزمایش DRA. شکل ۷۸
- شکل ۴-۸: کرنش سنج‌های ۲۰ و ۶۰ میلی‌متری استفاده شده در آزمایش‌ها. شکل ۷۹
- شکل ۴-۹: نمایی کلی از دستگاه بارگذاری آزمایش. شکل ۸۰
- شکل ۴-۱۰: دستگاه اندازه‌گیری عبور موج. شکل ۸۲
- شکل ۴-۱۱: تصویر نمونه‌های هر یک از سنگ‌ها جهت تعیین ویژگی‌های مکانیکی. شکل ۸۲
- شکل ۴-۱۲: تصویر نمونه‌ها پس از انجام آزمایش تراکم تک محوره برای تعیین مقاومت نهایی. شکل ۸۳
- شکل ۴-۱۳: نمونه‌ای آماده سازی نمونه برای آزمایش. شکل ۸۵
- شکل ۴-۱۴: تصاویر نمونه‌های سنگ زیولیت، سنگ آهک، گرانیت و ماسه‌سنگ هنگام بارگذاری (پیش بارگذاری). شکل ۸۷
- شکل ۴-۱۵: منحنی تنش-کرنش محوری سنگ گچ و سه ناحیه بسته شدن ترک، الاستیک و ناحیه پلاستیک. شکل ۸۸
- شکل ۴-۱۶: منحنی تنش-کرنش محوری سنگ ماسه‌سنگ و ناحیه بسته شدن ترک و ناحیه الاستیک. شکل ۸۹
- شکل ۴-۱۷: منحنی تنش-کرنش محوری سنگ گرانیت و سه ناحیه بسته شدن ترک، الاستیک و ناحیه پلاستیک. شکل ۸۹
- شکل ۴-۱۸: منحنی تنش-کرنش محوری سنگ زیولیت و سه ناحیه بسته شدن ترک، الاستیک و ناحیه پلاستیک. شکل ۸۹
- شکل ۴-۱۹: شیوه کلی بارگذاری در آزمایش DRA بر روی نمونه‌ها. شکل ۹۰
- شکل ۴-۲۰: تصاویر برخی از نمونه‌های تهیه شده برای انجام آزمایش DRA. شکل ۹۱
- شکل ۴-۲۱: منحنی تنش-تفاضل کرنش نمونه $G_{۷-۲}$ برای دومین و سومین چرخه بارگذاری. شکل ۹۲
- شکل ۴-۲۲: نمودار تنش-تفاضل کرنش نمونه $G_{۷-۴}$ برای چهارمین و سومین چرخه بارگذاری. شکل ۹۴
- شکل ۴-۲۳: نمودار تنش-تفاضل کرنش نمونه $G_{۷-۴}$ برای دومین و اولین چرخه بارگذاری. شکل ۹۴
- شکل ۴-۲۴: نمودار تنش-تفاضل کرنش نمونه $G_{۷-۶}$ برای دومین و سومین چرخه بارگذاری. شکل ۹۴
- شکل ۴-۲۵: نمودار تنش-تفاضل کرنش نمونه $G_{۷-۶}$ برای اولین و دومین چرخه بارگذاری. شکل ۹۶

- شکل ۲۶-۴: نمودار تنش-تفاضل کرنش نمونه G_{9-12} برای اولین و دومین چرخه بارگذاری. ۹۷.....
- شکل ۲۷-۴: منحنی تنش-تفاضل کرنش نمونه Z_{6-15} برای دومین و سومین چرخه بارگذاری. ۹۸.....
- شکل ۲۸-۴: منحنی تنش-تفاضل کرنش نمونه Z_{7-26} برای دومین و سومین چرخه بارگذاری. ۹۸.....
- شکل ۲۹-۴: منحنی تنش-تفاضل کرنش نمونه Z_{7-40} برای دومین و سومین چرخه بارگذاری. ۹۹.....
- شکل ۳۰-۴: منحنی تنش-تفاضل کرنش نمونه Z_{6-53} برای دومین و سومین چرخه بارگذاری. ۱۰۰.....
- شکل ۳۱-۴: نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط سومین و چهارمین چرخه بارگذاری نمونه S_{4-5} . ۱۰۱.....
- شکل ۳۲-۴: نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط دومین و سومین چرخه بارگذاری نمونه S_{2-23} . ۱۰۲.....
- شکل ۳۳-۴: نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط اولین و دومین چرخه بارگذاری نمونه S_{2-34} . ۱۰۳.....
- شکل ۳۴-۴: نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط دومین و سومین چرخه بارگذاری نمونه S_{2-34} . ۱۰۴.....
- شکل ۳۵-۴: نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط دومین و سومین چرخه بارگذاری نمونه S_{2-45} . ۱۰۵.....
- شکل ۳۶-۴: نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط اولین و دومین چرخه بارگذاری نمونه Gy_{5-4} . ۱۰۶.....
- شکل ۳۷-۴: نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط دومین و سومین چرخه بارگذاری نمونه Gy_{5-4} . ۱۰۷.....
- شکل ۳۸-۴: نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط دومین و سومین چرخه بارگذاری نمونه Gy_{5-15} . ۱۰۷.....
- شکل ۳۹-۴: نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط دومین و سومین چرخه بارگذاری نمونه Gy_{2-22} . ۱۰۸.....
- شکل ۴۰-۴: نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط دومین و سومین چرخه بارگذاری نمونه Gy_{2-32} . ۱۰۸.....
- شکل ۴۱-۴: منحنی تنش-تفاضل کرنش مربوط دومین و سومین چرخه بارگذاری نمونه $G_{10-T-34}$. ۱۱۰.....
- شکل ۴۲-۴: نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط دومین و سومین چرخه بارگذاری نمونه S_{6T-34} . ۱۱۰.....

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: نتایج بدست آمده از تحلیل نرخ تغییر شکل [۴۰]. ۳۳
- جدول ۲-۲: برنامه آزمایش‌های DRA [۸]. ۳۵
- جدول ۱-۳: برنامه بارگذاری چهارمورد از مدل‌های مکعبی و برزیلین دیسک [۲۰]. ۴۹
- جدول ۲-۳: بارهای محوری بکاررفته در آزمایش‌های LRR روی نمونه #۳ [۶]. ۵۷
- جدول ۱-۴: تعداد نمونه‌های مغزه برای هریک از سنگ‌ها. ۷۸
- جدول ۲-۴: ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌ها. ۸۱
- جدول ۳-۴: سرعت موج انواع سنگ‌های مورد آزمایش. ۸۲
- جدول ۴-۴: مقاومت نهایی بدست آمده برای هر یک نمونه‌های مورد آزمایش. ۸۳
- جدول ۵-۴: نسبت پواسون و مدول الاستیک هریک از نمونه سنگ‌ها. ۸۴
- جدول ۶-۴: برنامه بارگذاری و پیش بارگذاری کلی برای آزمایش‌های DRA. ۸۶
- جدول ۷-۴: برنامه بارگذاری سنگ‌های زیولیت، ماسه‌سنگ، گچ و گرانیت. ۸۶
- جدول ۸-۴: مشخصات بارگذاری‌های نمونه‌های آزمایش DRA با در نظر گرفتن زمان تاخیر. ۱۱۰
- جدول ۹-۴: نتایج آزمایش DRA بر روی نمونه‌های مغزه هر یک از سنگ‌ها. ۱۱۱
- جدول ۱۰-۴: مقادیر FR بدست آمده برای هر یک از سنگ‌ها در ناحیه‌های اول، دوم و سوم (برای سنگ گچ). ۱۱۲
- جدول ۱۱-۴: کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار تنش پیش بارگذاری شده در هر یک از ناحیه A و B. ۱۱۵

فصل اول:

"کلیات"

تنش مفهومی بنیادی در اصول مکانیک سنگ و موارد کاربردی در مهندسی سنگ است و درک آن به ویژه در اولین رویارویی با آن مفهوم ساده‌ای نیست مگر آن که به‌طور شفاف‌تری تشریح گردد [۱]. برای تخمین تنش سنگ، درک تنش ضروری است، زیرا که تنش نوع مشابهی از کمیت‌ها مانند فشار یا نیرو نیست. تنش نه یک کمیت اسکالر است و نه کمیت برداری، بلکه یک کمیت تانسوری است [۲]. آگاهی از وضعیت تنش برجا جهت طراحی‌های ساختمان اکثر پروژه‌های مهندسی که با حفاری در سنگ‌ها ارتباط دارند از قبیل مهندسی معدن، مهندسی عمران، مهندسی نفت و راه آهن بسیار حایز اهمیت است [۳]. از این‌رو، ارزیابی قابل اطمینان وضعیت تنش برجا یک جز کلیدی در فرآیند طراحی و اجرای هر حفاری زیرزمینی است [۴، ۵]. مهم نیست که چه نوعی از شکست سنگ اتفاق می‌افتد، زیرا که آن در نهایت با تغییر تنش اطراف توده سنگ مرتبط است. اهمیت داده‌های تنش برجا در همه‌ی صنایع مرتبط با توسعه‌های زیرسطحی از قبیل معدن‌کاری، نفت و عمران شناخته شده است [۶]. تنش یک مولفه اصلی در طراحی یک حفاری زیرزمینی هنگام تصمیم‌گیری در جانمایی مناسب فضای زیرزمینی و بازشدگی‌ها، هنگام طراحی‌های سیستم نگهدارنده زمین، زمان و تعیین یک قطعه جبهه کار استخراج و غیره است. در صنعت نفت آگاهی از تنش، برای درک جریان‌های طبیعی سیال و الگوی زه‌کشی مخزن، یکپارچگی چاه نیز مورد نیاز است [۷]. انتخاب تکیه‌گاه حفاری بهینه (برای حفاری جهت‌دار) به بزرگی و جهت‌داری اولیه تنش‌های برجا بستگی دارد. در صنعت عمران تنش برجا یکی از پارامترهای ورودی اصلی برای تصمیم‌گیری‌ها در ابعاد، جهت‌داری و شکل تونل‌ها و نیز مغارهای زیرزمینی است. آگاهی از وضعیت اولیه تنش هم‌چنین در واقع یک نیاز ضروری است، هیچ حفاری زیرزمینی‌ای نمی‌تواند بهبود یابد مگر این‌که یک ارزیابی خطر برای آن انجام شده است و انجام آن بنابراین با آزمون تاثیر تنش برجا روی پایداری حفاری مرتبط خواهد بود [۶]. تنش‌های اولیه موجود در توده‌سنگ در اثر عواملی از قبیل وزن لایه‌های فوقانی، محصورشدگی از اطراف، فعالیت‌های تکتونیکی

و تاریخچه‌ی تنش ایجاد می‌گردد. بنابراین هر نقطه‌ی ۳-ای در اعماق توده‌سنگ دارای مولفه‌های تنش غیر صفر است. در بعضی مناطق و به‌خصوص در نزدیکی سطح زمین ممکن است تنش در برخی نقاط در حد صفر و در برخی نقاط دیگر برابر با مقاومت سنگ باشد [۸]. همچنین سنگ‌ها تحت تنش‌های متفاوت رفتارهای متفاوتی را از خود نشان می‌دهند و این برای انواع سنگ‌های مختلف نیز متفاوت است. در پژوهش حاضر، رفتار چند نوع سنگ مختلف در هر یک از سه ناحیه بسته شدن ترک، الاستیک و پلاستیک در منحنی تنش-کرنش، میزان تنش بازیابی شده توسط روش DRA بررسی شده است. برای این منظور نمونه‌های مغزه از سنگ‌های زیولیت، گرانیت، گچ و ماسه‌سنگ که دارای رفتار متفاوت هستند، تهیه شده و سپس تحت پیش بارگذاری‌هایی که طراحی شده قرار گرفتند تا رفتار آنها در بازیابی کرنش در هر یک از سه ناحیه فوق بررسی شود که جزییات آن در فصل‌های بعد آورده شده است.

۲-۱ ضرورت انجام پژوهش

تنش سنگ به دلیل این که روش‌های اندازه‌گیری آن با آشفته نمودن سنگ، اندازه‌گیری جابجایی‌ها یا پارامترهای هیدرولیکی و تبدیل کمیت‌های اندازه‌گیری شده به تنش سنگ، کمیتی مشکل برای اندازه‌گیری است. طوری که لیمن^۱ (سال ۱۹۵۹) اظهار داشت که اندازه‌گیری تنش به صورت مستقیم غیر ممکن است [۹]. از سوی دیگر، آگاهی از مقدار و جهت تنش‌های اولیه در محل اجرای فضا‌های زیرزمینی، چه در پروژه‌های معدنی و چه در پروژه‌های ساختمانی، اهمیت زیادی داشته و فقدان آن ممکن است هزینه‌ها و خسارت‌های جبران‌ناپذیری را به همراه داشته باشد [۸]. این آگاهی در بسیاری از مراحل طراحی و اجرا راه‌گشا بوده و به مهندسان دید روشنی را در این خصوص می‌دهد. به عنوان مثال در انتخاب مسیر تونل سعی بر این است که امتداد تونل، بر امتداد تنش اصلی بزرگ‌تر عمود نباشد. زیرا

^۱ Leeman

که در این حالت، حداکثر تنش القایی در سقف یا دیواره‌های تونل بوجود خواهد آمد. هم‌چنین اطلاع از وضعیت میدان تنش، کمک موثری در انتخاب شکل مقطع حفاری و نحوه جانمایی فضاهای زیرزمینی بزرگ مثل مغاره‌های نیروگاه خواهد بود. از آنجایی که ترک‌ها تمایل دارند در امتداد عمود بر تنش اصلی حداقل گسترش یابند، می‌توان با اطلاع از جهت تنش‌های اصلی، جانمایی با حداقل خطر را انتخاب نمود. در مورد تونل‌های تحت فشار یا آبرسانی، چنان‌چه تنش اولیه از فشار داخلی آب بیش‌تر باشد، می‌توان آن را بدون پوشش اجرا نمود و به این ترتیب در هزینه‌ها صرفه‌جویی کرد. از این‌رو، ارزیابی قابل اطمینان تنش برجا یک گام مهم در تحلیل و طراحی فضاهای زیرزمینی، به ویژه برای ارزیابی پایداری ساختارهای زیرزمینی جهت جلوگیری از شکست یا فروپاشی فضاهای حفر شده زیرزمینی است [۱۰]. آگاهی از حالت تنش اولیه، تحلیل اطلاعات حاصل از رفتارسنجی فضاهای زیرزمینی را امکان پذیر نموده و در طراحی مخازن زیرزمینی نیز به ارزیابی احتمال وقوع زمین لرزه کمک می‌کند. گاهی اوقات تنش برجا نسبت به مقاومت توده سنگ به اندازه‌ای است که در اثر حفاری، پدیده‌هایی مثل شکست انفجاری^۱، پوسته پوسته شدن^۲، کمانش^۳، بالا آمدگی^۴ و پدیده‌هایی مشابه اتفاق می‌افتد. در چنین حالت‌هایی آگاهی از وضعیت تنش‌های برجا از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است [۱۰].

تنش‌های اولیه موجود در توده‌سنگ در اثر عواملی از قبیل وزن لایه‌های فوقانی، محصورشدگی از اطراف، فعالیت‌های تکتونیکی و تاریخچه‌ی تنش ایجاد می‌گردد. بنابراین هر نقطه‌ای در اعماق توده‌سنگ دارای مولفه‌های تنش غیر صفر است. در بعضی مناطق و به خصوص در نزدیکی سطح زمین ممکن است تنش در برخی نقاط در حد صفر و در برخی نقاط دیگر برابر با مقاومت سنگ باشد. هم‌چنین سنگ‌ها تحت تنش‌های متفاوت رفتارهای متفاوتی را از خود نشان می‌دهند و این برای انواع سنگ‌های مختلف نیز متفاوت است [۸].

^۱ Rock bursting

^۲ Buckling

^۳ Spalling

^۴ Heave

۳-۱ سابقه پژوهش

کاناگوا^۱ و همکاران (۱۹۷۶) اظهار کردند که اگر در سنگ‌ها هم پدیده اثر کایزر رخ دهد، بنابراین ممکن است که تنش پیشین را از این طریق بدست آورد [۹]. سپس روشی را برای تخمین تنش برجا با استفاده از اثرکایزر نمونه‌های سنگ تحت تراکم تک‌محوری پیشنهاد و اولین کوشش در راستای تخمین تنش‌های برجا در سنگ‌ها را انجام دادند. در روش آنها تغییر در فعالیت انتشار آوایی^۲ (AE) با افزایش تنش اعمال شده اندازه‌گیری شده است. مقدار تنش اعمال شده در نقطه‌ای که نرخ AE (تعداد جمعی رخدادهای AE) بطور ناگهانی افزایش می‌یابد، بعنوان مقدار تنش برجا در نظر گرفته شده است. هم‌چنین دریافتند که تنش‌های تخمین زده شده بوسیله این روش مطابقت خوبی با نتایج روش‌های اندازه‌گیری مستقیم دارد [۱۱]. به‌طوری که کاناگوا و همکاران (۱۹۷۷) و موگی و یوشیکاوا^۳ (۱۹۸۱) اظهار داشتند که روش AE روشی قابل اطمینان و معتبر برای تخمین تنش‌های برجا در رابطه با حافظه تنش سنگ است. پس از آن مطالعات بسیاری توسط هولکومب و کاستین^۴ (۱۹۸۶)، کراوفورد و هاگسان^۵ (۱۹۸۷)، ستو^۶ و همکاران (۱۹۹۹)، فرایدل و تیل^۷ (۱۹۹۰)، ممیز و حسنی^۸ (۱۹۹۲)، پستمن^۹ و همکاران (۲۰۰۲) و دیگران مورد پژوهش قرار گرفت [۵، ۱۲]. روش‌های بر پایه AE، تنشی که سنگ قبلاً تحت آن قرار گرفته است را از طریق تغییر در شیب منحنی تجمعی رخدادهای AE در مقابل تنش، تعیین می‌کند. چنان‌چه که برای اثر حافظه‌ی تغییر شکل، هویت روش با تعیین تغییر شیب در منحنی تنش- کرنش مرتبط است [۱۳]. هرچند، توسط یاماموتو^{۱۰} و همکارانش اظهار شد که این روش، روشی نامطمین بود طوری که تغییرات در گرادیان اغلب قابل شناسایی نبودند [۱۴]. برای حل

^۱ Kanagawa

^۲ Acoustic Emission

^۳ Ushikawa & Mogi

^۴ Holcomb & Costin

^۵ Hughson & Crawford

^۶ Seto

^۷ Friedel & Thill

^۸ Momayez & Hassani

^۹ Pestman

^{۱۰} Yamamoto

این مساله، روش تحلیل نرخ تغییر شکل^۱ (DRA) بعنوان یک روش معتبر و قابل اطمینان برای اندازه‌گیری تنش توسط یاماموتو و همکاران (۱۹۹۰) پیشنهاد و سپس اثبات شد. آنها با آزمایش‌هایی که بر روی نمونه‌های مغزه‌سنگ انجام دادند، به‌طور تجربی ثابت کردند که تنش اولیه را می‌توان از تغییر در گرادپان منحنی تنش-تفاضل کرنش نمونه، تحت بارگذاری تک محوره چرخه ای تعیین کرد. این روش مشابه روش AE است، زیرا که هردوی آنها از خواص غیر الاستیک سنگ‌های تحت فشارش استفاده می‌کنند [۱۴و۱۵].

ستو و همکاران (۱۹۹۹ و ۱۹۹۸) در آزمایش بر روی نمونه‌های مغزه ماسه سنگ و شیل که از معدن ذغال سنگ زیرزمینی تهیه شده بودند، برای تخمین تنش برجا توسط روش‌های AE و DRA بکار گرفتند. آنها با مقایسه نتایج حاصل از این دو روش با نتایج بدست آمده از روش شکست هیدرولیکی دریافتند که تنش‌های تخمینی بوسیله هر دو روش دارای همخوانی خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط شکست هیدرولیکی بودند. همچنین تنش‌های قایم بدست آمده از این دو روش با فشار روباره نیز سازگار بوده است [۱۶،۵].

ویلسکوزا^۲ و همکاران (۲۰۰۲) در روندی مشابه نتایج حاصل از روش DRA در تخمین تنش برجا با انجام آزمایش بر روی انواع نمونه‌های حفاری که از محیط‌های زمین شناسی مختلفی بدست آورده شده بودند، را با نتایج حاصل از روش بیش مغزه‌گیری مرسوم مقایسه نمودند. نتایج آنها نشان داد که در همه موارد، نتایج تخمینی توسط روش‌های AE و DRA با نتایجی که توسط روش بیش مغزه‌گیری بدست آمده بودند، مقادیر تنش برجای مشابهی را نشان داده است [۱۳].

هانت^۳ و همکاران (۲۰۰۳)، پژوهش خود را در خصوص بررسی دلیل ایجاد اثر کایزر و اندرکنش ریزترک‌ها انجام دادند. بر این اساس یک مدل عددی را برای ایجاد یک مغزه مصنوعی سنگ و شبیه

^۱ Deformation Rate Analysis

^۲ Hunt

^۳ Villaescusa

سازی آزمایش‌های بارگذاری تک‌محوری در پژوهش خود بکار گرفتند. آنها براساس نتایجشان اظهار کردند که توانایی مدل عددی در ایجاد مجدد پدیده اثرکایزر و تحلیل نرخ تغییرشکل قابل تایید است و می‌توان مقایسه مستقیمی بین مشاهده‌های عددی و آزمایشگاهی انجام داد [۷].

لوچینکوف (۲۰۰۴) مطالعاتی بر روی اندرکنش میکروتترک‌ها به عنوان بیش‌ترین احتمال مسبب اثر کایزر یا اثر حافظه تغییرشکل را بررسی نمود. برای نشان دادن سطح آسیب به سنگ که در سطح میکرو رخ می‌دهد، یک برنامه مدلسازی المان مجزا را برای این منظور انجام داد. مدل عددی براساس یک نمونه اولیه واقعی (نمونه مغزه ماسه‌سنگ) که پیش‌تر تحت آزمایش DRA قرار گرفته، انجام شده است. او از نتایج خود استنباط کرد که توانایی مدل عددی در نشان دادن اثر حافظه تغییرشکل مورد تایید است. همچنین ارتباط بین این اثر و توسعه میکروتترک‌ها را نشان داده است. بعد از آن، دایت^۱ (سال ۲۰۰۶) پژوهشی را برای آنالیز نتایج (با استفاده از روش DRA) یک برنامه تخمین تنش برجا براساس آزمایش نمونه‌های مغزه گرفته شده از حفاری‌های اکتشافی را ارائه داد. آزمایش‌ها توسط چهار گروه آزمایش مستقل انجام شده‌اند. او علاوه بر تایید تعیین تنش برجا و اثر کایزر توسط این روش، اظهار داشت که نتایج، قوی، قابل تکرار و انجام آنها بوسیله این روش ارزان است [۱۷].

لین^۲ و همکاران در همان سال، جهت ارزیابی و تحلیل تغییرشکل تنش سنگ (پیش تنش) در نمونه‌های ماسه‌سنگ آزمایش‌هایی با استفاده از روش‌های AE و DRA و نیز بوسیله کرنش جانبی انجام دادند. آنها نشان دادند که هریک از کرنش‌های جانبی و نرمال می‌توانند برای ارزیابی تنش سنگ استفاده شوند. همچنین از نتایج حاصل استنتاج کردند که هیچ رابطه قابل ملاحظه‌ای بین خطاهای محاسبه شده تنش و زمان تاخیر برای ماسه‌سنگ مو-شان هنگامی که زمان تاخیر ۱۵ روز است، مشاهده نشده است [۱۸].

^۱ Dight

^۲ Lin

رن و همکاران (۲۰۱۲) وابستگی جهت‌دار روش‌های AE و DRA را در جهت‌های پیش بارگذاری و بارگذاری‌های متعامد مطالعه کردند. طبق نتایج خود، بیان کردند که هیچ اثر حافظه‌ای در دومین بارگذاری در جهت متعامد مشاهده نشده است. اگرچه که هر یک از تعداد تجمعی ترک‌های دومین بارگذاری و مقدار کرنش تفاضلی در نقطه انعکاس توسط اولین بارگذاری در جهت متعامد تاثیر پذیرفته‌اند [۱۹].

وانگ و همکاران (۲۰۱۲) مکانیزم اثر حافظه تغییرشکل و تحلیل نرخ تغییرشکل در سنگ‌های لایه‌ای را در سطح تنش پایین بررسی نمودند. آنها استنتاج کردند که دقت تعیین تنش به ترکیبی از پارامترهای ریولوژیک مصالح و فصل مشترک‌ها و نرخ بارگذاری بستگی دارد. بنابراین نرخ بارگذاری را به‌عنوان پارامتری مهم تلقی کردند و مخصوصاً تنها پارامتری که می‌تواند کنترل شود و تقلیل آن کاهش در دقت بازسازی را منجر می‌شود [۲۰].

هسیه^۱ (۲۰۱۳)، تاثیر خمش^۲ نمونه در بازسازی تنش توسط روش DRA را بررسی و بیان کردند که خمش نمونه‌ها تحت تراکم تک‌محوری به علت نقص‌های قاب بارگذاری ویا آماده سازی نمونه‌ها می‌تواند به‌طور قابل ملاحظه‌ای در بازسازی تنش بوسیله DRA تاثیر بگذارند. آنها نشان دادند که اثر خمش می‌تواند سبب پراکندگی قابل ملاحظه در مقدارهای پیش‌تنش بازسازی شده از منحنی‌های تنش-کرنش از طریق موقعیت کرنش سنج‌ها گردد و به منظور جبران خمش نمونه‌ها پیشنهادهایی را ارائه نمودند [۲۱].

هسیه و دایت (۲۰۱۳) اثرات مطلوب و نامطلوب در بازسازی تنش را با استفاده از روش تحلیل نرخ تغییرشکل بررسی نمودند. آنها روشی را جهت آزمایش آنالیز DRA و نیز راه‌حلهایی را برای بهبود شرایط آزمایش و آزمایش قابل اطمینان پیشنهاد نمودند. هم‌چنین اظهار داشتند که ممکن است نتایج

^۱ Hsieh

^۲ Bending Effect

بسیاری از مطالعه‌های انجام شده در این گونه بررسی‌های آزمایشگاهی به علت نادیده گرفتن این گونه عوامل نتایج آنها نامطلوب بوده و یا این که نتایج‌شان دارای تردید باشد [۲۲].

عطار^۱ و همکاران (۲۰۱۴) ظرفیت DRA در تخمین بزرگی تنش برجای اولیه در قسمت‌های مختلف منحنی تنش-کرنش است را بازبینی نمودند. به‌علاوه یک بررسی را درباره کاربرد روش DRA برای هریک از نمونه‌های سنگ‌های شکننده و شکل‌پذیر انجام و نتایج حاصل از این روش آزمایشگاهی تخمین تنش برجا برای یک مطالعه موردی را با نتایج بدست آمده از روش شکست هیدرولیکی مقایسه کردند. آنها نتیجه گرفتند که روش DRA برای همه انواع سنگ‌های بکر مناسب است و این که این روش به راحتی می‌تواند مقادیر تنش را (با دقت‌های متفاوت) تخمین بزند. هم‌چنین بیان کردند که مقایسه بین مقدارهای تنش برجای بدست آمده توسط روش DRA با مقادیر بدست آمده توسط روش شکست هیدرولیکی سازگاری خوبی را نشان می‌دهد [۴].

۴-۱ مراحل انجام پژوهش

در این پژوهش ابتدا سعی می‌شود، منابع کتابخانه‌ای در خصوص پژوهش‌های صورت گرفته جهت اندازه‌گیری و تخمین تنش به ویژه روش‌های اندازه‌گیری تنش‌های برجا که مبتنی بر حافظه تنش سنگ هستند، جمع‌آوری و توضیح داده شود. سپس، به بررسی حافظه سنگ در ترازهای مختلف تنش با روش تحلیل نرخ تغییر شکل و نیز تجهیزات آزمایشگاهی مربوط که می‌تواند بهترین نتایج را ارائه کند، پرداخته می‌شود. پس از آن، از بلوک‌های سنگی انواع سنگ‌ها (نظیر ماسه سنگ، سنگ آهک، گچ، گرانیت و زیولیت) که دارای رفتارهای متفاوتی هستند، مغزه‌گیری شده و بر روی آنها در سطوح مختلف تنش آزمایش DRA انجام خواهد شد. پس از انجام آزمایش DRA، خواص ژئومکانیک هر نوع سنگ دارای مقاومت فشاری، نسبت پواسون، مدول الاستیسیته و چگالی آنها و منحنی رفتار تنش-کرنش

^۱ Iman Attar

سنگ مربوطه تفسیر خواهد شد. در ادامه، حافظه تنش در سنگ با اعمال بارگذاری و ثابت نگه داشتن بار القا شده و با استفاده از روش DRA مقدار تنش اعمال شده بازیابی می شود. با بررسی نمودن نسبت مناسبت (که در این پژوهش، نسبت تنش تخمینی به تنش پیش بارگذاری است) می توان کارآیی روش DRA را برای هر یک از آزمایش های انجام شده مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. در نهایت بر اساس آزمایش DRA که بر روی مغزه های حفاری در انواع سنگ ها صورت گرفته است، ارتباط نوع رفتار سنگ با کارآیی و کاربرد روش DRA مشخص خواهد شد. لازم به ذکر است اعمال تنش های بارگذاری و ثابت نگه داشتن بار در هر نمونه متغیر و متناسب با نوع سنگ خواهد بود.

۵-۱ ساختار پایان نامه

در این پایان نامه سعی شده است، یکی از روش های آزمایشگاهی که مبتنی بر حافظه تنش سنگ است، جهت بررسی نوع رفتار سنگ ها در تخمین تنش مورد پژوهش قرار گیرد. از جمله مسایل مورد بحث در زمینه روش های مبتنی بر حافظه سنگ این است که تنش پیشین اعمال شده به سنگ در ترازها و محدوده های مختلف رفتار تنش- کرنش سنگ را توسط روش تحلیل نرخ تغییرشکل با چه مقداری می توان بازیابی نمود. در فصل دوم سعی شده است روش های اندازه گیری تنش سنگ که مبتنی بر حافظه تنش سنگ هستند، توضیح داده شود و به طور کلی برخی از پژوهش های انجام شده توسط پژوهشگران قبلی پرداخته شده است. فصل سوم پژوهش حاضر بر روی مکانیزم ریزترک ها در هنگام اعمال بار فشاری و چگونگی تاثیر رشد و انتشار ترک در حافظه تنش سنگ مورد بررسی قرار گرفته است. هم چنین در این فصل سعی شده است وابستگی جهت دار روش های مبتنی بر حافظه سنگ و عوامل موثر در بازسازی تنش پیشین بررسی شده است. در فصل چهارم ابتدا نحوه تهیه نمونه های مغزه سنگ و تصاویر مربوط به آنها آورده شده است. پس از آن، جزییات انجام آزمایش تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی هر یک از نمونه ها و نتایج آنها ارائه شده است. سپس، نمودارهای تنش محوری- کرنش محوری هر یک از سنگ ها رسم شده و شیوه طراحی بارگذاری ها آورده شده است. در نهایت با

انجام آزمایش‌های DRA بر روی نمونه‌ها نتایج آنها مورد تزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. در فصل پنجم نتایج آزمایش‌های حاصل از این پژوهش و پیشنهادهایی برای علاقه‌مندان به پژوهش بر روی روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری تنش پیشین سنگ‌ها ارائه شده است.

فصل دوم:

حافظه متش سنگ و روش های اندازه گیری متش

DRA و AE

سنگ‌ها در زیرزمین در معرض تنش قرار دارند. از آنجا که تنش‌های القایی در اطراف فضاهای ایجاد شده در زمین به‌طور مستقیم در ارتباط با تنش‌های اولیه قبل از حفاری قرار دارند، شناخت دقیق این تنش‌ها قبل از ایجاد فضا ضروری است [۲۳]. نیاز به درک تنش‌های برجا در سنگ مدت‌هاست برای متخصصان ژئوفیزیک و مهندسان شناخته شده است، اما در مقایسه با دیگر خصوصیات سنگ، تنش، کمیتی مشکل برای اندازه‌گیری است [۲۴]. نقص عمده‌ی روش‌های تصدیق شده برای اندازه‌گیری تنش برجا از قبیل روش بیش مغزه‌گیری یا روش شکست هیدرولیکی، این است که این روش‌ها به‌طور معمول گران و زمان‌بر هستند. دیگر کمبود این روش‌ها این است که برای اندازه‌گیری تنش برجا در عمق‌های زیاد، ناکارآمد هستند. به همین دلیل امروزه گرایش به سمت روش‌های تخمین تنش‌های برجا از طریق نمونه‌های مغزه سنگ افزایش یافته است [۲۵]. در این فصل، روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری (یا تخمین) تنش بویژه روش‌های AE و DRA به‌طور مفصل توضیح داده خواهد شد.

۲-۲ مقایسه انواع روش‌های مستقیم و غیرمستقیم اندازه‌گیری تنش

در ابتدا اصطلاح تحلیلی تنش و جابجایی ایجاد شده در اطراف حفره دایره‌ای پیوسته، همگن، الاستیک و با همسانگردی متوسط که توسط کرش (۱۸۹۸) توسعه داده شد، در ارزیابی روش‌های آزادسازی گمانه به‌کار گرفته شده است. از آن پس تلاش‌های زیادی برای اندازه‌گیری تنش صورت گرفته است. اندازه‌گیری تنش‌های سنگ از دهه ۱۹۳۰ انجام شده است و در حال حاضر روش‌های مختلفی برای آن وجود دارد [۲۶]. به‌طور کلی تمامی روش‌های اندازه‌گیری (یا تخمین) تنش را می‌توان به دو گروه اصلی به صورت زیر تقسیم بندی نمود:

۱- روش‌های اندازه‌گیری مستقیم (بر اساس انجام آزمایش‌های برجا) که شامل روش‌های زیر است:

- روش‌های آزادسازی گمانه‌ای (بیش مغزه‌گیری و شکافت گمانه‌ای)

- روش‌های هیدرولیکی (شکست هیدرولیکی و آزمون‌های هیدرولیکی در شکستگی‌های موجود)
 - ۲- روش‌های اندازه‌گیری غیرمستقیم (یا روش‌های مبتنی بر مغزه‌سنگ)، این گروه مشتمل بر آزمون‌های آزمایشگاهی مختلف انجام شده بر روی مغزه‌های حفاری است از قبیل:
 - روش‌های بازیابی کرنش (بازیابی کرنش غیرالاستیک^۱ و آنالیز منحنی کرنش تفاضلی^۲)
 - روش‌های اثر کایزر (انتشار اکوستیک (AE) و تحلیل نرخ تغییر شکل (DRA) [۲۷].
- گروه اول از روش‌های اندازه‌گیری تنش، روش‌هایی هستند که شرایط تنش برجا را با ایجاد کرنش‌ها یا توسط ایجاد و گسترش ترک‌ها که با اغتشاش و دست‌خوردگی حاصل شده‌اند، دربر می‌گیرند. در این روش‌ها اندازه‌گیری تنش (کرنش) به صورت مستقیم صورت می‌گیرد. ضعف اصلی این روش‌ها، صرف زمان زیاد و هزینه بالای آنهاست. به علاوه، برای این روش‌ها اندازه‌گیری تنش برجا در سنگ بستر و در عمق زیاد یا در ناحیه‌های دور از دسترس جایی که هیچ دسترسی از طریق گمانه‌ها یا کارهای معدنی وجود ندارد، بسیار مشکل است [۱۹]. در بازیابی‌ای که فیرهرست^۳ (۲۰۰۳) از توسعه روش‌های اندازه‌گیری تنش انجام داد، دریافت که یکی از ابتدایی‌ترین روش‌ها برای تخمین تنش، جک تخت و روش شکست هیدرولیکی بوده است. هر یک از این روش‌ها در سال ۱۹۵۰ پیشنهاد شده‌اند. مزیت اصلی این روش‌ها بویژه جک تخت، آن است که نیازی به داشتن ثابت‌های الاستیک سنگ برای تخمین تنش‌های مماسی در نقاط دیواره یک حفاری ندارد و تنش‌ها به صورت مستقیم اندازه‌گیری می‌شوند. به علاوه، تجهیزات استفاده شده در آن ثابت و پایدار هستند و حجم بزرگی از سنگ می‌تواند در آزمایش درگیر باشد. هم‌چنین تنش‌ها را برای ناحیه‌های نسبتاً بزرگی تخمین می‌زند [۲۸ و ۹]. اما به دلیل اینکه برای اندازه‌گیری تنش به وسیله این روش‌ها تجهیزات خاصی برای انجام آن موردنیاز است، گران بوده و انجام آن‌ها زمان‌بر هستند [۶]. گروه دوم روش‌ها به عنوان روش‌های اندازه‌گیری غیرمستقیم تنش

^۱ ASR_Anelstic Strain Recovery

^۲ Fairhurst

^۳ DSA_Differential Strain Analysis

قلمداد می‌شوند، به طوری که به صورت مستقیم تنش (کرنش) در محل اندازه‌گیری نمی‌شود، بلکه از انجام آزمایش بر روی مغزه گرفته شده از محل و ساختگاه، در یک آزمایشگاه تنش (کرنش) اندازه‌گیری می‌شوند. روش‌های بازیابی کرنش برپایه رفتارنگاری واکنش نمونه‌های مغزه‌گیری شده از حفاری هستند. پژوهشگران، در بسیاری از موارد این روش‌ها را جزو روش‌های آزادسازی می‌دانند ولی روش‌های اثر کایزر از پدیده اثر حافظه تنش بهره می‌گیرند [۶]. اگرچه در مقایسه با روش‌های اندازه‌گیری برپایه آزمون‌های برجا، روش‌هایی هم‌چون روش AE و روش DRA، علاوه بر این که کار با این روش‌ها بسیار ساده و آسان است، به‌طور قابل ملاحظه‌ای اقتصادی هستند و امکان اندازه‌گیری تعداد زیاد را نیز فراهم می‌کنند. بسیاری از پژوهشگران این دو روش از محتمل‌ترین و امیدبخش‌ترین روش‌ها برای اندازه‌گیری (یا تخمین) تنش برجا می‌دانند. هردوی این روش‌ها براساس اثر کایزر هستند که در ادامه تشریح می‌شوند [۱۹].

۳-۲ حافظه سنگ

ثابت شده است که سنگ‌ها قادر به ذخیره کردن اطلاعات درباره تنش‌ی که پیش‌تر تجربه کرده است (که اثر حافظه سنگ نامیده می‌شود)، هستند. بسیاری از آشکارسازی‌های اثر حافظه در سنگ از قبیل، اثر حافظه تغییرشکل، اثر کایزر، اثر حافظه الکتریکی، اثر حافظه انتشار یونی و غیره یافت شده است. این آشکارسازی‌ها هنگامی که سنگ تحت چندین چرخه بارگذاری-باربرداری قرار گرفته است، مشاهده شده‌اند. زمانی که تنش پیش‌تر اعمال شده در چرخه بارگذاری بعدی به حداکثر مقدار خود رسیده است، می‌توان یک تغییر را در شیب منحنی تنش-کرنش (اثر حافظه تغییرشکل) مشاهده کرد. اگر بار برای ایجاد آسیب درونی به اندازه کافی باشد یک افزایش در فعالیت اثر کایزر می‌تواند مشاهده شود. اکثر روش‌های بازیابی تنش حداکثر، که سنگ که پیش‌تر تحت آن قرار گرفته است، از هر یک از اثر کایزر یا اثر حافظه تغییرشکل بهره می‌برند. روش برپایه انتشار آوایی، تنش‌ی را که سنگ در بارگذاری پیشین تحت آن بوده را توسط یک تغییر در منحنی تعداد ضربات تجمعی AE در برابر تنش تعیین

می‌کند. چنانچه که برای اثر حافظه تغییرشکل، هویت روش با تعیین انحنا در منحنی تنش- کرنش مرتبط است [۲۹]. هرچند که توسط یاماموتو و همکاران اظهار شده است که روش فوق نامعتبر است به طوری که تغییرات در انحنا اغلب واضح نیست. برای حل این مساله آنها روش DRA را پیشنهاد کردند [۱۴]. به طور آزمایشگاهی ثابت شده است که سنگ‌ها خصوصیتی دارند که مقادیرهای حداکثر تنش‌های پیشین اعمال شده را در حافظه خود نگه می‌دارند [۱۴]. بنابراین به طور کلی می‌توان گفت که حافظه تنش سنگ به معنی اندوختن و نگهداری تنش اعمال شده در تاریخ زمین شناسی سنگ است که تحت شرایط آزمایشگاهی می‌توان اطلاعاتی در مورد تنش‌های اولیه آن بدست آورد. این قابلیت در اصل ناشی از آسیب برگشت پذیر (کرنش الاستیک) اندوخته شده در سنگ است. در حالت معمول سنگ می‌تواند تمامی حالت‌های تنش پیشین را حفظ کند. شرایط مکانیکی سنگ‌ها تنها به حالت جریان تنش وابسته نیست اما همه حالت‌های تنش پیشین خود را حفظ می‌کنند. در واقع حافظه، توانایی سنگ در دریافت، به حافظه سپردن و بازگو کردن اطلاعات مربوط به تنش، در خود است. بنابراین یک خصوصیت شناخته شده برای سنگ‌ها، حفظ حداکثر تنش اعمال شده پیشین یا تنش‌های پیشین در حافظه آنهاست (حافظه سنگ) ^۱ [۱۰].

۲-۴ اثر کایزر و اثر مناسبت^۲

اثر کایزر پدیده‌ای را توصیف می‌کند که انتشار آوایی تنها بعد از اینکه بارگذاری، از حداکثر پیشین تجاوز کرده است، اتفاق می‌افتد هنگامی که مصالح الگوهای بارگذاری تکراری را متحمل می‌شوند. شکل ۱-۲ نمونه‌ای از پدیده اثر کایزر را نشان می‌دهد. آن ابتدا توسط ژوسف کایزر^۳، مهندس و دانشمند آلمانی، بررسی شده بود، کسی که به عنوان پدر تکنولوژی AE مدرن بخاطر این کار پژوهشی او در سال ۱۹۵۰ پیدایش تکنولوژی AE امروز بود، شناخته شده است. در ابتدا اثر کایزر پدیده برگشت ناپذیری^۴

^۱ Rock Memory

^۲ Felicity Effect

^۳ - Joseph Kaiser

^۴ Irreversibility phenomenon

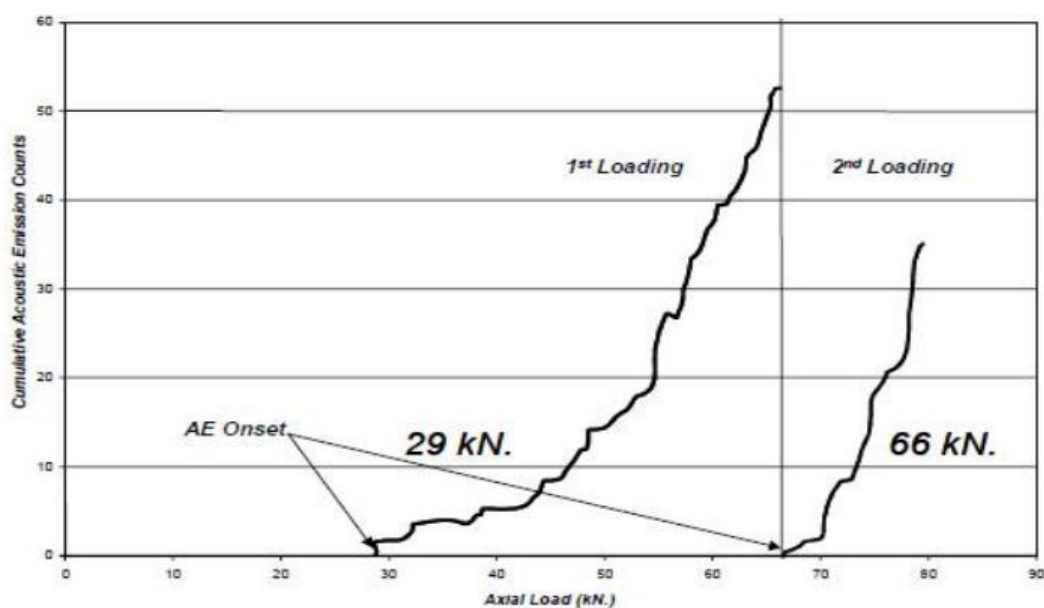
توسط خود کایزر نامیده شده بود. او در رساله‌اش اظهار داشت که کرنش پلاستیک هرچند ناچیز، اما برگشت‌ناپذیر است [۳۰]. او، در هنگام مطالعه‌ی AE ناشی از فلزات تحت بار فشاری، متوجه شد هنگامی که سطح تنش از تنش قبلی اعمال شده فراتر رود امواج صوتی ساطع می‌شود. این پدیده از آن زمان به عنوان اثر کایزر (KE) مطرح شده است [۹، ۳۱ و ۳۲].

در آزمایش‌ها براساس اثر کایزر بر روی خاک و سنگ، گودمن^۱ (۱۹۶۳) نیز آغاز مشابهی را از امواج صوتی در سنگ‌ها تحت بار فشاری مشاهده نمود. پس از آن پژوهش‌های موثری تا زمان کاناگوا و همکاران (۱۹۷۶) گزارش نشده است. آنها به پتانسیل اثر کایزر برای تخمین تنش برجا بر روی نمونه مغزه پی‌بردند. پس از آن این اثر به‌طور گسترده‌ای توسط تعداد زیادی از متخصصان شامل کوریتا و فوجی^۲ (۱۹۷۹)، هالکومب و کاستین^۳ (۱۹۸۶)، هاگسان و کرافورد (۱۹۸۷)، فرایدل و تیل (۱۹۹۰)، ممیز و حسنی (۱۹۹۲)، پستمن و همکاران (۲۰۰۲) و دیگران، مورد پژوهش قرار گرفت [۹]. فرض اساسی این روش آن است که اثر کایزر تنها به تنش فشاری حداکثر پاسخ می‌دهد. هم‌چنین فرض می‌شود که اثرات تنش اعمالی در زمان‌های مختلف زمین‌شناسی، مشابه اثرات تنش اعمالی در آزمایشگاه است [۳۰].

^۱ - Goodman

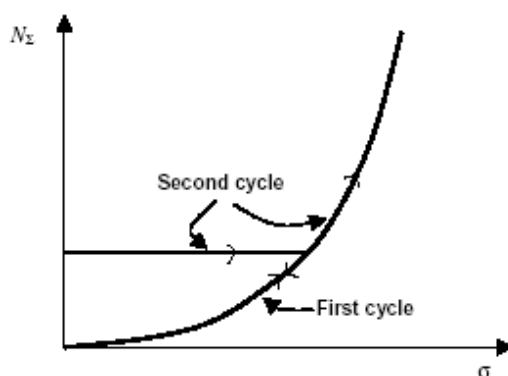
^۳ - Holcomb & Costin

^۲ - Kurita & Fujii



شکل ۲-۱: نمونه ای از اثر کایزر (محور افقی تنش محوری و محور قائم تعداد تجمعی رخدادهای AE) [۳۰].

پدیده کایزر در سنگ‌ها و مواد تحت فرآیند بارگذاری و باربرداری چرخه‌ای ایجاد می‌شود و در واقع یک اندازه‌گیری توسعه آسیب در مصالح تحت بارگذاری است. تحت بارگذاری محوری-باربرداری تکراری این پدیده مشاهده شده است. در ساده‌ترین مورد، بارگذاری تک‌محوری با افزایش تنش حداکثر چرخه، از یک چرخه بارگذاری به چرخه بارگذاری بعدی، انجام می‌شود [۳۲]. تا زمانی که سطح تنش، پایین‌تر از تنش حداکثر قبلی است، فعالیت AE آغاز نشده و AE صفر است. چنانچه مقدار تنش اعمالی به تنش حداکثر قبلی برسد، فعالیت AE افزایش می‌یابد. در شکل (۲-۲) تصویری از تابع مجموع ضربات AE بر حسب تنش در دو چرخه تراکم تک‌محوری ارائه شده است. مجموع ضربات AE، مجموع کل سیگنال‌های AE دریافت شده از آغاز آزمایش تا زمان مورد نظر است. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود، هنگامی که سطح تنش در چرخه دوم از تنش حداکثر چرخه اول بیش‌تر شود، یک انحنا در منحنی روی می‌دهد. شدت ضربه به معنای میزان افزایش تعداد سیگنال‌های AE است که در هر ثانیه (یا بر اثر افزایش یک مگاپاسکالی تنش)، روی می‌دهد [۳۳]. اثر مناسبت، تفکیکی از اثر کایزر است. فاولر (۱۹۷۷) این پدیده را در مصالح کامپوزیتی کشف کرد. این کمیت به‌عنوان نسبت تنش تخمین شده توسط AE به تنش حداکثر پیشین تعریف شده است [۳۰].



شکل ۲-۲: مجموع ضربات AE بر حسب تنش در دو چرخه متوالی از تراکم تک محوری [۳۳].

۵-۲ روش انتشار آوایی (AE)

روش انتشار آوایی بر پایه اثر کایزر است. انتشار آکوستیک در واقع، پدیده صوت و فراصوت منتشره شده بصورت امواج الاستیک در مصالح تحت فرآیندهای شکستگی و تغییر شکل، برای مثال، حرکت ترک‌ها و جابجاشدگی‌ها است [۳۰]. کاناگوا و همکاران (۱۹۷۶) به پتانسیل این پدیده در تخمین تنش برجا پی بردند [۹] و پس از آن بر همین اساس روشی را برای تخمین تنش برجا با استفاده از پدیده اثر کایزر نمونه‌های سنگ تحت تراکم تک محوری پیشنهاد نمودند و با انجام آزمایش‌های تک محوره بر روی نمونه‌های مغزه سنگ آن را به اثبات رساندند. از آن پس این روش بر پایه اثر کایزر، روش AE نامیده شده است [۱۴]. آنها همچنین تنش‌های تخمین زده شده توسط روش پیشنهادی خود را با نتیجه روش‌های اندازه‌گیری مستقیم مقایسه نمودند. بدین ترتیب، اظهار کردند که روش AE، روشی معتبر و قابل اطمینان برای تخمین تنش‌های برجاست [۱۵]. در روش آنها تغییر در فعالیت AE با افزایش تنش اعمال شده اندازه‌گیری شده است [۱۴] مقدار تنش اعمال شده در نقطه‌ای که نرخ AE بطور ناگهانی افزایش می‌یابد، به عنوان مقدار تنش برجا در نظر گرفته شده است و زمانی که بار اعمالی به نمونه از سطح تنش قبلی تجاوز کند، AE نمود پیدا می‌کند. در این روش معمولاً بارگذاری در دو چرخه تک محوری انجام می‌شود. در چرخه اول، فعالیت AE در تمام سطوح تنش ایجاد می‌شود، ولی در چرخه دوم، فعالیت AE تا سطح تنش اعمال شده قبلی مشاهده نمی‌شود. پدیده کایزر در سنگ، به گسترش

ریزترک‌هایی که در تنش قبلی تشکیل شده‌اند، مرتبط است (فوجی و کوریتا، ۱۹۷۹). گسترش ریزترک‌ها فعالیت AE و رفتار غیرالاستیک کرنش را بعد از عبور از سطح تنش قبلی، القا می‌نماید [۱۳]. چون نمونه سنگ شامل ریزترک‌ها است، چرخه اول بارگذاری اغلب نوفه‌ای را ایجاد می‌کند که با بسته شدن ترک و تراکم آن مرتبط است. این نویزها اغلب پدیده کایزر را پیچیده می‌کند. البته می‌توان آنها را توسط چرخه‌های بارگذاری-باربرداری بعدی در سطوح تنش زیر پدیده کایزر حذف نمود و در نتیجه افزایش در AE مرتبط با پدیده کایزر نمایان تر و مشخص تر می‌شود. اکثر نویزها توسط چرخه دوم کاهش می‌یابند و تنش قبلی را می‌توان در همین چرخه تخمین زد. تنش محاسبه شده از روش AE حداکثر تا ۱۰٪ از تنش قبلی تفاوت دارد [۱۰]. تعدادی از پژوهشگران (مانند کاناگاوا و همکاران (۱۹۷۹)، ممیز و حسنی (۱۹۹۲)، ستو و ویلوسکوزا (۱۹۹۹))، گوناگونی درجه‌های موفق در کاربرد روش AE برای اندازه‌گیری تنش برجا را گزارش کرده‌اند [۶].

۲-۵-۱ سیگنال های AE

برای آنالیز فعالیت انتشار آوایی، اولین گام تمیز دادن سیگنال‌های انتشار آوایی از امواج جاری^۱ ناشی از سیگنال‌های ناخواسته AE و سرعت است. تنها سیگنال‌های تجاوز کننده از ولتاژ آستانه بعنوان سیگنال‌های AE شناخته شده‌اند. تعاریف عمومی سیگنال‌ها بصورت زیر هستند چنانچه که در شکل ۲-۳ نشان داده شده‌اند [۱۰]: انتشار صوت (AE): انتقال امواج الاستیک تولید شده توسط آزادسازی سریع انرژی از منابع متمرکز شده درون مواد است. منابع این انتشارها در سنگ با آغاز و توسعه ترک‌های تحت تنش، مرتبط است.

سنسور^۲: ابزاری که حرکات جزئی ایجاد شده توسط امواج الاستیک را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند.

^۱ Running Waves

^۲ -Sensor

کوپلنت^۱: ماده‌ای که در فاصله بین سنسور و نمونه سنگ بکار می‌رود تا انتقال انرژی صوتی بهتر انجام شود.

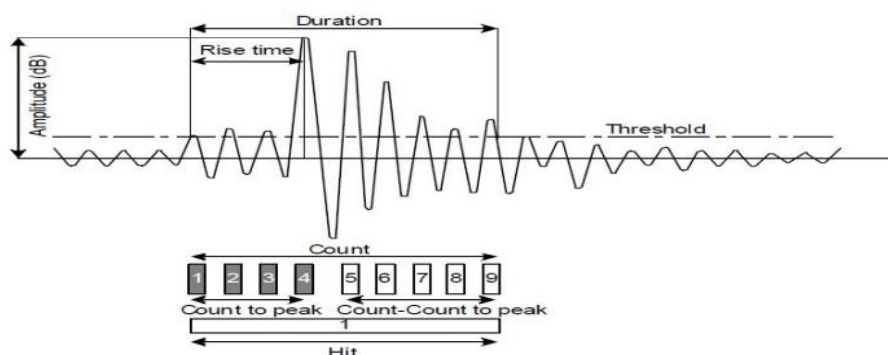
رویداد^۲: تعداد تحریک‌های AE که توسط سنسور دریافت شده است.

آستانه^۳: سطح ولتاژی که پالس‌های بالاتر برای یافتن تحریک‌های AE در نظر گرفته می‌شوند.

دامنه^۴: بالاترین ولتاژی که توسط AE بدست می‌آید.

انرژی^۵: معمولاً مساحت زیر پوش سیگنال ایجاد شده است. اما در بعضی موارد مقدار مربع دامنه در نظر گرفته می‌شود.

شمارش^۶: تعداد پالس‌های عبوری آستانه که توسط عملگر سیگنال AE دریافت می‌شود.



شکل ۲-۳ خصوصیات سیگنال AE [۳۰].

۲-۵-۲ مکانیزم منابع انتشار آوایی

الف) سیگنال‌های انتشار آوایی؛ سیگنال‌های AE تولید شده، از نظر توزیع سرعت انرژی به دو نوع سیگنال‌های گذرا^۷ (یا نوع انفجاری^۸) و سیگنال‌های پیوسته^۹ طبقه‌بندی می‌شوند. اکثر رخدادها از نوع

^۱-Couplant

^۲-Event

^۳-Threshold

^۴-Amplitude

^۵-Energy

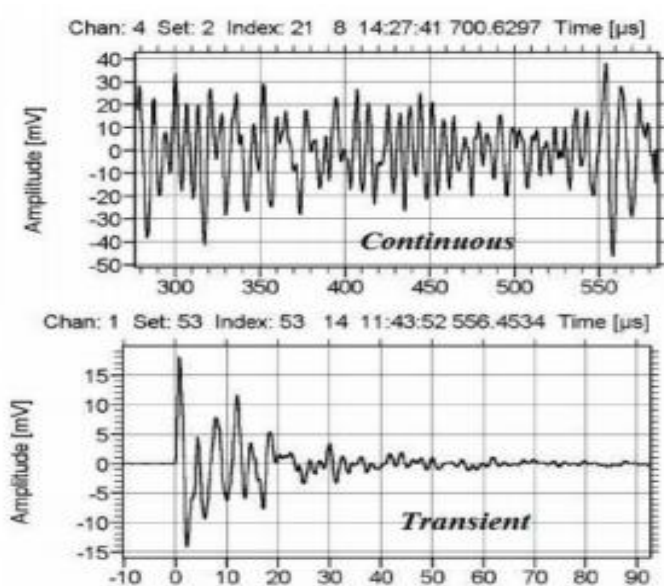
^۶-Count

^۷ Transient

^۸ Burst

^۹ Continuous

سیگنال‌های گذرا هستند از قبیل شکستگی سریع و نویزهای شدید، که بیانگر این است که عمده سیگنال‌های AE از نوع انفجاری هستند. این نوع سیگنال‌های AE به عنوان شروع و پایان واضح و تمایز آشکار از نویزهای پیش‌زمینه توصیف شده‌اند. حتی آن سیگنال‌های پیوسته پدیدار شده نیز عمدتاً در انطباق با تعداد زیادی از هم‌پوشانی رخدادهای گذرا هستند. شکل (۲-۴) این دو نوع سیگنال AE را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴: انواع سیگنال‌های AE، سیگنال نوع پیوسته (بالا) و سیگنال نوع گذرا (پایین) [۳۰].

سیگنال‌های AE گذرا به راحتی متمایز شده‌اند، اما سیگنال‌های AE پیوسته در نتیجه از نشت‌ها، جریان از نویزهای پیش‌زمینه متمایز شده‌اند بخاطر نوع سیگنال‌های AE و نویز پیش‌زمینه که هر دو پهن باند^۱ هستند [۳۰]. (ب) رشد ترک منابع AE؛ رشد ترک یکی از قابل‌توجه‌ترین منابع AE است. هنگامی که یک ترک ایجاد شده است، ابعاد آن به‌طور ناگهانی از صفر حالت صعودی به خود می‌گیرد. به‌طور هم‌زمان، تغییرات موضعی در تنش و کرنش اتفاق می‌افتد، که امواج اولتراسونیک الاستیکی (AE) را منتشر می‌کند. دو نوع اصلی ترک‌ها، ترک‌های شکننده^۲ و شکل‌پذیر^۳، با امواج AE منتشر شده دارای

^۱ Broad band

^۲ Ductile

^۳ Brittle

رابطه‌ای نزدیک هستند. برای شکستگی شکننده، تغییر تنش با یک ترک بزرگ و سریع همراه است جایی که امواج الاستیک دامنه بلند انتقال دهنده بخش بزرگی از انرژی منابع را ایجاد می‌کند که هیچ انرژی کافی برای ادامه وضعیت پایدار ترک وجود ندارد و بنابراین ترک به سرعت انتشار می‌یابد. برای شکستگی شکل‌پذیر، آن به آهستگی رشد می‌کند، چون در آن زون منبسط شونده جابجاشدگی‌ها توسط بیشین (اکثریت) انرژی ناشی از منابع رانده شده‌اند. در این شرایط، تشعشع به صورت امواج الاستیک می‌تواند انرژی بسیار کم‌تری از ترک بدست آورد. پژوهش اسکروبی^۱ نشان داد که دامنه سیگنال‌های AE توسط نرخ توزیع انرژی کنترل شده‌اند تا انرژی. این توضیح می‌دهد چرا رشد ترک شکننده به سهولت تعیین شده‌اند و چرا رشد ترک شکل‌پذیر ممکن است به سختی تعیین شود [۳۰].

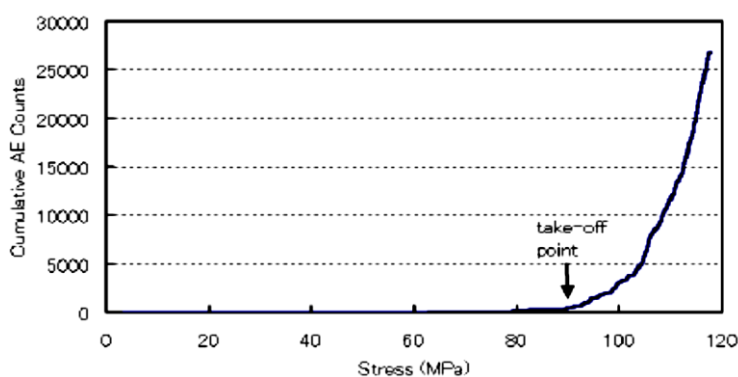
۲-۵-۳ آزمون و اندازه‌گیری توسط روش AE

همان‌طور که توضیح داده شد، عمومی‌ترین روش اندازه‌گیری تنش براساس پدیده کایزر، شامل بازیابی نمونه‌های مغزه از پوسته زمین و آزمایش نمودن آنها در آزمایشگاه است. هنگامی که یک نمونه سنگ از یک گمانه عمیق مغزه‌گیری شده است، آن از یک میدان تنش برجا به یک شرایط اتمسفریک برداشته شده است [۳۴]. اما سوال مهم این است که میزان آسیب‌القایی در طی عملیات مغزه‌گیری، چگونه بر حافظه تنش برجای سنگ اثر می‌گذارد. در طی مغزه‌گیری، آسیب به طرق مختلفی در سنگ ایجاد می‌شود. وقتی یک گمانه قایم به نقطه‌ای در توده سنگ می‌رسد، تنش اصلی قایم به تدریج کاهش می‌یابد، درحالی‌که تنش‌های افقی تازمانی که سنگ داخل مغزه‌گیر است تغییر نمی‌کنند، اما پس از آن تنش‌های افقی کاهش می‌یابند [۱۰]. چرخش مته حفاری یکسری آسیب‌های اضافی (که توسط نیروهای اصطکاکی ایجاد شده‌اند) را بوجود می‌آورد. اثر آسیب ناشی از چرخش مته توسط میشی هیرو^۲ (۱۹۹۱) مطالعه شده است. نمونه‌های مکعبی

^۱ Scruby

^۲ - Michihiro

بزرگ تحت تراکم تک‌محوری بارگذاری (بارگذاری قبلی) و سپس باربرداری شدند. به علاوه، نمونه‌هایی کوچک از بلوک تهیه شده و در تراکم تک‌محوری آزمایش شدند. مسلماً این رویه با رویه مغزه‌گیری واقعی تفاوت دارد، چون مغزه‌گیری واقعی تحت تنش‌های برجا انجام می‌شود. تجربیات میشی هیرو نشان داد که پدیده کایزر در نمونه‌های کوچک حاصل از بلوک بزرگ، بطور کامل مشاهده می‌شود (سطح آسیب ایجاد شده توسط چرخش مته، اثر ناچیزی در مشاهده پدیده کایزر دارد) [۳۳ و ۳۵]. سطح تنشی که شدت AE شروع به افزایش می‌یابد، باید در منحنی مجموع مقادیر AE، یا شدت رویدادها، شمارش‌ها، یا انرژی به عنوان تابعی از تنش فشاری تعیین شود. شکل ۲-۵ نمونه‌ای از منحنی "مجموع مقادیر AE برحسب تنش" را نشان می‌دهد. منحنی رفتار AE سنگ از تنش صفر تا تنش اوج، نقطه جهش (پدیده کایزر) را نشان می‌دهد که توسط آن تنش برجا را می‌توان تخمین نمود [۱۰].



شکل ۲-۵: منحنی مجموع شمارش‌های AE برحسب تنش فشاری در اندازه‌گیری تنش از یک نمونه مغزه سنگ با استفاده از روش AE [۱۰].

۲-۶ روش تحلیل نرخ تغییر شکل (DRA)

۲-۶-۱ اصول روش تحلیل نرخ تغییر شکل

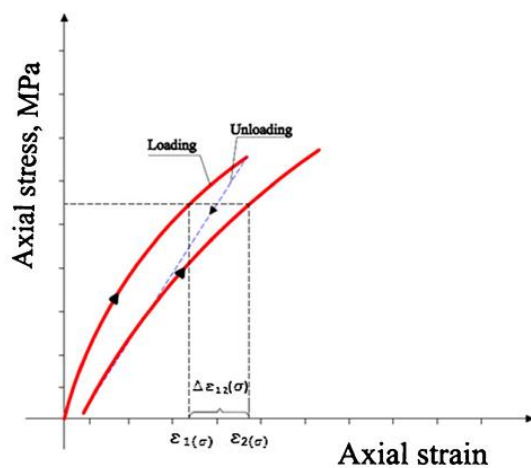
برای سال‌ها، تنها روش برای تخمین تنش اثرکایزر از طریق مقادیر انتشار آوایی بود بوسیله رسم منحنی زمان یا تنش با تعداد تجمعی رخدادهای انتشار آوایی و بدین صورت تنش پیشین توسط مشاهده نقطه انحنا در منحنی تخمین می‌شد (کاناگاوا و همکاران ۱۹۷۶). اگرچه این روش در صورتی

که داده‌های با دقت بالا در دسترس باشند، نتایج خوبی را می‌دهد؛ از سویی به مهارت و تجربه در براساس اثر DRA تعیین دقیق نقطه‌ای که تغییر در شیب رخ می‌دهد نیز نیاز دارد [۳۶]. روش ، زیرا هر دوی آنها از خواص غیر الاستیک سنگ‌های AE حافظه تغییر شکل است. مشابه با روش تحت فشارش استفاده می‌کنند. در این روش مغزه‌های ثانویه از طریق یک مغزه منشا جهت‌دار حفاری ، فرآیند با AE و آماده شده و سپس تحت تراکم تک‌محوره قرار می‌گیرند. اگرچه، به جای ثبت رفتارنگاری تغییرات در کرنش‌های تعیین شده توسط تعدادی از کرنش‌سنج‌های چسبانده شده به مغزه هنگامی که نمونه متحمل بارگذاری تراکمی چرخه‌ای قرار می‌گیرد، مرتبط است. یاماموتو و همکاران (۱۹۹۰) به‌طور تجربی اثبات کردند که، تنش اولیه را می‌توان از تغییر در گرادیان منحنی تنش-کرنش نمونه، تحت بارگذاری تک‌محوره چرخه‌ای تعیین نمود. این روش به روش تحلیل نرخ (معروف است [۵،۱۳، ۱۷ و ۳۷]. در واقع، مفهوم روش آن است که یک تغییر در DRA تغییر شکل رفتار تنش-کرنش هنگامی که بارگذاری از حداکثر تنش پیشین اعمال شده تجاوز می‌کند، وجود دارد. فرآیند با بارگذاری نمونه تا تنش برجای حداکثر، سپس باربرداری آن و تکرار چرخه یک بار دیگر مرتبط است (شکل ۲-۶). تفاضل کرنش بین دو منحنی بارگذاری، وابسته با مقدار تنش یکسان، در توسط تابع تفاضل کرنش (رابطه DRA دوره‌های تنش محوری رسم شده است. فرمول اساسی روش روش ۱-۲) توضیح داده شده است [۴، ۶، ۱۴] که در بخش بعد به طور مفصل تشریح داده شده‌اند. تحلیل نرخ تغییر شکل به‌عنوان یک روش غیرمستقیم و بر پایه مغزه برای تخمین تنش برجا پیشنهاد زده شده است. تنش‌ها نه به‌صورت برجا بلکه از روی مغزه‌های حفاری شده، در آزمایشگاه تخمین می‌شوند. زمانی که سنگ تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار می‌گیرد، تغییر عمده‌ای در شیب منحنی تنش محوری-کرنش محوری در ناحیه‌ای که تنش حدوداً با تنش حداکثر برابر است، ایجاد می‌شود. این تغییر عمده به ویژه در بارگذاری سوم یا پنجم به وضوح قابل مشاهده است (شکل ۲-۷) و این اصل،

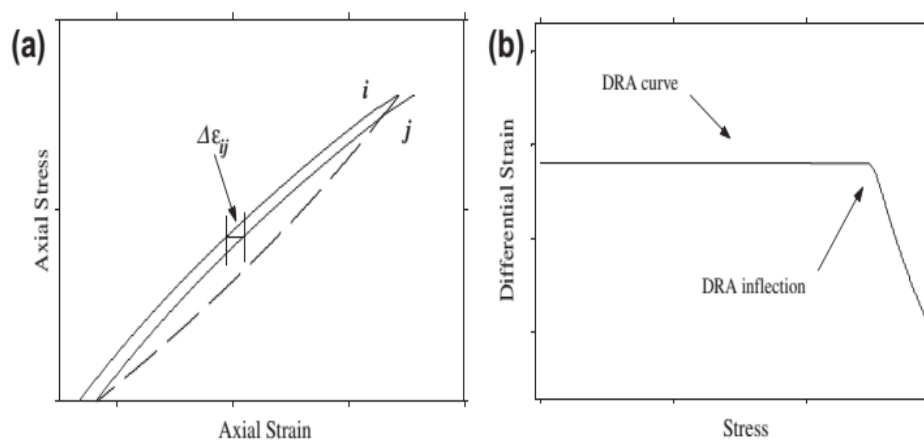
را تشکیل می‌دهد [۱۳]. یاماموتو و همکاران (۱۹۹۰) با انجام آزمایش‌های DRA اساس روش بارگذاری تک‌محوره چرخه‌ای، مقادیر تفاضل

(۱-۲)

کرنش را در طول بارگذاری، بین دو چرخه، بعنوان تابعی از تنش محوری اعمالی اندازه‌گیری نمودند [۵، ۱۳، ۱۴ و ۳۷].



شکل ۲-۶: فاعده اصلی روش تحلیل نرخ تغییر شکل [۴ و ۶].



شکل ۲-۷: (a) منحنی تابع تفاضل کرنش، (b) منحنی DRA [۲۰].

با استفاده از نقطه انحنا و خمیدگی ارایه شده در رابطه (۲-۳)، حداکثر^۱ تنش پیش‌تر اعمال شده می‌تواند تعیین شود. از آن پس این انحنا، انحنا^۲ DRA نامیده شده است [۲۰]. طبق نظر یامشیکوف^۳ و همکاران (۱۹۹۴)، اوتاگوا و همکاران (۱۹۹۷) و چان^۴ (۲۰۰۸)، در دوره زمانی انحنا^۲ DRA نامشخص یا حتی ناپدید می‌شود این پدیده اثر محوشدگی است [۱۵، ۴۰ و ۴۱]. نمونه‌ای از منحنی تنش-تابع تفاضل کرنش روش DRA در شکل (۲-۸) نشان داده شده است [۲۰]. رفتار مکانیکی ترک‌های از قبل موجود در نمونه سنگ، باعث ایجاد کرنش‌های غیرخطی متناسب با تنش محوری اعمال شده می‌شود و زمانی که تنش برشی از یک مقدار بحرانی تجاوز کند، انتظار می‌رود که لغزش اصطکاکی^۴ بر روی سطح ترک رخ دهد. یک ترک کششی محصور شده ممکن است با تغییر در تنش محوری اعمال شده بر آن بطور الاستیک بسته و یا باز گردد. این نوع رفتار غیرخطی در کرنش در بارگذاری چرخه‌ای، تا زمانی که اندازه ترک‌های از قبل موجود تغییر نکند، اغلب بازگشت‌پذیر هستند. اجزا بازگشت‌پذیر کرنش با اعمال معادله (۲-۱) حذف می‌شوند [۷ و ۱۴]. ممکن است تنش محوری اعمالی بر اندازه بعضی ترک‌های موجود در سنگ تاثیر گذاشته و آنها را گسترش دهد و همچنین ترک‌های جدید را بوجود آورد؛ در تفسیر پدیده حافظه تغییرشکل، انتظار بر این است که ایجاد و رشد ترک‌ها زمانی روی دهد که تنش اعمالی از مقدار تنش حداکثر قبلی تجاوز کند. کرنش حاصله از این حالت بازگشت‌ناپذیر بوده و در تابع تفاضل کرنش تعیین شده توسط معادله (۲-۱) از بین نمی‌رود. واضح است که با استفاده از تابع تفاضل کرنش می‌توان جز بازگشت‌ناپذیر کرنش غیرخطی اندازه‌گیری شده را، توسط حذف جز برگشت‌پذیر (کرنش‌های الاستیک) تعیین کرد. شکل ۲-۸ نمونه‌ای از منحنی DRA در برابر تنش را نشان می‌دهد. بنابراین با استفاده از تابع تفاضل کرنش می‌توان نقطه انحنا را در منحنی تنش-کرنش برای تخمین مقدار جز قائم تنش برجا در امتداد محور بارگذاری بکار برد [۱۳ و ۱۴]. شکل ۲-۹ منحنی‌های تنش-تفاضل کرنش، برای یک نمونه گرانودیوریت در سومین تا ششمین چرخه‌ی بارگذاری را نشان

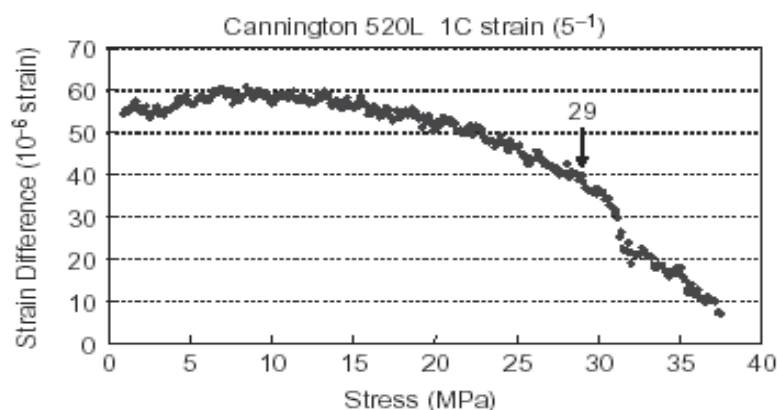
^۱ peak

^۳ Yamshchikov

^۲ Chan

^۴ frictional sliding

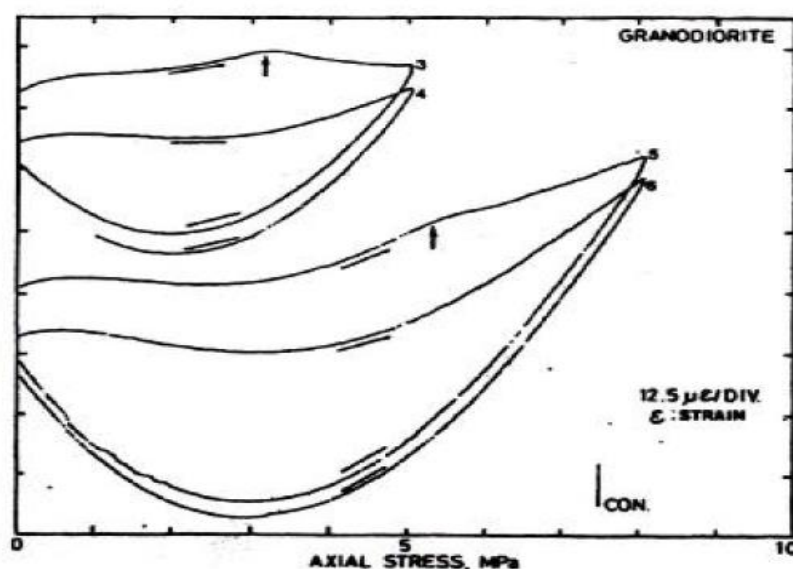
می‌دهد و روش بارگذاری به صورت نمادین در شکل (۲-۱۰-الف) ارائه شده است. برای یک مرحله بارگذاری و باربرداری، تنش حداکثر به طور متوالی در دو چرخه بارگذاری-باربرداری ایجاد شده است. با در نظر گرفتن کرنش باقیمانده در انتهای باربرداری، برای چرخه بارگذاری و باربرداری، کاهش منحنی کرنش همانند یک حلقه پسماند است. فاصله زمانی بین انتهای باربرداری و شروع بارگذاری مرحله بعدی حدود یک دقیقه است. نکته قابل توجه در مورد تغییرات شیب که بوسیله فلش در شکل نشان داده شده، این است که این تغییرات در بارگذاری سوم یا پنجم به طور واضح مشخص است در صورتی که تغییرات آن‌چنانی در بارگذاری چهارم یا ششم مشاهده نمی‌شود. این تغییر شیب در تنشی، نزدیک حداکثر بارگذاری چرخه اتفاق می‌افتد.



شکل ۲-۸: نمونه ای از نمودار تفاضل کرنش برای نمونه مغزه گیری شده [۱۳].

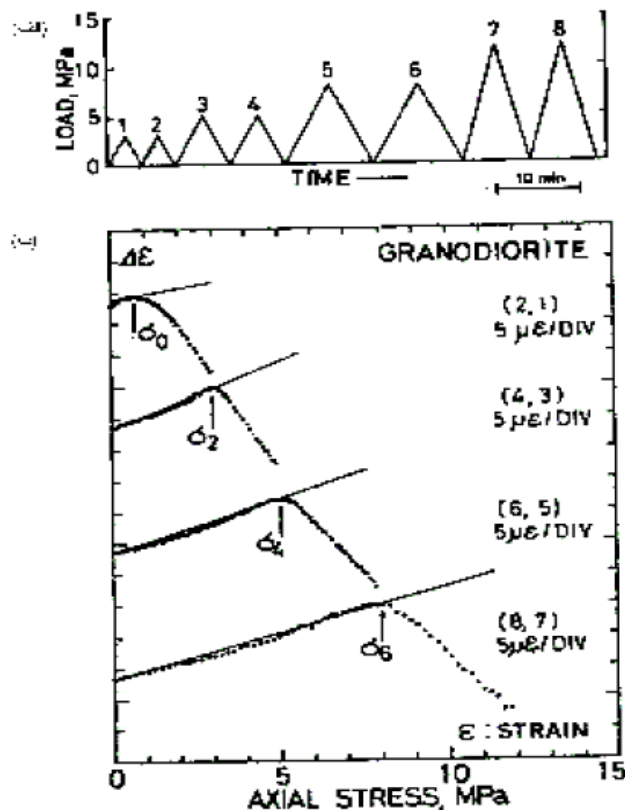
شکل (۲-۱۰-ب) نمودارهای توابع تفاضل کرنش بدست آمده از منحنی‌های تنش-کرنش کاهش یافته را نشان می‌دهد [۱۴]. با توجه به شکل، در تنش‌های کم‌تر از تنش حداکثر پیشین، نقطه انحنا را می‌توان بوسیله یک خط مستقیم با شیب مثبت تقریب زد، که در نزدیکی تنش حداکثر پیشین به طور ناگهانی به سمت پایین خمیده می‌شود. شیب منفی در تنش‌های اعمالی بالاتر از حداکثر تنش پیشین نشان می‌دهد که نمونه سنگی در چرخه اول بارگذاری راحت‌تر از بارگذاری بعدی در چرخه‌های متوالی تغییر شکل می‌دهد. این موضوع به اثر کایزر اشاره می‌کند. ملاحظه می‌شود که گسترش ترک‌های موجود در نمونه و یا تشکیل ترک‌های جدید تنها در آزمایش اول تحت تنش‌های اعمالی بالا صورت می‌گیرد.

در حالت عکس، مفهوم شیب مثبت این است که نسبت به بارگذاری اول، نمونه بیشتر تحت تاثیر تنش اعمالی در بارگذاری دوم قرار می‌گیرد. احتمالاً این مساله در نتیجه افزایش تراکم ترک‌ها در بارگذاری اول در تنش‌های بالا است [۱۴]. با ملاحظه به رفتار میکرومکانیکی ترک‌های از پیش موجود در نمونه، کاربرد تنش محوری باعث افزایش کرنش غیرخطی خواهد شد. به عبارت دیگر، تغییر در تنش محوری سبب باز یا بسته شدن ترک کششی می‌گردد. درحالی‌که یک بارگذاری بیش از اندازه، سبب رشد ترک‌ها و ایجاد ترک‌های جدید خواهد شد؛ چنین رفتار کرنشی اغلب برگشت‌پذیر تلقی شده است [۱۵]. در رابطه (۱-۲)، مولفه‌های برگشت‌پذیر کرنش توسط تفریق کرنش‌ها حذف شده‌اند. این پدیده هنگامی پدید می‌آید که تنش محوری از حداکثر تنش پیشین تجاوز کند چون این به عنوان نقطه آغاز میکروتورک‌های برگشت‌ناپذیر شناخته شده است. اگر میکروتورک جدیدی ایجاد نشده است، انتظار می‌رود که نرخ کرنش مشابه با قبل از بارگذاری (تنش پیش‌تر القا شده به سنگ) باشد. از این رو، یک نقطه خمیدگی می‌تواند با استفاده از تفاضل کرنش در ترم‌های منحنی‌های تنش-کرنش تفاضلی ترسیم شود که حداکثر تنش پیش‌تر اعمال شده به نمونه را نشان می‌دهد [۱۳ و ۴].



شکل ۲-۹: منحنی تنش-کرنش کاهش یافته برای نمونه گرانودیوریت تحت بارگذاری تک محوری (محور افقی تنش و

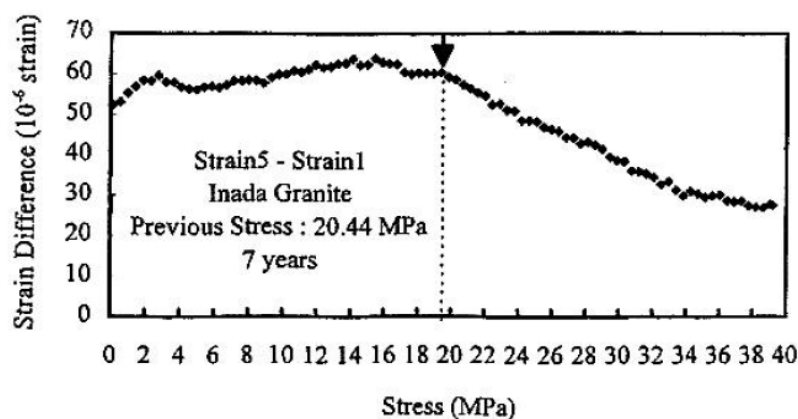
محور قائم تفاضل کرنش) [۱۴].



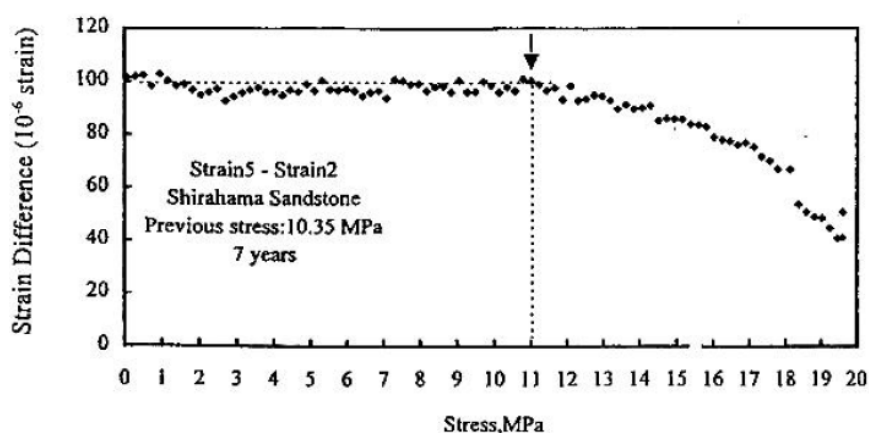
شکل ۲-۱۰: الف: شیوه بارگذاری نمونه گرانودیوریت، ب- منحنی تنش-تفاضل کرنش مربوط به نمونه گرانودیوریت

[۱۴].

اگرچه، حافظه تنش به طور گسترده‌ای مطالعه شده است، درک تیوری آن هنوز ناقص است. تیوری آسیب سنگ و ایجاد میکروترک‌های جدید به نوعی این پدیده را توضیح می‌دهد. هنگامی که یک نمونه تحت تنش قرار گرفته است، آسیب در مقیاس میکرو در آن ایجاد شده است و نیز توسط مکانیزم‌های شبکه وسیعی از ترک‌ها توسعه داده شده است. پس از بارگذاری و باربرداری مجدد، ایجاد و بهم آمیختگی هسته میکروترک‌های جدید تا رسیدن به سطح آسیب پیشین شروع نمی‌شود، از این رو، برخی ترک‌های جدید پس از تجاوز از آن سطح پدید خواهد آمد [۱۰]. شکل‌های (۲-۱۱) و (۲-۱۲) مثال‌هایی از تخمین تنش برجا به روش تحلیل نرخ تغییرشکل بر روی نمونه‌های گرانیت اینادا و ماسه‌سنگ شیراهاما که توسط ستو و همکاران انجام گرفته است، را نشان می‌دهند. نمونه گرانیت اینادا و ماسه سنگ شیراهاما، هفت سال قبل از آزمایش به ترتیب تحت تنش ۲۰/۴۴ و ۱۰/۳۵ مگاپاسکال قرار داشتند [۵].



شکل ۲-۱۱: تابع تفاضل کرنش مابین بارگذاری اول و پنجم مربوط به گرانیت اینادا [۵].



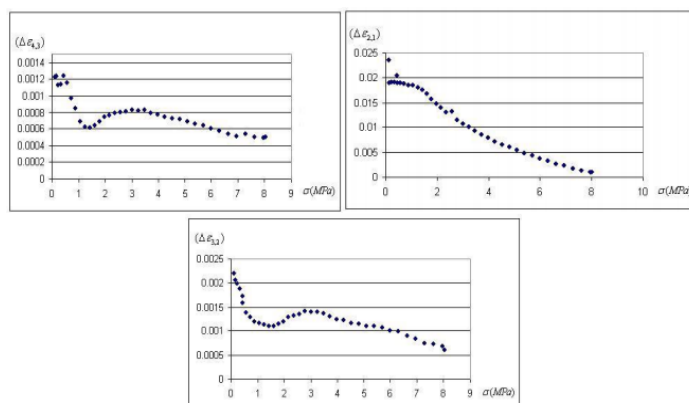
شکل ۲-۱۲: تابع تفاضل کرنش مابین بارگذاری دوم و پنجم مربوط به ماسه سنگ شیراهاما [۵].

سمندری (۱۳۸۴) آزمایش‌هایی را بر روی نمونه‌های تهیه شده از ساختگاه سد بختیاری به منظور تخمین مقدار تنش برجا توسط روش DRA انجام داد. به منظور بررسی، از توده سنگ سد بختیاری و برای آزمایش از مغزه‌های حفاری شده در یکی از گالری‌های اکتشافی استفاده نموده است. نمونه سنگ آهک از سه عمق ۸/۲، ۱۲/۷ و ۱۴/۳ متری گمانه حفاری شده از گالری با قطر ۹۰ میلی‌متر از ساختگاه تهیه گردیده و آزمایش DRA بر روی نمونه‌های مغزه‌گیری مجدد در سه جهت مختلف که با قطر ۲۶ میلی‌متر از مغزه‌های حفاری گرفته شده انجام شده است. تنش بدست آمده از آزمایش برای سه عمق نیز در جدول (۲-۱) ارایه شده است. برای نمونه‌های مربوط به عمق ۸/۲ متری برای چهار چرخه بارگذاری و باربرداری نمودارهای تفاضل کرنش برای نمونه A_۱ بعنوان نمونه بصورت شکل (۲-۱۳) آورده

شده است. با توجه به منحنی‌های ارایه شده و نتایج قبلی بدست آمده توسط سمندری معمولاً نمی‌توان از منحنی مربوط به تفاضل کرنش (شکل ۲-۱۳)، برای تخمین تنش استفاده نمود. این حالت بخاطر عدم ایجاد حافظه تنش در نمونه و عدم امکان بازیابی حافظه تنش است [۴۰]. از این حافظه تحت عنوان حافظه تنش صفر یاد می‌شود و تفاوت آن با حافظه تنش در این است که در چرخه‌های پایین آزمایش از بین می‌روند. در واقع این حافظه جز حافظه کوتاه مدت سنگ محسوب می‌شود که یاماموتو و همکارانش نیز در آزمایش‌های خود به این موضوع دست یافته‌اند [۱۴]. او با توجه به این آزمایش‌ها و آزمایش‌های برجا انجام شده در تکیه‌گاه سد بختیاری با روش اسلاتر و مقایسه این نتایج اظهار داشتند که قابلیت و توانایی روش DRA در تخمین تنش برجا قابل تایید است [۴۰].

جدول ۲-۱: نتایج بدست آمده از تحلیل نرخ تغییر شکل [۴۰].

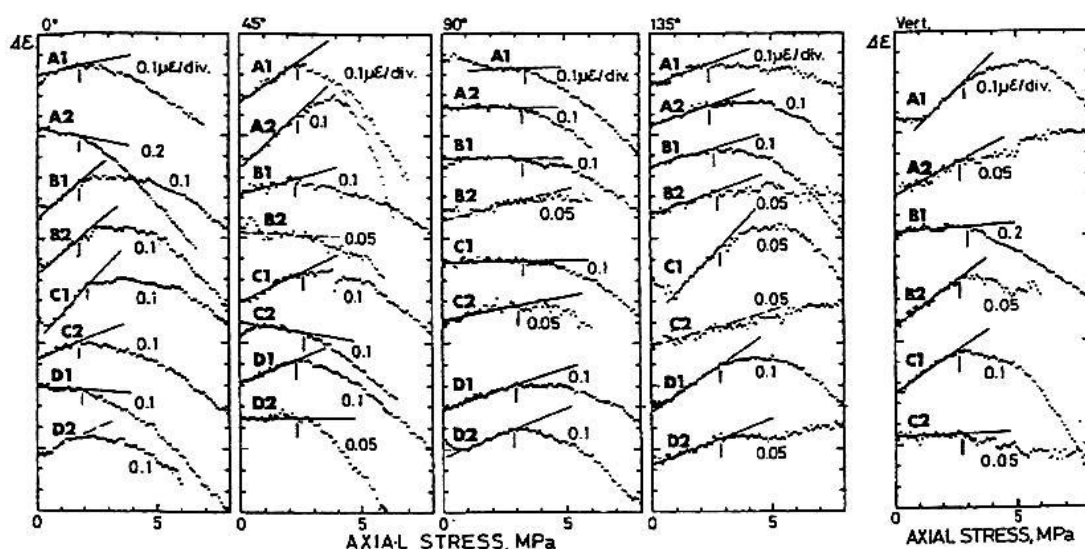
عمق (m)	$\sigma_1 (MPa)$	$\sigma_2 (MPa)$
۸/۲۰	۴/۷	۲/۱۱
۱۲/۷۰	۴/۶	۲/۹
۱۴/۳۰	۴/۹۷	۲/۳



شکل ۲-۱۳: منحنی تنش - تفاضل کرنش مربوط به نمونه A_۱ [۴۰].

مطابق با شکل (۲-۱۴) آزمایش‌هایی توسط یاماموتو بر روی نمونه‌های گرانودیوریت ایساشی به منظور بررسی کاربرد روش تحلیل نرخ تغییرشکل در وابستگی آزیموتی تنش‌های پیشین تخمین زده

شده برای جهت‌های افقی، همانند وابستگی تنش‌های پیشین برای جهت‌های قائم، مورد مطالعه قرار گرفت. همان‌گونه که از شکل مشاهده می‌شود تقریباً برای همه شکل‌ها در تنش‌های محوری پایین، تابع تفاضل کرنش به صورت خط مستقیم با شیب مثبت است. به هر حال حالت‌های استثنا هم وجود دارد که در آنها شیب خط منفی است. به عنوان مثال در منحنی‌های A₂ و D₁ در سمت چپ شکل (۲-۱۴) این حالت وجود دارد. شیب منفی به این مفهوم است که سنگ به واسطه اعمال بار بزرگ‌تر در سیکل اول، در یک بارگذاری دو مرحله‌ای نسبت به سیکل دوم به‌طور کامل تسلیم شده است. در این حالت ممکن است نمونه سنگی، قبل از اولین سیکل بارگذاری، شامل ترک‌های بازی باشد که در حین بیرون آوردن مغزه از چال بوجود آمده است. این ترک‌های باز در سیکل اول بارگذاری بسته می‌شوند. در نظر گرفتن این موضوع که همه ترک‌ها در انتهای باربرداری سیکل اول به‌طور کامل باز نخواهد شد، منطقی است. اگر تعداد ترک‌های بسته بزرگ‌تر از تعداد ترک‌های بوجود آمده در بارگذاری اول باشد، در این حالت تابع تفاضل کرنش، شیب منفی خواهد داشت. حالت‌های خاص مانند A₂ و D₁ در ستون سمت چپ در شکل (۲-۱۴) نشان داده شده‌اند [۱۴].



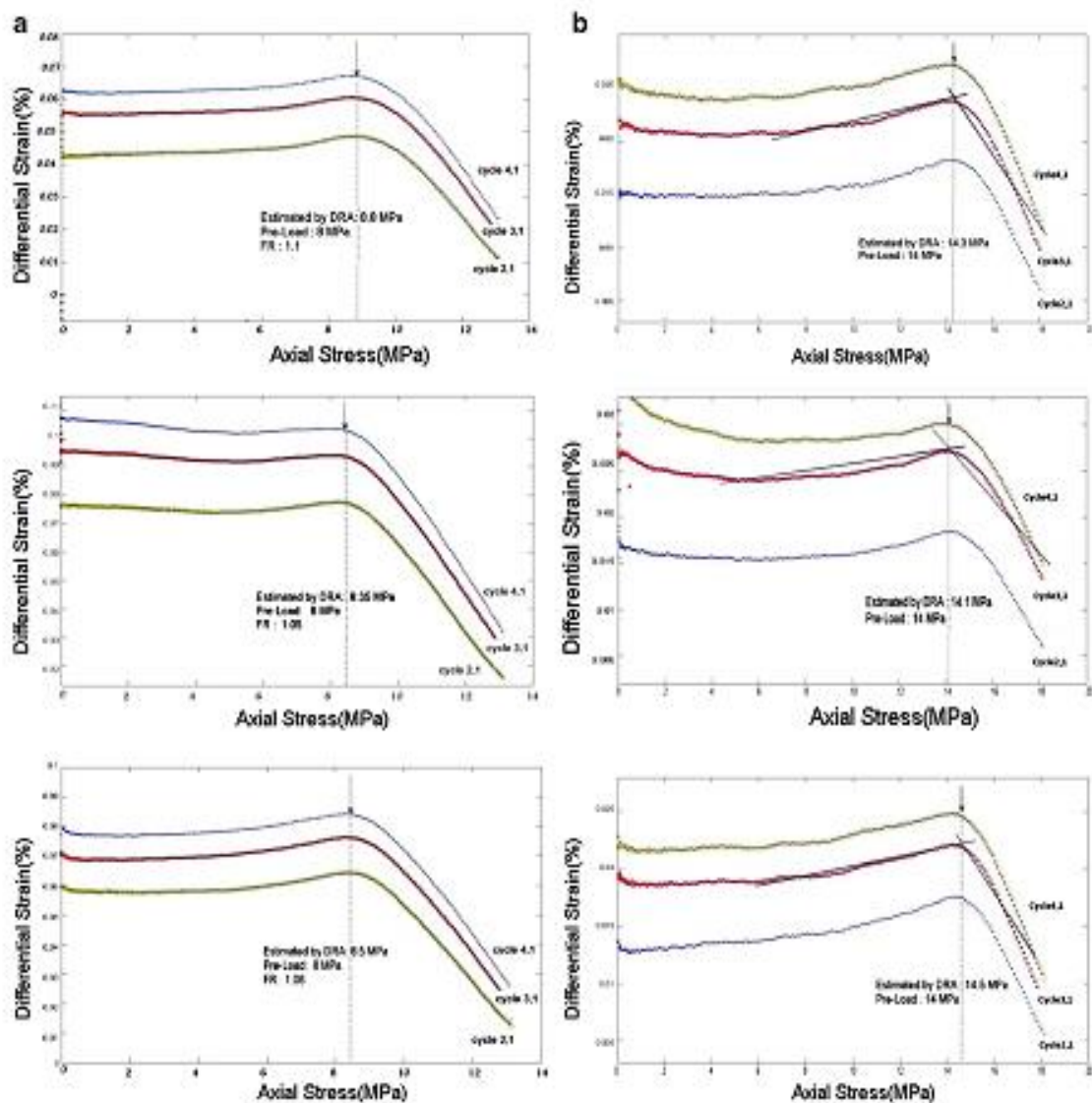
شکل ۲-۱۴: منحنی تنش - تفاضل کرنش ($\Delta \epsilon_{2,1}$) بدست آمده، برای نمونه‌های حاصل از عمق ۱۰۰ متری ایساشی

عطار و همکاران (۲۰۱۴) قابلیت روش DRA در تخمین بزرگی تنش برجای اولیه کاربرد این روش را برای هریک از انواع نمونه‌های سنگ‌های شکننده و شکل‌پذیر را بازبینی نمودند. آزمایش‌های DRA بر روی نمونه‌های مغزه تهیه شده از بلوک‌های توف و ماسه‌سنگ نرم واقع در سطح زمین انجام شده است. در منحنی‌ها، آزمایش DRA در سه ناحیه بسته شدن ترک، ناحیه الاستیک و ناحیه پلاستیک از رفتار هر دو نوع سنگ مورد بررسی قرار گرفته است. در اولین گام، هر نمونه برای سه بار بارگذاری - باربرداری شده و برای ملاحظه سطح تنش در عین حال که حداکثر تنش به منظور مفهوم حافظه سنگ ثابت نگه داشته شده بود. در گام دوم، نمونه‌ها به‌طور مجدد برای چهار بار، بارگذاری و سپس باربرداری شده‌اند که حداکثر سطح تنش بارگذاری دوم مقداری بزرگ‌تر از گام اول بوده است. جدول ۲-۲ مقدار تنش در آزمایش‌های DRA را نشان می‌دهد. پس از آن، کرنش تفاضلی بین چرخه‌های مختلف در مقابل تنش محوری ترسیم شده‌اند.

چنانچه که شکل (۲-۱۵) بعنوان مثال، نتیجه آزمایش‌های انجام شده در ناحیه الاستیک را نشان می‌دهد. نسبت مناسب تعیین شده توسط σ_{DRA} (مقدار تنش پیش‌بینی شده در گام دوم توسط روش DRA) نسبت به $\sigma_{initial}$ (تنش حداکثر گام اول)، برای ناحیه الاستیک خطی در محدوده‌ای بین ۱-۱,۰۳ و ۱,۰۶-۱ و برای ناحیه پلاستیک در محدوده‌ای از ۱-۰,۹۹ و از ۱-۰,۹۷ به ترتیب برای نمونه‌های توف و ماسه‌سنگ بدست آمده است. آنها هم‌چنین اظهار کرده‌اند که روش DRA برای انواع سنگ‌های شکننده و شکل‌پذیر قابل استفاده است [۸].

جدول ۲-۲: برنامه آزمایش‌های DRA [۸].

Rock type	Loading cycle	Region		
		Region 1 (crack closure)	Region 2 (linear elastic)	Region 3 (the yield)
Tuff	Preloading	3.5	14	35
	Reloading	7	18	41
Sand stone	Preloading	2	8	19
	Reloading	6	13	23



شکل ۲-۱۵: تغییرات تفاضل کرنش-تنش محوری در ناحیه الاستیک خطی نمونه‌های (a) ماسه‌سنگ و (b) توف [۸].

اگرچه پژوهشگران متعددی با مقایسه نتایج حاصل از هر یک از روش‌های برپایه اثرکایزر با روش‌های اندازه‌گیری مستقیم، اظهار کردند که سازگاری مناسبی بین نتایج این روش‌ها وجود دارد [۵، ۶، ۱۳ و ۱۷]، اما چنان‌چه که توسط هسیه و دایت (۲۰۱۳) اظهار شده است، عوامل گوناگونی مانند خمش نمونه در طی آزمایش (اثر خمش)، تنش جانبی، فشار منفذی، تغییر در درجه حرارت و برخی دیگر از عوامل می‌تواند در دقت تخمین تنش تاثیر بگذارند. در واقع ممکن است که یک محیط آزمایش

نامناسب و ناقص، به راحتی در مقدار قرائت شده کرنش تغییر ایجاد کند، طوری که پیامد حاصل از آن می‌تواند اشکال در تفسیر یا تفسیر غلط انداز باشد [۲۲] (که در فصل بعد به تفصیل شرح داده شده‌اند).

۲-۶-۲ مکانیزم اثر حافظه تغییر شکل (DME)

اثر حافظه تغییر شکل به‌طور گسترده‌ای از زمانی که مطرح شده است مورد مطالعه قرار گرفته است [۷، ۱۴، ۱۵، ۱۷، ۱۸ و ۲۰]. یاماموتو و همکاران (۱۹۹۰) اظهار داشتند که پیدایش نقطه انحنای در منحنی DRA به علت مکانیزم مشابه با اثر کایزر است (به علت رشد ترک‌های از پیش موجود در فشارش). آنها علاوه بر آن پیشنهاد کردند که رشد ترک‌های از پیش موجود در یک نمونه سنگ، ناشی از کرنش‌های غیرخطی است که در هر یک از مولفه‌های کرنش بازگشت‌پذیر و بازگشت‌ناپذیر القا شده است. به عقیده آنها، مولفه کرنش‌های بازگشت‌پذیر بوسیله لغزش اصطکاکی، باز و بسته شدن ترک‌های کششی و تغییر در چگالی ترک‌های کششی ایجاد شده‌اند. همه این نوع رفتارهای غیرخطی ملاحظه شده است که در طی بسیاری از چرخه‌های بارگذاری، تا زمانی که اندازه ترک‌های موجود تغییری نکرده باشد، برگشت‌پذیرند. مولفه کرنش برگشت‌ناپذیر از رشد و گسترش ترک‌های موجود و از طریق ایجاد ترک‌های جدید هنگامی که تنش اعمال شده از حداکثر تنش نهایی پیش‌تر اعمال شده تجاوز کرده است، نتیجه شده‌اند. به طوری که کرنش برگشت‌پذیر توسط رابطه (۱-۲) حذف شده، درحالی که مولفه برگشت‌ناپذیر کرنش غیرخطی توسط تابع کرنش تفاضلی تاکید شده است [۱۳، ۱۴ و ۴۱]. براساس میکروشکستگی‌های توسعه داده شده توسط کواهارا^۲ و همکاران (۱۹۹۰)، تاماکی^۳ و همکاران (۱۹۹۱) اظهار کردند که کرنش غیرالاستیک به‌طور خطی با تنش اعمال شده تا زمانی که تنش اعمال شده از تنش حداکثر پیشین کوچک‌تر گردد افزایش می‌یابد. اگرچه هنگامی که تنش اعمال شده بزرگ‌تر از تنش پیشین باشد، یک تغییر در گرادیان کرنش وابسته به تنش وجود خواهد داشت، این تغییر توسط

^۱ The deformation memory effect

^۲ Tamaki

^۳ Kuwahara

DRA تعیین خواهد شد [۴۲ و ۴۳]. از سال ۱۹۹۱، تاماکی و یاماموتو (۱۹۸۹) [۴۴]، یاماموتو (۲۰۰۹) [۱۵]، یاماموتو و یاب^۱ (۲۰۰۱) [۴۷] توضیح مشابهی را برای اثر حافظه تغییرشکل با یاماموتو و همکاران (۱۹۹۰) [۱۴] و تاماکی و همکاران (۱۹۹۱) [۴۳] اتخاذ کرده‌اند. یاماموتو (۲۰۰۹) این مفهوم را براساس مدل کواهارا و همکاران بیش‌تر توسعه داد؛ هنگامی که تنش اعمال شده کوچک‌تر از تنش پیشین است، تابع تفاضل کرنش با تنش اعمال شده تقریباً خطی است؛ درحالی‌که، هنگامی که تنش اعمال شده بزرگ‌تر از تنش اعمال شده است، مشتق تابع تفاضل کرنش منفی می‌شود. دلایل تحت تاثیر دو عامل است: ریزشکست‌ها^۲ در نقطه‌ای که تنش اعمال شده پیک تنش پیش‌تر اعمال شده را دریافت کرده‌اند، شروع می‌شوند؛ وقوع آنها سبب افزایش نرخ کرنش غیرالاستیک شده‌اند [۱۵]. یامشیکوف و همکاران (۱۹۹۴) اثرات حافظه و مکانیزم اثر حافظه تغییرشکل را بازبینی نمودند. آنها اظهار داشتند که اکثر پژوهشگران مکانیزم اثر حافظه تغییرشکل را به وقوع و توسعه ضعف‌ها و ریزترک‌ها در سنگ در سطوح مقیاس گوناگون از طریق ضعف‌های شبکه‌ای خطی و نقطه‌ای با میکرو و ماکروشکست‌ها^۳ مرتبط می‌دانند. آنها هم‌چنین بیان کردند که مدل توسعه داده شده توسط کواهارا و همکاران نمی‌تواند برخی خصوصیت‌های اثر حافظه تغییرشکل را به ویژه محوشدگی حافظه را توضیح دهد [۳۸]. هانت و همکاران (۲۰۰۳) بیان کردند که انحنا DRA جلوه‌ای از اثر کایزر است. با شبیه‌سازی عددی بر اساس یک مدل شبکه‌ای در نرم افزار PFC^{۲D}^۴، آنها ارتباط بین اثرکایزر و توسعه میکروتترک‌ها را اثبات کردند. به علاوه، از نتایج شبیه‌سازی عددی، آنها اثبات کردند که اگر بارگذاری زیر تنش اولیه ترک باشد، نه اثر کایزر و نه اثر حافظه تغییرشکل مشاهده نخواهند شد [۷]. وانگ و همکاران (۲۰۱۲)، مکانیزم جدیدی را برای توصیف اثر حافظه تغییرشکل، براساس لغزش روی صفحات لغزشی از پیش موجود پیشنهاد کردند و این مکانیزم را برای مشخص نمودن این که آیا لغزش اصطکاکی می‌تواند اثر حافظه تغییرشکل را ایجاد کند، مدل کردند. آنها در مدل خود تنها مقاومت برشی ذاتی سنگ بکر را بررسی و برای یک نوع خاص

^۱ Yabe

^۲ Micro-Fracture

^۳ macrofractures

^۴ two-dimensional Particle Flow Code

از سنگ‌های لایه‌ای انجام دادند؛ و فرض نمودند که این پارامتر در فصل مشترک‌های مختلف، متفاوت است، در حالی که دیگر پارامترها ثابت فرض شده‌اند. نتایج آنها نشان داد که مکانیزم لغزش اصطکاکی انحنایابی را در منحنی‌های DRA ایجاد می‌کند و پارامتر اصلی کنترل‌کننده در محدوده‌ای بین حداقل و حداکثر مقاومت برشی ذاتی سنگ بکر قرار دارد. چنانچه که مشخص است، اکثر بررسی‌ها دیدگاه یکسانی را برای توضیح تشکیل اثر حافظه تغییرشکل توسط روش DRA پذیرفته‌اند. بارگذاری تراکمی که سنگ تحت آن بوده است، ترک‌های جدیدی را ایجاد می‌کند و یا ترک‌های موجود را توسعه می‌دهد. هنگامی که سنگ استخراج شده است و از این رو باربرداری و سپس مجدداً بارگذاری شده، این اتفاق می‌افتد. هنگامی که بزرگی تنش در بارگذاری دوم پایین‌تر از حداکثر تنش بدست آمده در بارگذاری اول باشد، هیچ ترک جدیدی نمی‌تواند ایجاد شود یا گسترش یابد. هنگامی که بزرگی تنش از تنش پیش‌تر حاصل شده تجاوز می‌کند، ترک‌های جدید شکل می‌گیرد و یا رشد می‌کند. این منجر به ایجاد پالس‌های صوتی جدید (اثر کایزر) افزایش کرنش غیرالاستیک می‌گردد. تفاضل بین کرنش‌های غیرالاستیک در چرخه‌های بارگذاری منجر به ایجاد یک انحنا در منحنی DRA می‌شود. از آن پس مدل برپایه این مکانیزم "مدل ترک"^۱ نامیده شده است. دو چیز برای کار با این مکانیزم نیاز است: اول، بارگذاری جدید عیناً در جهت بارگذاری قبلی انجام شود و دوم، این که بارگذاری اولیه باید به قدر کافی باشد تا موجب ایجاد و رشد ترک گردد [۲۰].

۷-۲ جمع بندی

چنانچه که گفته شد، روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری (یا تخمین) تنش وجود دارد. از جمله این روش‌ها، روش‌های اندازه‌گیری مستقیم است. این گروه از روش‌ها، به طور کلی از دقت خوب، قابلیت اطمینان داده‌ها و از خطای کم‌تری برخوردارند. اما، نقص عمده‌ی روش‌های متداول برای اندازه‌گیری

^۱ crack model

تنش برجا از قبیل روش بیش مغزه‌گیری یا روش شکست هیدرولیکی، این است که این روش‌ها معمولاً گران و زمان‌بر هستند. از سوی دیگر، به علت این که روش‌های برپایه مغزه ساده‌تر، ارزان‌تر، سریع‌تر و آشفته‌گی‌های کم‌تری را در توده سنگ در طی انجام آزمایش ایجاد و همچنین به علت عدم نیاز این روش‌ها به تجهیزات خاص، امروزه توجه بیش‌تر پژوهشگران به روش‌های برپایه نمونه‌های مغزه سنگ است و به طور فزاینده‌ای کاربرد این روش‌ها بدین روی افزایش یافته است. اخیراً روش‌های برپایه اثر کایزر از قبیل AE و DRA به عنوان روش‌های آزمایشگاهی و غیرمستقیم برای تخمین تنش برجای سنگ استفاده می‌شوند. اثر کایزر در سنگ و موادی که تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار دارند، مشاهده می‌شود. 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. تحلیل این پدیده فرض می‌کند که حداکثر تنش اعمال شده پیشین را شاید بتوان توسط بارگذاری یک نمونه سنگ در نقطه‌ای که یک افزایش قابل توجه در کرنش تفاضلی (یا تغییر قابل توجه در فعالیت AE) تجربه شده است، تعیین کرد. اثر کایزر در واقع یادآوری حداکثر تنش پیشینی است که توده‌سنگ توسط محیط پیرامونش تحت آن قرار گرفته بوده است. اصول اتکایی هر دو روش آن است که تغییری در نرخ AE و کرنش محوری با تنش در سطح حداکثر تنشی اتفاق می‌افتد که نمونه پیش‌تر تحت آن بوده است.

فصل سوم:

بررسی عوامل تاثیرگذار در بازسازی تش در روش های

مستثنی بر اثر کایزر

عوامل بسیاری در رفتار سنگ‌ها به ویژه در تخمین مقدار تنش به وسیله روش‌های آزمایشگاهی موثر هستند. عوامل محیطی مانند رطوبت، گرما، فشار جانبی، فشار منفذی، پیش تنش، و غیره به خصوص هنگامی که سنگ‌ها تحت تنش قرار دارند در این راستا اهمیت بسزایی دارند [۲۲]. رفتار مکانیکی ریزترک‌ها تحت سطوح مختلف تنش متفاوت است و از آنجایی که اساس روش‌های بر پایه اثر کایزر وابسته به حافظه تنش و تیوری ریزترک است، این موضوع که، تخمین تنش پیشین با روش‌های تحلیل نرخ تغییرشکل و انتشار آوایی در محدوده تراز تنش کدام یک از نواحی قابل تشخیص است، مطرح می‌گردد و این برای تعیین محدوده کاربرد این روش‌ها حایز اهمیت است [۱۴]. در این بخش حافظه تنش چند نوع سنگ برای پیش بارگذاری‌هایی با ترازهای تنش مختلف و عوامل موثر در بازسازی تنش بررسی می‌شوند.

۲-۳ رفتار سنگ تحت بارگذاری تک محوره

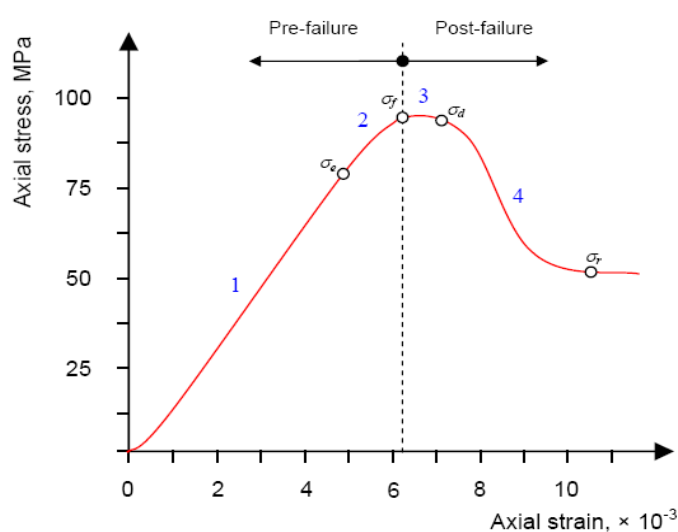
فرآیند میکروشکست در طی تغییرشکل سنگ یکی از خصوصیات ضروری در خصوص درک طبیعت زلزله‌ها و حرکت‌های زمین است. انتشار آوایی سنگ‌ها در طی بارگذاری در تراکم موضوع بسیاری از پژوهش‌ها در مطالعه‌های میکروشکست، پدیده اتساع، خزش و خصوصیات اصطکاکی بوده است [۴۶]. هنگامی که سنگ تحت بار فشاری قرار دارد، چهار مرحله‌ی تغییرشکل برای آن قابل توضیح است (شکل ۱-۳): (الف) تغییرشکل شبه‌الاستیک^۱، در این مرحله اگر تنش برداشته شود، نمونه به شکل و اندازه ابتدایی خود باز می‌گردد. نمودار تنش- کرنش خطی است. (ب) تغییرشکل الاستوپلاستیک^۲: در این مرحله هنگامی که تنش از حد الاستیک (σ_e) عبور می‌کند، اگر بار برداشته شود، فقط بخشی از نمونه به شکل اولیه خود باز می‌گردد. (ج) جریان پلاستیک^۳؛ تنش بین شکست (σ_f) که تحت شرایط تنش

^۱ - Quasi-elastic deformation

^۲ - Plastic flow

^۳ - Elasto-plastic deformation

تک‌محوری برابر با مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ (σ_c) است، و تنش مرحله‌ی متلاشی شدن (σ_d) در مرحله پلاستیک روی می‌دهد. در این مرحله هنگامی که نرخ کرنش در حال افزایش است، تنش زیاد نمی‌شود. (د) متلاشی شدن؛ اگر بارگذاری ادامه یابد، یک یا بیش از یک شکست بوجود می‌آید و در نهایت ماده با کاهش سریع تنش به مقدار تنش باقیمانده (σ_r)، برابر استحکام باقیمانده‌ی سنگ، گسیخته می‌شود.

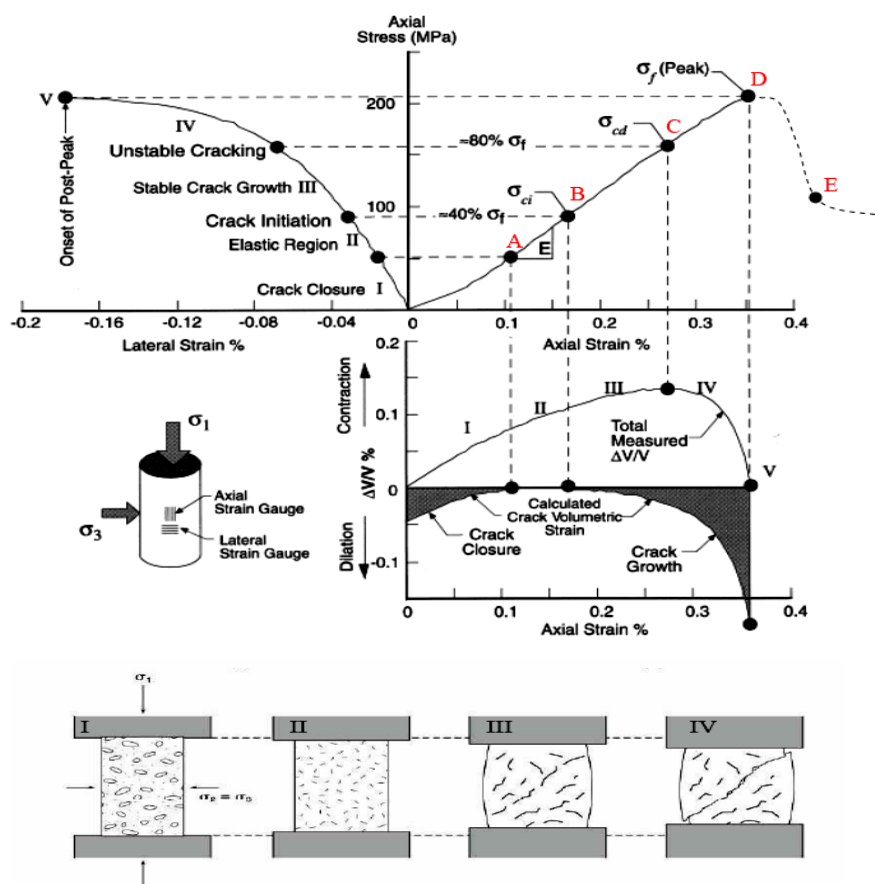


شکل ۳-۱: دیاگرام شماتیک تنش-کرنش یک نمونه‌ی سنگ تحت فشار تک‌محوری [۱۴].

ترد بودن و شکنندگی یک سنگ بوسیله‌ی رفتار آن بین تنش شکست و تنش متلاشی شدن تعیین می‌شود. بازه‌ی کوچک نمایانگر مواد ترد است درحالی‌که یک سنگ شکل‌پذیر دارای بازه جریان پلاستیک زیاد است. وجود تغییرشکل غیرالاستیک سنگ‌ها به علت ایجاد و رشد ترک‌ها، به‌طور گسترده‌ای مورد پژوهش قرار گرفته است. براساس مطالعه‌های آزمایشگاهی که با رفتار تنش-کرنش مواد سروکار داشته‌اند، فرآیند گسیختگی می‌تواند به یک تعداد از مراحل که با ثبت تغییرات در اندازه کرنش محوری و عرضی در هنگام آزمایش‌های فشاری تک‌محوری (یا چند محوری)

^۱ - Disintegration

مشخص می‌شوند، تقسیم شود. این مراحل به ترتیب شامل بسته‌شدن ترک^۱، تغییر شکل الاستیک خطی^۲، شروع ترک^۳ و رشد پایدار ترک، آسیب ترک و رشد ناپایدار ترک و گسیختگی و رفتار بعد از اوج است [۱۰ و ۱۴]: این مراحل در شکل (۲-۳) ارایه شده‌اند.



شکل ۲-۳: مراحل بوجود آمدن ترک [۴۹].

بسته‌شدن ترک در ابتدای بارگذاری رخ می‌دهد، هنگامی که ترک‌های موجود که در یک زاویه مناسب نسبت به بار اعمالی جهت‌دهی شده باشند، بسته می‌شوند. در هنگام بسته‌شدن ترک، پاسخ تنش-کرنش غیرخطی است (مقعر رو به بالا)، که نشانگر افزایش در صلبیت (سختی) است. هنگامی که اکثریت ترک‌ها بسته شده‌اند، تغییر شکل الاستیک رخ می‌دهد (نقطه A)، که شامل تغییر شکل در

^۱ - Crack closure

^۳ - Crack initiation

^۲ - Linear elastic deformation

خلل و فرج و تراکم ذرات دانه‌ها است. سطح تنش حدود σ_c $0.3-0.4$ (σ_c مقاومت تراکم تک محوری سنگ و نقطه‌ی B، تنش آغاز ترک σ_{ci} است) بوسیله‌ی جوانه‌زنی^۱ ریزترک‌های^۲ جدید در نقاط با بیش‌ترین تنش، در داخل سنگ که معمولاً حوالی وسط نمونه است، مشخص می‌شود (گودمن ۱۹۸۰). این فرآیند بوسیله‌ی رشد پایدار ریزترک‌ها در جهت عمود بر تنش اصلی کوچک‌تر ادامه می‌یابد. پایداری رشد ترک به معنی آن است که با هر نمو در بار اعمالی، ترک‌ها به یک اندازه محدود رشد می‌کنند و سپس رشد ترک متوقف می‌گردد. پس از آن که بارگذاری به مرحله‌ی الاستو-پلاستیک رسید (نقطه‌ی C، تنش آسیب ترک σ_{cd})، ترک‌ها شروع به رشد بصورت غیرقابل کنترل (رشد ناپایدار) می‌کنند تا زمانی که با ترک دیگر، خلل و فرج و یا هر فضای خالی دیگر برخورد کنند. بنابراین شبکه‌ای از ترک‌های متصل شده بوجود می‌آید. با افزایش بار، ترک‌ها به هم متصل شده و یک سطح شکستگی (شکاف) را تشکیل می‌دهند که معمولاً آن را صفحه‌ی شکست می‌نامند (نقطه‌ی D، تنش شکست σ_f). رفتار پس از شکست با ترک‌های بزرگ که از اتصال داخلی ریزترک‌ها بوجود آمده‌اند، سروکار دارد (بین نقاط D و E) که لغزش اصطکاکی ماده‌سنگ بر روی ترک‌های بزرگ^۳ را به دنبال دارد (از نقطه‌ی E)، شکل (۳-۲).

۳-۳ بررسی وابستگی جهت‌دار روش DRA و AE

میزان قابل ملاحظه‌ای از مطالعات بر روی دو روش‌های برپایه اثر کایزر بویژه روش DRA وجود دارد. کاربردهای عملی اثر کایزر برای اندازه‌گیری‌های تنش نیاز به یک شناخت کلی از تانسور تنش و طبیعت وضعیت تنش برجای سه محوره دارد. آزمون‌های آزمایشگاهی نمونه‌های مغزه معمولاً در تراکم تک محوره در جهتی که فرض شده است که جهت تنش اصلی حداکثر باشد، انجام شده است. حتی اگر فرض شود که جهت تنش اصلی حداکثر با جهت آن در آزمون آزمایشگاهی منطبق باشد، وضعیت

^۱ - Nucleation

^۲ - Macro-cracks

^۳ - Microcracks

تنش شش مولفه مستقل دارد (یکی از راه‌ها برای بیان بزرگی و جهت‌های سه تنش اصلی است). اما سوال این است: چه تنشی را اثر کایزر در تراکم تک‌محوره انجام شده بعد از پیش‌بارگذاری سه محوره نشان می‌دهد؟ البته این سوال اساسی با تشکیل سطح آسیب در فضای تنش مرتبط است (که در بخش بعد توضیح داده شده است) [۳۳]. در موقعیت‌های اندازه‌گیری واقعی تنش، هرچند که انطباق جهت‌داری تنش اصلی حداکثر در ابتدا مشخص نیست. در حقیقت آن باید به عنوان نتیجه اندازه‌گیری‌های تنش بدست آورده شود. در بعضی مواقع، این جهت را می‌توان براساس درک رایج با داده زمین‌شناسی فرض نمود، اما صحت چنین فرضیه‌هایی معمولاً به کلی نامشخص است. سوال این است، آیا می‌توان گفت که نمونه‌ای که برای آزمون آزمایشگاهی جهت‌دار شده دقیقاً در جهت تنش اصلی نیست، اما در یک زاویه‌ای از θ تا آن است [۴۸]؟ یک بازبینی جامع از سوال‌های اساسی روش AE توسط لاوروف^۱ (۲۰۰۲) انجام شده است. اگرچه، بسیاری از سوال‌های اساسی مطرح شده توسط او نیاز دارند که نسبت به کاربری عملی این دو روش برای تخمین تنش برجا پاسخ داده شوند. یکی از سوال‌های مهم وابستگی جهت‌دار روش‌های برپایه اثر کایزر است [۳۳]. برای روش AE تنها تعداد معدودی از مطالعات وجود دارد. هولکومب و کاستین (۱۹۸۶)، میشی هیرو و همکاران^۲ (۱۹۹۱ و ۱۹۹۲)، استوارت و همکاران^۳ (۱۹۹۳) و چن و همکاران^۴ (۲۰۰۷) آزمایش‌هایی را بر روی نمونه‌های مکعبی انجام دادند، در حالی که جهت بارگذاری چرخه دوم در جهت عمود بر بارگذاری چرخه اول بودند [۱۸]. چن و همکاران (۲۰۰۷) در پژوهش خود، برنامه تحلیل فرآیند شکست سنگ در حالت دو بعدی^۵ را براساس روش المان محدود و مکانیک محیط‌های پیوسته به کار گرفتند [۴۹]. هولکومب و کاستین (۱۹۸۶) بارگذاری چرخه‌ای را روی یک بلوک گرانیته بزرگ انجام دادند، سپس مغزه‌های حاصل از بلوک بزرگ را در جهت‌های مختلف با تراکم تک‌محوره آزمایش مورد بررسی قرار دادند. این آزمایش بر روی مغزه‌ها نشان داد که اثر کایزر

^۱ Lavrov

^۲ Michihiro et al

^۳ Stuart et al

^۴ Chen et al

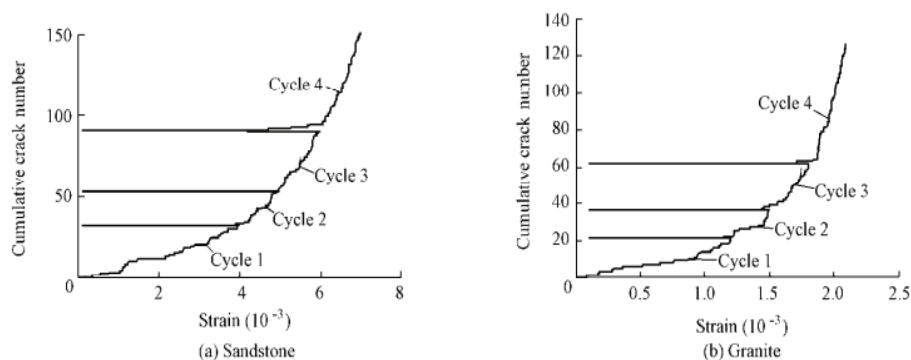
^۵ RFPA+D_ Two-Dimensional Rock Failure Process Analysis

به انحراف جهت بارگذاری مجدد از جهتی که بارگذاری به بلوک بزرگ اعمال شده بود، بسیار حساس است. طبق استنتاج آنها، اثر کایزر برای زاویه کم‌تر از ۱۰ درجه قابل مشاهده بود. هنگامی که جهت تنش محوری حداکثر در بارگذاری دوم از بیش از ۱۰ درجه نسبت به جهت بارگذاری در چرخه اول انحراف یابد، اثر کایزر نمی‌توانست مشاهده شود؛ یعنی سنگ، مانند یک جهت بارگذاری جدید رفتار می‌کرد نه به گونه‌ای که در اولین چرخه، پیش‌بارگذاری شده است [۵۰]. در مطالعه لاوروف و همکاران (۲۰۰۲)، برنامه شبیه‌سازی رشد و اندرکنش ناپیوستگی‌ها، براساس روش المان مرزی دو بعدی در شبیه‌سازی عددی به کار گرفته شده و تاثیر اولین بارگذاری روی بارگذاری بعدی در جهت متعام بررسی شده بود. در پژوهش آنها نیز به طور قوی حساسیت بالای اثر کایزر نسبت به چرخش محور اصلی در چرخه‌های بارگذاری موفق در آزمایش‌ها با استفاده از آزمایش برزیلین^۱ با چرخش دیسک بین چرخه‌های بارگذاری به طور مجدد اثبات شده بود. این اجتناب از برش گوناگون نمونه‌های جهت یافته از یک بلوک پیش بارگذاری شده را ممکن می‌ساخت که ممکن است آسیب‌های اضافی را در سنگ نشان دهد. دیسک‌ها تحت دو چرخه بارگذاری با یا بدون چرخش دیسک بین چرخه‌ها قرار گرفته بودند. اثر کایزر هنگامی که زاویه چرخش دیسک بین اولین و دومین چرخه بارگذاری از ۱۰ درجه تجاوز نمی‌کرد، مشاهده شده بود. برای زاویه‌های چرخش بزرگ‌تر از ۱۰ درجه، اثر کایزر وجود نداشت؛ فعالیت AE به تدریج از شروع چرخه دوم افزایش یافت و هیچ انحنای یا آنومالی دیگری را نشان نمی‌داد. همچنین هیچ اثر کایزری در تست‌های زاویه چرخش دیسک ۹۰ درجه نیز مشاهده نشد. نتایج لاوروف و همکاران (۲۰۰۲) سازگار با نتایج هولکومب و کاستین است [۵۱]. رن^۲ و همکاران (۲۰۱۲) برای مطالعه وابستگی جهت‌دار روش‌های AE و DRA، آزمایش‌های دیسک برزیلین و آزمایش‌های تراکم تک‌محوری را روی مدل‌های عددی دو نوع سنگ، ماسه‌سنگ و گرانیت انجام دادند. شبکه مدل براساس PFC۲D، برای انجام مدل عددی روی وابستگی جهت‌دار دو روش معرفی شده است. هر یک از سنگ‌ها دو نوع شکل

^۱ Brazilian disk

^۲ REN

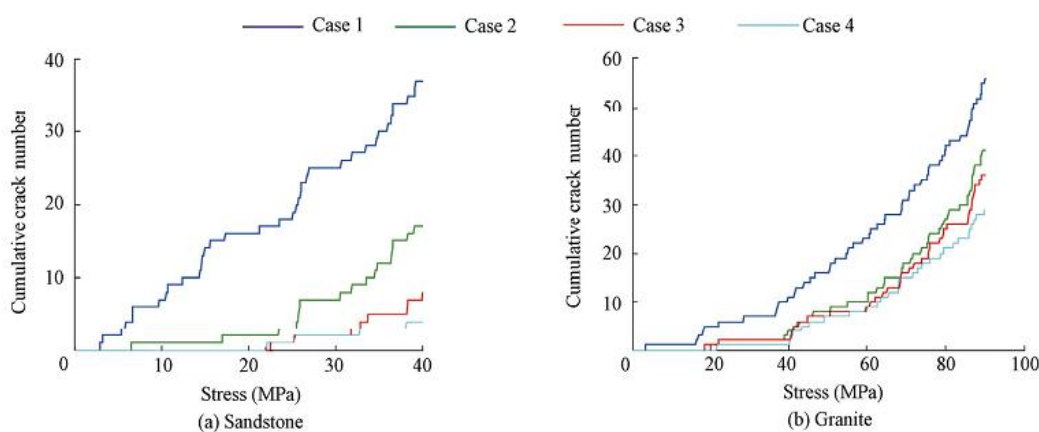
برزیلین دیسک و یک شکل مکعبی داشته‌اند. برنامه‌های بارگذاری بدین گونه انجام شده که ابتدا، بارگذاری‌های چرخه‌ای در جهت Y روی مدل‌های مکعبی و برزیلین دیسک هر دو نوع سنگ انجام شده است این مرحله بارگذاری بر روی ظرفیت مدل شبکه ارتباطی در ایجاد مجدد پدیده DRA و اثر کایزر تمرکز یافته بود. شکل (۳-۳) نشان می‌دهد که هیچ ترک جدیدی در بارگذاری‌های چرخه‌ای بعدی ایجاد نمی‌شود تا این که از حداکثر تنش نهایی (یا کرنش) تجاوز کند. در پروتکل بارگذاری دوم، بارگذاری در جهت Y پس از پیش بارگذاری در جهت X روی مدل‌های مکعبی و برزیلین دیسک هر دو نوع سنگ انجام گرفته است. این مرحله عمدتاً برای مطالعه وابستگی جهت‌دار روش AE و تاثیر پیش بارگذاری روی فعالیت‌های AE در بارگذاری بعدی در جهت متعامد انجام شده است. چهار مورد برای مدل‌های مکعبی و برزیلین دیسک تحلیل شده است. جدول (۱-۳) جزئیات آن را نشان می‌دهد. در مورد ۱، هیچ پیش بارگذاری در جهت X وجود نداشته است. برای دیگر سه مورد، سطوح مختلف کرنش برای برزیلین دیسک (تنش برای مدل‌های مکعبی) در جهت X پیش بارگذاری شده‌اند. سپس، بارگذاری دوم در جهت Y روی مدل مشابه صورت گرفته است. شکل (۴-۳) نشان می‌دهد که هیچ انحنای مشخصی در منحنی تعداد تجمعی ترک-تنش در پیک تنش بدست آمده در پیش بارگذاری وجود ندارد. پروتکل سوم نیز برای مطالعه بیش‌تر تاثیر پیش بارگذاری روی DRA طراحی شده است.



شکل ۳-۳: تعداد تجمعی ترک-تنش در آزمایش برزیلین در برنامه بارگذاری اول [۲۰].

جدول ۳-۱: برنامه بارگذاری چهارمورد از مدل‌های مکعبی و برزیلین دیسک [۲۰].

Case	Peak strain (10^{-3})				Peak stress (MPa)			
	Sandstone		Granite		Sandstone		Granite	
	Xdirection	Ydirection	Xdirection	Ydirection	Xdirection	Ydirection	Xdirection	Ydirection
1	0	5	0	1.6	0	40	0	90
2	1	5	0.4	1.6	10	40	50	90
3	2	5	0.8	1.6	20	40	70	90
4	3	5	1.2	1.6	30	40	90	90



شکل ۳-۴: تعداد تجمعی ترک-تنش برای بارگذاری‌ها در آزمایش برزیلین در جهت Y [۱۹].

۴-۳ میکرومکانیک آسیب سنگ

اگرچه در بیش از چهار دهه پیش، هیچ توسعه‌ای در تیوری و مکانیزم اثر کایزر وجود نداشته است [۴۶]، اما انتشار آوایی سنگ‌ها سال‌هاست که مورد بررسی گرفته است. هالکومب و کاستین تفسیری از اثر کایزر در زمینه‌ی مکانیک آسیب سنگ انجام داده‌اند. براساس ایده آن‌ها اثر کایزر به طور غالب و برجسته نتیجه آسیب حاصل از تنش القا شده به علت رشد میکروتُرک است. مشاهده اثر کایزر ممکن است بین وضعیت‌های تنش در جایی که ثابت است و وضعیت‌هایی که آن روبه افزایش است متمایز باشد [۵۰]. مکانیک شکست الاستیک خطی تا اندازه‌ی زیادی بر روی مدل شکست گریفیث استوار

است (جیگر و کوک^۱ ۱۹۷۹). تیوری گریفیث^۲ (۱۹۲۴) فرآیندهای فیزیکی اساسی انتشار ترک در مواد را دربر می‌گیرد. این تیوری با معادله (۱-۳) یک معیار شکست برپایه‌ی انرژی مورد نیاز برای گسیختگی کششی یک محوره نمایان می‌سازد که تعیین‌کننده‌ی تنش بحرانی برای انتشار ترک^۳ در یک ماده است [۶].

که در این رابطه، E مدول یانگ مواد، $S\gamma$ انرژی ویژه (انرژی بر واحد سطح مورد نیاز برای ایجاد

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}} \quad (1-3)$$

در سطح آزاد) و a نصف طول یک ترک داخلی است. این تیوری براساس این فرض استوار است که ترک‌های بزرگ نتیجه‌ای از ایجاد و رشد ترک‌های شاخه‌ای و جوانه‌زنی ریزترک‌ها در انتهای تیز ترک‌ها و خلل و فرج‌های از قبل موجود به سبب اعمال تنش، هستند. با گذشت زمان، تیوری گریفیث با مطالعات متعدد بر روی شکست مواد مختلف بهبود یافته است، هرچند که مبنای اصلی در نظر گرفتن ریزترک‌های موجود به عنوان محل‌های جوانه‌زنی برای ترک‌های شاخه‌ای عوض نشده است. درک مکانیک توسعه ترک پیچیده است و در این پژوهش چون هدف تحلیل فرآیند ایجاد ریزترک‌ها با جزییات زیاد نبوده بنابراین تنها اصول این فرآیند معرفی می‌گردد. در هر حال جهت قرار دادن پژوهش‌های بعدی و بررسی مکانیزم حافظه تنش، نیاز به درک مبانی است. ریزترک‌ها از نظر موقعیت آنها در شبکه^۴ سنگ متمایز شده‌اند: ترک‌های بین دانه‌ای/کریستالی^۵؛ با انتشار شکست بین مرزهای کریستال سروکار دارد و هنگامی رخ می‌دهد که مقاومت برشی روی یک دانه از مقاومت مواد سیمانی بین دانه‌ها تجاوز کند. این ترک‌ها در شکل (۳-۵) با فلش (a) نشان داده شده است. ترک‌های درون دانه‌ای/کریستالی^۶؛ با شکست دانه‌ها سروکار دارد. این نوع شکست معمولاً نیازمند انرژی مخصوص بسیار بیش‌تری نسبت

^۱ - Jeager & Cook

^۲ - Griffith

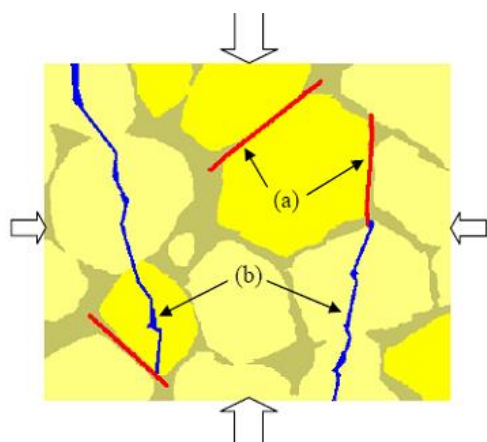
^۳ - Crack Propagation

^۴ Matrix

^۵ - Inter-crystal/grain cracks

^۶ - Intra-crystal/grain cracks

به ترک‌های بین دانه‌ای است. این ترک‌ها نیز در شکل (۳-۵) با فلش (b) نشان داده شده است. در سنگ‌های رسوبی، مخصوصاً ماسه‌سنگ، نوع غالب ریزشکست‌ها ترک‌های بین دانه‌ای/کریستالی است که سیمان سیلیکاتی رسوبی و خاک‌رس که منافذ فضاها را پر می‌کنند به‌طور قابل توجهی ضعیف‌تر از دانه‌های کوارتز هستند. ریزشکست‌های موجود از قبل می‌توانند در هر مسیری جهت‌دهی شوند و به محض بارگذاری، این جهت رفتار مکانیکی آنها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. میکروترک‌ها از نظر رفتار به دو گونه تقسیم‌بندی می‌شوند: ترک‌های برشی؛ که به سوی نیروی تفاضلی اعمال شده متمایل می‌شوند. سطوح این ترک‌ها تحت بار اعمالی متحمل لغزش اصطکاکی می‌شوند. این ترک‌ها در شکل (۳-۶) با فلش (a) نشان داده شده‌اند. ترک‌های کششی؛ که به موازات یا عمود بر نیروی تفاضلی اعمالی جهت‌دهی می‌شوند که در شکل (۳-۶) با فلش (b) نشان داده شده است. این ترک‌ها تحت بارگذاری بسته شدن (ترک‌های عمودی) یا باز شدن (ترک‌های موازی) را تجربه می‌کنند.



شکل ۳-۵: دو نوع از ریزشکست‌ها (a) ترک‌های بین دانه‌ای/کریستالی، (b) ترک‌های درون دانه‌ای /کریستالی [۶].

ترک‌های کششی محوری با توجه به مکانیزم تشکیل، به سه نوع تقسیم می‌شوند:

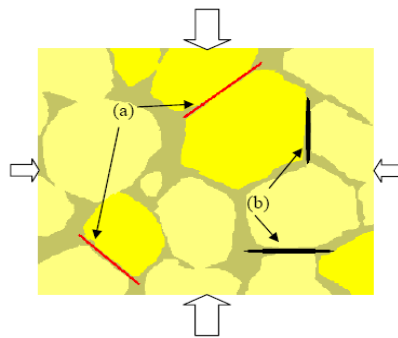
○ ترک منفرد محصور شده^۱، شکل ۳-۶-b.

^۱ - Isolated axial crack

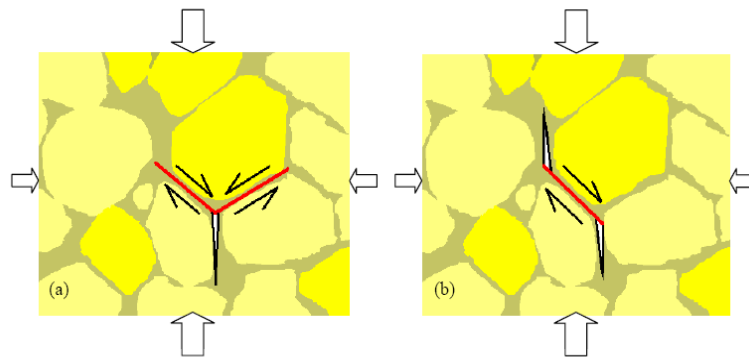
○ ترک متقاطع^۱، شکل ۳-۷-ا.

○ ترک بال شکل^۲، شکل ۳-۷-ب.

ترک‌های منفرد محوری در طول شکاف‌های درون دانه‌ها یا در طول مرز دانه‌ها تشکیل می‌شود و مکانیزم تشکیل ترک‌های متقاطع و بال شکل و انتشار آن در ادامه آمده است. ریزترک‌های برشی از قبل موجود در یک نمونه‌ی سنگ به صورت شکل (۳-۷) است.



شکل ۳-۶: ریزترک‌ها که بوسیله‌ی جهتشان نسبت به تنش تفاضلی متمایز می‌شوند: (a) ترک‌های برشی، (b) ترک‌های کششی [۶].



شکل ۳-۷: لغزش اصطکاکی و شکلی از کشش (a) ترک متقاطع (b) ترک بال شکل [۶].

ترک تحت بکارگیری یک بار تفاضلی، تنش برشی (τ) را در طول سطح خود تجربه می‌کند [۶].

این تنش می‌تواند تا یک مقدار بحرانی معین (τ_c) مقاومت کند، یعنی:

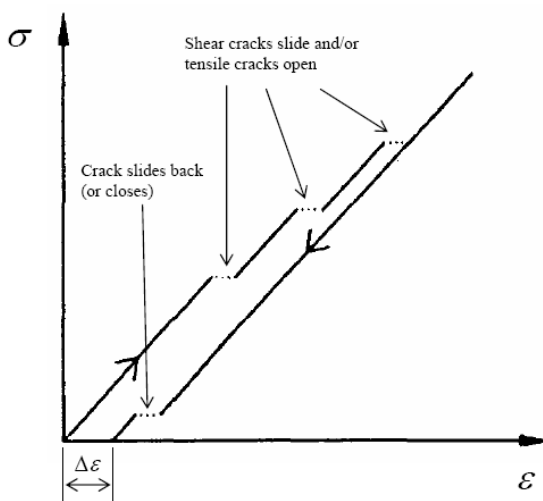
$$\tau_c = S_0 + \mu\sigma \quad (۲-۴)$$

^۱ - Junction crack

^۲ - Wing crack

که S استحکام برشی ترک بسته شده، μ ضریب اصطکاک و σ تنش اعمال شده عمود بر سطح ترک است. هنگامی که تنش برشی بزرگتر از τ_c باشد، سطوح ترک نسبت به یکدیگر می‌لغزند. اگر تنش برشی به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد، ترک در راس‌های خود می‌شکند (تیوری گریفیث). این امر منجر به باز شدن یک ترک انشعابی یا ترک‌های شاخه‌ای کششی می‌گردد که در جهت تنش حداکثر اعمالی σ_1 ، جهت‌دهی شده‌اند. به‌عنوان نتیجه، سنگ، اتساع یعنی افزایش غیرالاستیک در حجم را تجربه خواهد کرد. اگر از روی نمونه بار برداشته شود، بعضی ترک‌ها بسته شده یا به عقب می‌لغزند، به هر حال بعضی جابجایی‌ها غیرقابل جبران هستند که سبب اختلاف کرنش غیر الاستیک پسماند ($\Delta \epsilon$) در دیاگرام تنش-کرنش می‌شوند (شکل ۳-۸) [۵]. بسیاری از پژوهشگران در زمینه اثر کایزر و اثر حافظه تغییر شکل (مثل استیونس و هولکومب ۱۹۸۰، کاستین ۱۹۸۳، استوارت و همکاران ۱۹۹۳، لی و نوردلاندر ۱۹۹۳، بار و هانت ۱۹۹۹) معتقدند که مکانیزم مسبب برای این پدیده براساس تغییر شکل ریزترک سنگ است. آنها مطرح نمودند که هنگام اعمال تنش بارگذاری تحت شرایط آزمایشگاهی، آسیب انباشته شده در نمونه در نتیجه تشکیل ریزترک‌ها (در ناحیه‌ی غیرالاستیک)، بازگشت‌ناپذیر است. بنابراین، بارگذاری مجدد متوالی هیچ آسیب قابل توجهی در نمونه ایجاد نمی‌کند تا زمانی که تنش به مقدار اعمال شده قبلی برسد، به‌طوری‌که اغلب تحت این فرآیند تنش، ریزترک‌ها از قبل تشکیل شده‌اند. با ادامه‌ی اعمال تنش فشاری، پس از مقدار پیش‌بارگذاری شده، نمونه به طور مجدد شروع به جوانه‌زنی و رشد ریزترک می‌کند. بنابراین می‌توان گفت که آسیب در نمونه‌ی سنگ در نتیجه پیش‌بارگذاری با تشکیل شبکه‌ای از ریزترک‌ها (آسیب بازگشت‌ناپذیر) بخاطر سپرده شده است. جوانه‌زنی اولیه و سپس رشد، موج‌های میکرولرزه‌ای (سیگنال‌های آکوستیک) تولید می‌کند که علت آن آزادسازی انرژی است که اغلب از شکست اتصالات درون ذره‌ای ناشی می‌شود. این فرایند باعث آغاز انتشار آوایی در لحظه‌ی افزایش تنش بیش از تنش برجای حداکثر است که قبلاً سنگ تجربه کرده است. مجموع شمارش‌های

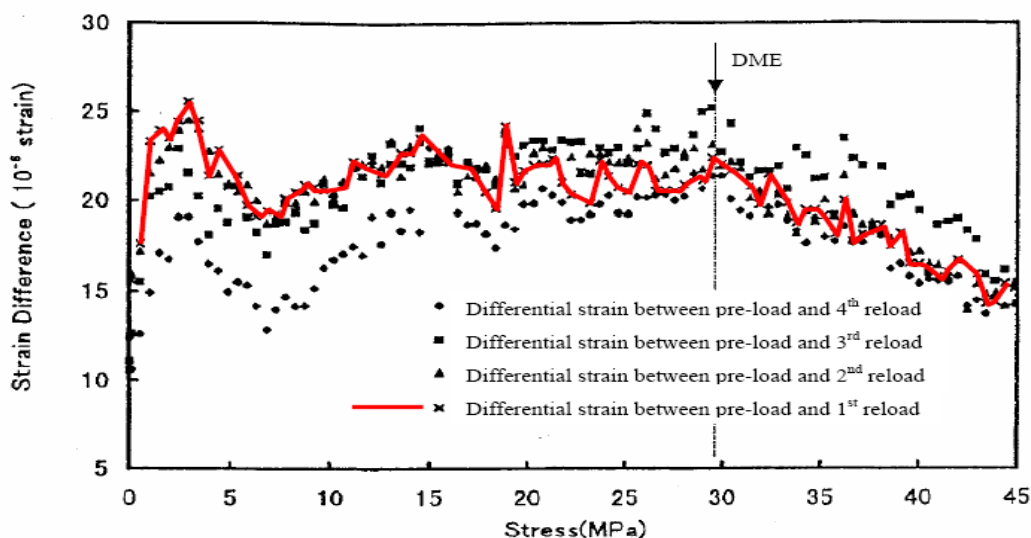
انتشار آکوستیک به طور مستقیم متناسب با تعداد ریزترک‌هاست که در یک نمونه در هنگام اعمال فشار یک محوره انباشته شده‌است [۶].



شکل ۳-۸: $\Delta\varepsilon$ پسماند از لغزیدن و یا شکافتن ریزترک‌های غیرقابل جبران [۶].

استفاده از اثر حافظه تغییرشکل در روش تحلیل نرخ تغییرشکل می‌تواند بصورت زیر توضیح داده شود. در مواد کاملاً الاستیک، کرنش برگشت‌پذیر در نظر گرفته می‌شود. در مواد الاستوپلاستیک مثل سنگ‌ها، دو جز کرنش وجود دارد: الاستیک، که بازگشت‌پذیر است و غیرالاستیک که بازگشت‌پذیر نیست. جز بازگشت‌پذیر کرنش در تابع تفاضل کرنش حذف می‌شود. بنابراین با تشکیل ترک‌های جدید کششی و برشی که نتیجه آسیب بازگشت‌ناپذیر سنگ است، کرنش تفاضلی از دو سیکل بارگذاری متوالی یک مقدار غیرصفر خواهد داشت. این پدیده به خصوص هنگامی که تنش محوری از مقدار حداکثر تنش قبلی تجاوز کند ظاهر می‌شود زیرا که این مرحله‌ی بارگذاری، که در بالا بحث شد، به عنوان آغاز ریزترک‌های بازگشت‌ناپذیر شناخته می‌شود. انتظار می‌رود که نرخ کرنش در منحنی‌های دو سیکل بارگذاری مجدد مشابه مقادیر پیش‌بارگذاری باشد که در این صورت ریزترک‌های جدید چندانی تشکیل نخواهد شد. تابع تفاضلی کرنش یا افقی است یا نسبت به پیش‌بارگذاری به تدریج افزایش می‌یابد (شکل

۹-۳). بعد از عبور از تنش پیش‌بارگذاری، کرنش تفاضلی به علت ایجاد سخت‌شوندگی کرنشی^۱ در سیکل بارگذاری مجدد بعدی، کاهش می‌یابد اساس اثر حافظه تغییرشکل که بر پایه ریزترک است به عنوان یک اصل اساسی و اولیه این اثر در خلال این مطالعه پذیرفته شده است [۵ و ۶].



شکل ۳-۹: تفاضل کرنش برای یک نمونه گرانیت (تنش محوری پیشین ۳۱,۵MPa و فشار جانبی پیشین ۱۵MPa) [۵,۶].

لوچینکوف^۲ (۲۰۰۴) نقطه انحنا را برای نمونه ماسه‌سنگ تحت پیش بارگذاری مختلف، هنگامی که منحنی از مقدار تنش پیشین اعمال شده (پیش بارگذاری^۳) عبور می‌کند، نشان داده است. آزمایش با یک چرخه بارگذاری اولیه و دو چرخه بارگذاری مجدد (LRR)^۴ بر روی مغزه برای سه مقدار مختلف تنش انجام شده است. چرخه اول بطور پایا یک پیش‌بارگذاری را در یک نرخ ۰/۲ کیلو نیوتن بر ثانیه اعمال نموده که جهت شبیه‌سازی تنش برجا بوده است. پیش بارگذاری برای القای تنش در مغزه بزرگ‌تر از مقدار تنشی که مغزه اخیراً به‌عنوان تنش برجا (تخمین زده شده از بار روباره) تحت آن بوده، انتخاب شده است. پیش‌بارگذاری در یک رواداری ۱٪± برای یک ساعت نگه‌داشته شده است؛ مدت زمان بایستی برای القای یک "حافظه‌ی تنش" به داخل مغزه کافی باشد. سپس بار بطور ناگهانی برداشته

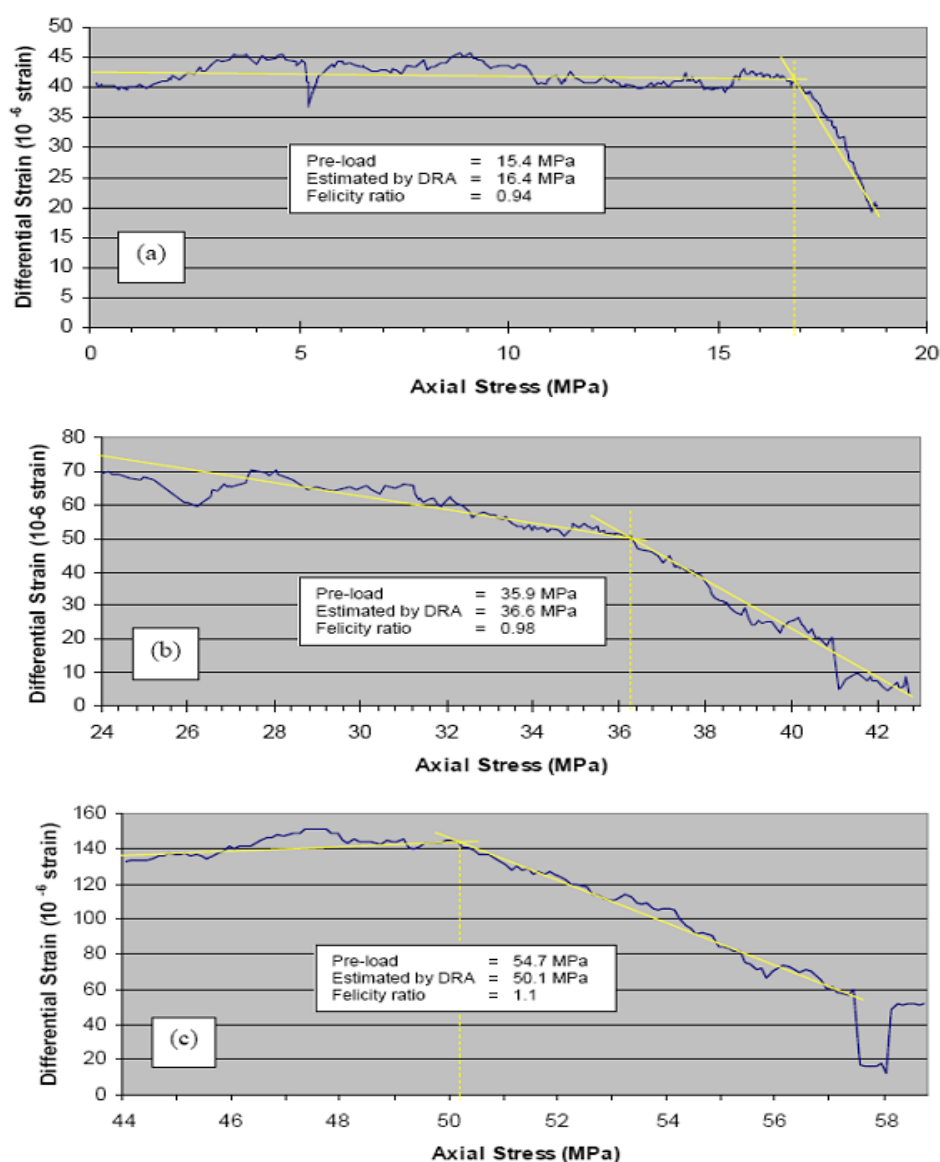
^۱ - Strain hardening

^۳ - Pre-loading

^۲ - Louchinkov

^۴ - Load-Reload-Reload

می‌شود تا آزادسازی تنش که با بیش مغزه‌گیری ایجاد می‌شود را شبیه‌سازی کند. چرخه‌های دوم و سوم شامل بارگذاری آهسته‌ی مغزه تا یک حدود ۱۵-۲۰٪ بالاتر از پیش‌بارگذاری بوده‌اند. جزئیات تنش‌های بکار رفته در خلال آزمایش‌ها در جدول (۲-۳) آورده شده‌اند. تابع تفاضل کرنش بر روی دو چرخه بارگذاری مجدد انجام شده‌است (شکل ۳-۱۰). خطوط امتداد برای هر منحنی تطبیق داده شد تا به تعیین نقاط انحنا (خمیدگی) کمک کنند [۶].



شکل ۳-۱۰: تابع تفاضل کرنش در پیش‌بارگذاری‌های مختلف: (a) ۱۵,۴MPa ، (b) ۳۵,۹MPa ، (c) ۵۴,۷MPa [۶].

تنش محوری در هر نقطه‌ی خمیدگی، که نشانگر اثر حافظه تغییرشکل (DME) است، در جدول (۲-۳) آورده شده است. در این روش نیز نسبت بین تنش در نقطه انحنا منحنی و تنش پیش‌بارگذاری به عنوان "نسبت مناسب" (FR) نامیده می‌شود. نسبت یک بیانگر تطابق کامل مقادیر است. نتایج نشان می‌دهد در تنش‌هایی که DME رخ داده است مشابه مقادیر پیش بارگذاری است.

جدول ۲-۳: بارهای محوری بکاررفته در آزمایش‌های LRR روی نمونه #۳[۶].

تنش اعمال شده (مگاپاسکال)			تعداد چرخه
۵۴,۷	۳۵,۹	۱۵,۴	۱ (پیش بارگذاری)
۵۹,۹	۴۲,۸	۱۸,۸	۲ و ۳ (بارگذاری‌ها)

با توجه به مطالب فوق، تیوری ریزترک و رفتار مکانیکی ریزترک‌ها در نواحی مختلف از منحنی رفتار تنش-کرنش یک سنگ تحت بار فشاری تک محوری بررسی شده و مشخص گردیده است که حافظه تنش سنگ به طور مستقیم در ارتباط با رفتار مکانیکی ریزترک است [۶].

۵-۳ عوامل موثر در بازسازی تنش و ارزیابی آن در تخمین تنش

روش تحلیل نرخ تغییرشکل از منحنی‌های تنش-کرنش بدست آمده از آزمایش‌های تک محوره روی نمونه‌های سنگ برای بازسازی تنش برجا که سنگ تحت آن بوده است، استفاده می‌شود. دیدگاه برای این آزمایش اندازه‌گیری تفاضل کرنش بین دو چرخه بارگذاری-باربرداری تکمیل شده تحت تراکم تک محوره است. تفاضل کرنش می‌تواند به کوچکی تعدادی میکروکرنش باشد، از این رو، یک محیط آزمایش ناکامل و ناقص ممکن است براحتی قرایت کرنش را متفاوت کند و به عنوان یک پی‌آمد این نتیجه می‌تواند باعث اشکال در تفسیر یا اشتباه شود. دیگر موضوع‌های مرتبط با روش DRA می‌تواند به خصوصیات سنگ نسبت داده شود. از آنجایی که نمونه در اصل در یک محیط محدود شده (زیرزمین) بوده است، بعد از این که مغزه اخذ می‌شود و خارج می‌گردد، انبساط می‌یابد. میزان این انبساط (بازشدن/حرکت ترک‌های از پیش موجود، سطح مشترک‌ها) در یک مغزه ممکن است که در

طول کل یک مغزه غیریکنواخت باشد. هنگام اعمال یک بار به نمونه، خردشدگی ناهموای^۱ها^۱ در سطح درونی ترک در طی فرآیند بسته شدن ترک اتفاق می‌افتد و آن نیز باعث ایجاد کرنش‌های غیرالاستیک ناخواسته می‌شود که می‌تواند از نشانگر تنش برجا پوشیده بماند. این اثر فشرده سازی می‌تواند با استفاده از سنسورهای آوایی و مشاهده منحنی تنش-کرنش مشاهده شود و آن در تفاضل کرنش جانبی کم‌تر معلوم است. موضوع‌های ارایه شده توسط شرایط آزمایش معمولاً می‌توانند حل یا توسط بهبود شیوه آزمایش حذف شوند؛ اما موضوع‌های مرتبط با خود مصالح سخت‌تر حذف می‌شوند. در زیر برخی از این موضوع‌هایی که می‌تواند در دقت اثر بگذارند برای مثال خمش نمونه در طی انجام آزمایش، نویز الکتریکی، درجه حرارت، جریان هوا بررسی و راه‌حل‌هایی نیز برای هر کدام ارایه شده‌اند [۲۲].

۳-۵-۱ اثر خمش^۲

در صورتیکه کرنش در نمونه یکنواخت باشد، متوسط‌گیری در واقع باعث تقلیل خطاهای اندازه‌گیری خواهد شد. اگرچه در واقعیت میدان تنش (یا کرنش) به علت تعدادی عوامل یکنواخت نیست. اولین عامل ناهمگنی نمونه است، که باعث غیریکنواختی تنش (یا کرنش) می‌گردد. معمولاً ناهمگنی نمونه مرتبط با میکروساختارهای آن (دانه‌بندی، فولیاسیون^۳ و غیره) است و بنابراین تنش (یا کرنش) غیریکنواخت مقیاس کوچک را ایجاد می‌کند. دومین عامل غیرموازی بودن دو انتهای نمونه و غیرهم محور بودن بار اعمال شده است. حتی اگر نمونه کاملاً همگن باشد، دومین عامل می‌تواند باعث توسعه یک گشتاور خمشی و در نتیجه خمش و توزیع غیریکنواخت تنش یا کرنش در نمونه گردد. پژوهشگران این وضعیت را اثر خمش نامیده‌اند. اثر خمش می‌تواند سبب اندازه‌گیری‌های متفاوت در کرنش‌سنج‌های مختلف و نیز نتیجه خطا در انجام آزمایش سنگ گردد. می‌تواند برای مثال مقاومت اندازه‌گیری شده نمونه را کاهش دهد، چون شکستگی در بخشی از نمونه که تحت تنش حداکثر هستند، شروع می‌شود.

^۱ crushing of asperities

^۲ Foliation

^۳ Bending Effect

در واقع، تنش حداکثر ایجاد شده ممکن است مقاومت موضعی را دریافت کند هنگامی که تنش متوسط کم‌تر از تنش القا شده است [۲۱].

در DRA، غیریکنواختی تنش می‌تواند سبب جابجا شدن نقطه انحنای بدست آمده توسط DRA از طریق اندازه‌گیری کرنش در موقعیت‌های مجزا شود. این امر باعث یک پراکندگی در مقادیر پیش تنش بدست آمده توسط DRA از طریق کرنش‌سنج‌های مختلف و متعاقباً کاهش در دقت بازسازی تنش خواهد شد. در واقع، در فرآیند بارگذاری، پیش تنش به طور موفق در بخش‌های مختلف نمونه به علت تنش غیریکنواخت دریافت می‌شود. از این رو، بجای یک نقطه انحنای منفرد، توزیعی از نقاط انحنای ثبت می‌شود. این پراکندگی نقطه انحنای می‌تواند دقت در شناسایی را کم‌تر سازد [۲۱].

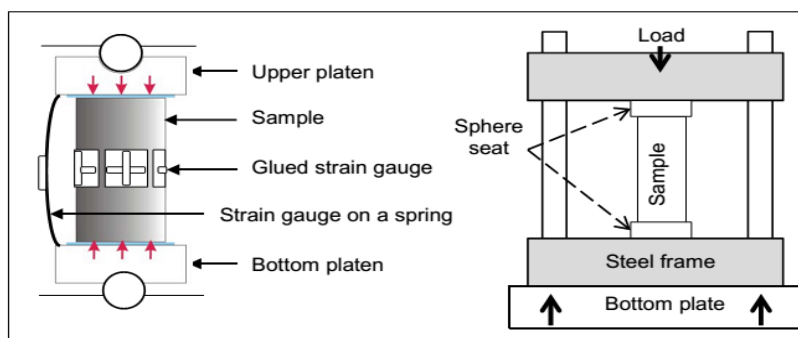
هنگامی که تنها یک کرنش‌سنج محوری یا یک کرنش‌سنج نوع عرضی و جانبی چسبیده به یک نمونه وجود دارد، نقطه انحنای می‌تواند توسط اثر خمشی جابجا شود بدون این‌که آزمون‌گر^۱ متوجه آن گردد. یک ۰,۰۱ mm غیرموازی بودن انتهای نمونه در یک نمونه با ۷۰ GPa صلبیت و با ۵۰ mm طول می‌تواند تا ۱۴ MPa تفاضل تنش ایجاد کند. شرایط ممکن است که با استفاده از نشیمنگاه کره‌ای^۲ پیشنهاد شده توسط ISRM (۱۹۷۹) نیز به علت اصطکاک بین نشیمنگاه کره‌ای و نمونه بهبود نیابد. از این رو استفاده بیش‌تر از یک کرنش‌سنج محوری برای چک کردن سطح خمش هر آزمایش توصیه می‌شود.

غیر از خمش ناشی از سطوح انتهایی غیرموازی، غیرهم محور بودن فاکتور دیگری است که به بارگذاری غیریکنواخت کمک می‌کند. این فاکتور براحتی می‌تواند توسط استفاده از یک قاب اضافی بهبود بخشیده شود، طوری که می‌تواند ساخته یا بوسیله یک قاب آزمایش برزیلی اصلاح شود (شکل ۱۱-۳). در شکل ۱۱-۳، یک قاب فولادی با دو نشیمنگاه کره‌ای چسبیده، طبق تجربه کمینه خمش را

^۱ Tester

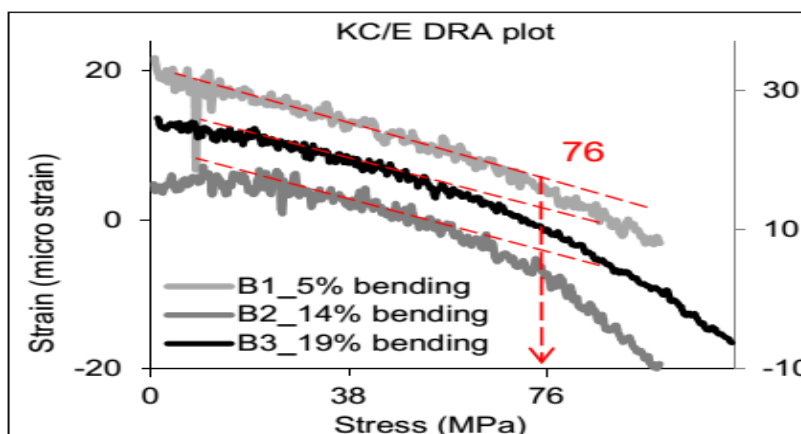
^۲ Sphere Seat

مهیا خواهند کرد. نمونه در مرکز نشیمنگاه کروی جانمایی شده است و یکی از نشیمنگاه / نمونه پس از اعمال بار کوچکی (کمتر از ۳۰۰N) می تواند بچرخد. عمل چرخش نمونه / نشیمنگاه به برقراری تعادل موقعیت کروی کمک می کند و آن هم چنین صفحه های انتهایی نمونه را می فشارد. از این رو، انتهای نمونه و نشیمنگاه کروی به خوبی اتصال دارند. برای کمک به عمل چرخش نمونه، روان کننده نیز می تواند به انتهای نمونه اعمال شود [۲۲].



شکل ۳-۱۱: قاب بارگذاری و موقعیت های کرنش سنج روی یک نمونه [۲۲].

صرفنظر از اثر خمش در پیش بینی تنش، هسیه و دایت (۲۰۱۳) دریافتند که خمش می تواند نقطه خمیدگی را غیرواضح سازد، حتی هنگامی که تفاضل کرنش متوسط از چهار کرنش سنج محاسبه شده بود. در شکل ۳-۱۲، سه نمونه همانند تحت شرایط آزمایش یکسانی غیرسطوح مختلف خمش قرار گرفته بودند.



شکل ۳-۱۲: نقاط انحنای برای نمونه های B1، B2 و B3 [۲۲].

نمونه B₁ پایین ترین سطح خمیدگی و واضح ترین نقطه انحنای را دارد. خط قبل از نقطه انحنای تقریباً یک خط مستقیم است. نمونه B₂ و نمونه B₃ نقطه انحنای واضحی را نشان نمی دهند، چون خط در شکل منحنی در قبل و بعد از نقطه انحنای است. یکی از نمونه های B₂ و B₃ ممکن است که مقدار ۶۶MPa را بجای مقدار ۷۶MPa برگزیند. اگرچه یک نقطه انحنای خوب گاهی اوقات می تواند هنوز از طریق یک نمونه با سطوح خمش بالا مشاهده شود، اثر خمش می تواند یک فاکتور عمده کمک کننده به پیش بینی ناواضح و یا بد باشد. در استفاده از LVDT^۱ برای جایگزینی کرنش سنج، چهار LVDT در زاویه ۹۰ درجه محیط نمونه به طور مجزا به منظور چک کردن سطح خمش نصب می شوند. [۲۲].

نصب کرنش سنج ها زمان بر بوده و هزینه کرنش سنج ها می تواند قابل توجه باشد. مجموعه کرنش سنج های جانبی و محوری می تواند هزینه ای بین ۱۴-۲۰ دلار داشته باشد، که معادل ۵۶ دلار (حداقل هزینه ۴ کرنش سنج) بر هر آزمایش است. نويز و یا موضوع های بوجود آمده توسط نصب بد رایج هستند و معمولاً یک شخص با تجربه هنگام حصول داده کرنش سنج نیاز است. به عنوان یک پی آمد، یک LVDT گزینه محبوب تری می شود. هرچند، با استفاده از یک LVDT ثبت تفاضل کرنش در تکنیک DRA همیشه کارا نیست. اولاً دقت LVDT ها باید در حد چندین میکروکرنش باشد، که یعنی باید خطاها کم تر از ۰,۰۰۰۱mm در یک نمونه با قطر ۲۰mm باشد. ثانیاً، فصل مشترک بین نمونه و صفحه های نگهدارنده نیز می تواند به کرنش غیرالاستیک کمک کند؛ پس از اولین بارگذاری سطحیت^۲ سطوح انتها می تواند مسطح شود. سطحیت (زبری^۳) احتمال دارد که بیش از ۰,۰۰۰۱mm شود و آن می تواند نتیجه واقعی را بپوشاند [۲۲].

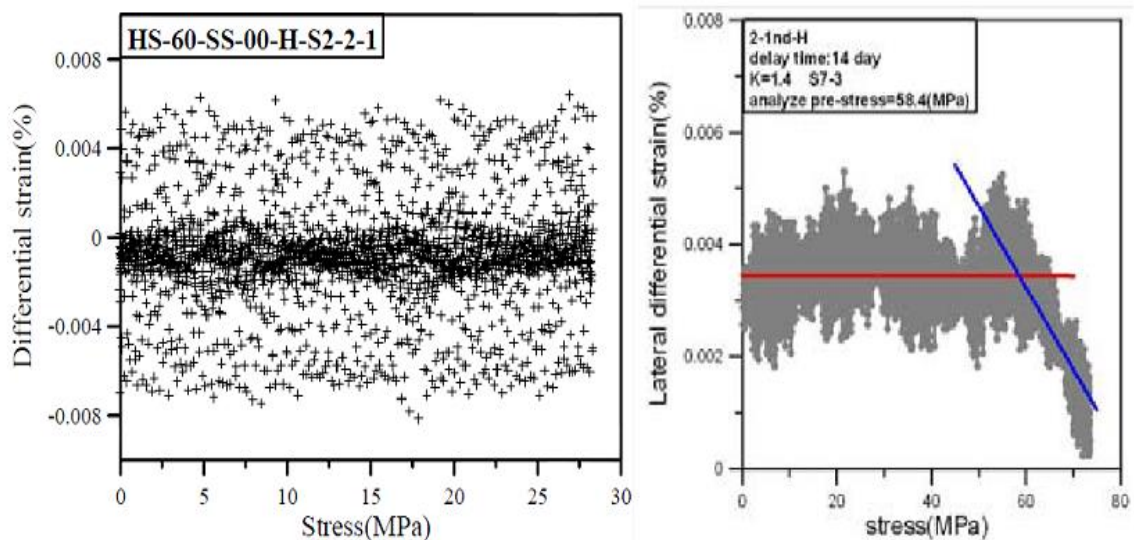
^۱ Linear Variable Reluctance Differential Transformers

^۲ planarity

^۳ roughness

۳-۵-۲ نويزهای الكتريکی

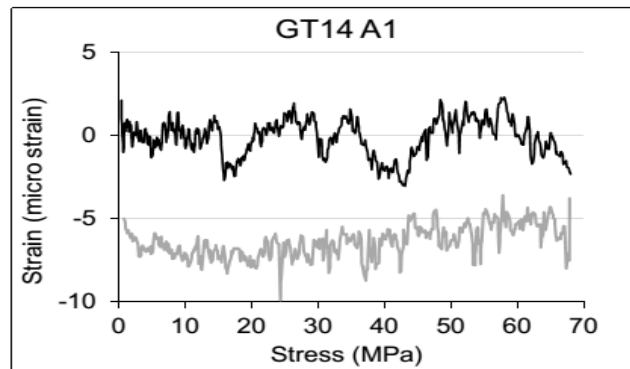
وجود نويز الكتريکی در هر اندازه‌گیری با استفاده از کرنش‌سنج‌ها اجتناب‌ناپذير است؛ که اين شامل سلول بار نیز است. به علت طبيعت روش DRA، ثبت‌های بسیار دقيق تنش و کرنش نیاز است. دقت دومیکروکرنش برای یک نتیجه بویژه اگر که سنگ صلب باشد و خطایی کم‌تر از ۱۰۰N نیز برای سلول بار نیاز است. دومیکروکرنش در اکثر کرنش‌سنج‌ها برابر با تعدادی میکرو ولت است و آن کاملاً رایج است که نويز ایجاد شده توسط سیستم جمع‌آوری اطلاعات ده یا صدها برابر بزرگ‌تر از تعدادی میکرو ولت است. اگر نويز ایجاد شده صرفاً توسط اختلال الكترونیکی است، محدوده دامنه نويز برای هر آزمایش مشابه باقی خواهد ماند و فرکانس نويز بالاتر از ۱MHz است. با ثبت داده در فرکانس بسیار بالا، اکثریت نويزهای الكترونیکی می‌تواند با متوسط‌گیری محو شود. شکل ۳-۱۳ یک الگوی نوعی از نويز الكترونیکی (و هم‌چنین شاید دیگر منابع نويز) را نشان می‌دهد. نوسان قرايت‌ها در یک محدوده مشابه باقی می‌ماند و فرکانس نويز نیز بالاست. نمودار سمت راست در این شکل دیگر منابع نويز با فرکانس‌های پایین‌تر را نیز نشان می‌دهد. آن می‌تواند منبع قدرت ناپایدار، موضوع جریان هوا یا ارتعاش باشد [۲۲].



شکل ۳-۱۳: نويز در نمودار DRA بزرگ‌تر از ۲۰۰ میکروکرنش [۲۲].

۳-۵-۳ جریان هوا

قطب مدارهای سیم بی حفاظ کاملاً به جریان هوا حساس است چرا که باعث افزایش یا کاهش درجه حرارت سیم کرنش‌سنج‌ها می‌شود. تغییر در ولتاژ بسیار کوچک است، اما برای جابجا کردن چندین میکروکرنش به قدر کافی بزرگ است. یک پوشش پلاستیکی برای متوقف کردن جریان هوا ناشی از سیم یا نمونه آزمایش یا هر نوع روکش روی قطب مدارهای سیم بی حفاظ می‌تواند تغییر داده را متوقف کند (شکل ۳-۱۴) [۲۲].



شکل ۳-۱۴: خط سیاه نمودار DRA حاصل از یک آزمایش بدون پوششی برای توقف جریان هوا، خط خاکستری نمودار تنش-کرنش مربوط به آزمایش نمونه مشابه چند روز بعد هنگام استفاده از پوشش پلاستیکی [۲۲].

۳-۵-۴ رطوبت و گرما

عدم وضوح اثرکایزر در گذر زمان می‌تواند توسط اشباع آب یا گرم شدن نمونه میان چرخه‌های بار افزایش یابد. اشباع آب می‌تواند تاثیر شدیدی روی اثرکایزر حتی در یک سنگ با تخلخل پایین مانند گرانیت اعمال کند. یک بررسی فراگیر تاثیر اشباع آب و گرم شدن روی اثرکایزر در یک سنگ شکننده، مانند آندزیت، یوشیکاوا و موگی (۱۹۸۱) انجام شده است. ترکیب‌های مختلفی از رطوبت و گرما مطالعه شده‌اند، که به موجب آن رطوبت نمونه در طی هریک از اولین چرخه، یا در میان چرخه‌های بارگذاری، و یا در طی دومین چرخه ممکن شده است. آزمایش‌ها نشان دادند که بدترین شرایط برای مشاهده‌های اثر کایزر هنگامی است که نمونه در بین چرخه‌ها گرم شده یا این که دومین چرخه روی یک نمونه خیس

شکل گرفته است. تاثیر قوی گرم شدن در حافظه تنش در سنگ‌های دیوریت و لیپوریت توسط پاناسیان و همکاران^۱ (۱۹۹۰) گزارش شده است. در آزمایش آنها، افزایش درجه حرارت تا تنها ۸۰-۱۰۰ درجه بین دو چرخه بارگذاری برای رفع کامل تر اثر کایزر کافی بوده است. مکانیزم‌های تضعیف اثر کایزر در کورس زمان و همچنین تاثیر اشباع آب هنوز به طور کامل درک نشده است. دانستن این پدیده‌ها برای تغییرات میکروساختاری بهبود ترک وسوسه انگیز است. اگرچه، پژوهش تفصیلی‌تر، شامل تحلیل میکروسکوپی، نیاز به روشن کردن این نکات است [۳۳]. توسط فوجی و کندو اظهار شده است که حافظه تنش براحتی هنگامی که محتوای آب نمونه‌ها تغییر یافته بود، ناپیدا گشته است. برای مثال، نمونه‌ای که پیش بارگذاری شده بودند در آب به سرعت حافظه تنش خود را پس از آن که آنها خشک شده بودند، از دست دادند. به طور مشابه، نمونه‌های خشک پیش بارگذاری شده پس از آن که در آب غوطه‌ور شده بودند، حافظه تنش خود را از دست دادند. بنابراین آب محتوای مغزه‌های سنگ باید بدون تغییر احتمالی نگه داشته شوند تا این که اندازه‌گیری تنش توسط بارگذاری چرخه‌ای به پایان برسد [۵۲].

۳-۵-۵ ارزیابی پیش تنش و زمان تاخیر

در سال ۲۰۱۰، فوجی و کندو، آزمایش‌هایی را در راستای بررسی تاثیر تمرکز تنش در نمونه‌گیری سنگ روی مقدار تنش برجای تخمین شده سنگ توسط روش مدول مماسی^۲، که یکی از روش‌های نقطه اثر کایزر است را بر روی مغزه جهت‌دار برای اندازه‌گیری تنش برجا انجام دادند. شیوه زیر برای تخمین تنش برجا استفاده شده بود:

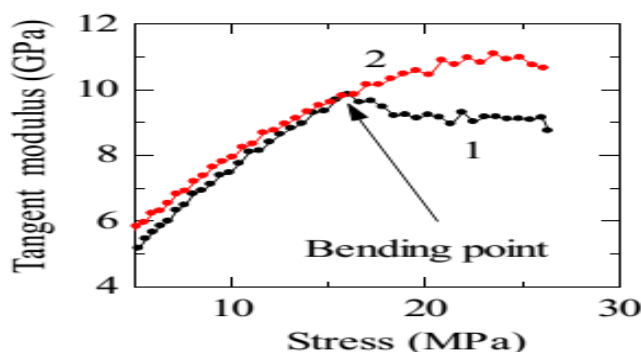
- مغزه‌های جهت‌یافته سنگ از ساختگاه نمونه‌گیری شدند.
- نمونه‌های استوانه‌ای سنگ تهیه شدند.

^۱ Panasiyan et al

^۲Tangent Modulus Method

- نمونه‌ها دو بار تحت تراکم تک محوره یا سه محوره تا یک سطح مشخص تنش قرار گرفتند.

- مقدار تنش نقطه انحنای در منحنی مدول مماسی-تنش در اولین چرخه بارگذاری یا در نقطه‌ای که اولین و دومین منحنی مدول مماسی-تنش شروع به جداسازی می‌یافت (این نقطه نیز بعداً برای راحتی نقطه انحنای نامیده شده است) به عنوان مولفه (نرمال) تنش برجای سنگ در راستای نمونه ملاحظه شده است. ثابت شده است که در سطح تنش پیش بارگذاری برای ماسه‌سنگ شیراهاما (شکل ۳-۱۵)، توف شیکوتسو، گرانیت اینادا و ماسه‌سنگ کیمچی پدیدار شده است. البته نقاط انحنای با افزایش زمان تاخیر مبهم گشته است. اگرچه نقاط انحنای در سطح تنش پیش بارگذاری حتی برای زمان تاخیر یک هفته برای ۱۷ ساعت پیش بارگذاری مشاهده شده است [۵۲].

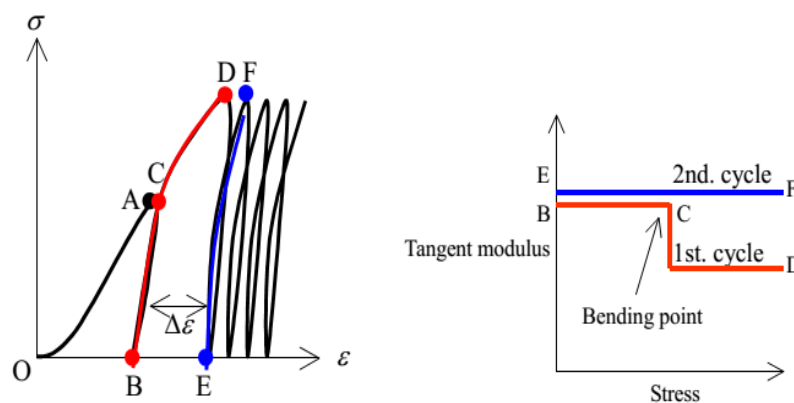


شکل ۳-۱۵: نمونه‌ای از منحنی مدول مماسی-تنش در چرخه بارگذاری برای ماسه‌سنگ شیراهاما. ۱ و ۲ به ترتیب اولین و دومین چرخه بارگذاری است. مقدار پیش تنش تخمینی در نقطه انحنای ۱۵,۴ MPa [۵۲].

مکانیزم روش مدول مماسی می‌تواند توسط بسته‌شدن‌های بازگشت ناپذیر خلل و فرج‌هایی مانند میکروتراک‌ها و حفره‌ها در سنگ توجیه شود. فرض می‌شود که نقطه A در شکل ۳-۱۶ (الف) شرایط برجا باشد. برخی ریزتراک‌ها که به قدر کافی مسطح و صفحه‌ای^۱ هستند و به اندازه‌ای بزرگ که تاحدی

^۱ tabular

در سطح تنش برجا بسته شده‌اند. تعداد کمی از اینها اندکی با آزادسازی تنش توسط نمونه‌گیری سنگ باز می‌مانند (نقطه B). سنگ در طی اولین چرخه بارگذاری تا سطح تنش برجا (B تا C) صلب است، چون تقریباً هیچ خلل و فرج ریزترک بیش‌تری بسته نمی‌شود. اگرچه، صلبیت در اثر فشارش بیش‌تر (C تا D) توسط بسته شدن بیش‌تر تعدادی از ریزترک‌های بسته شده و بسته شدن دیگر ریزترک‌ها کاهش یافته و نقطه C نقطه انحنا نمایان شده است (شکل ۳-۱۶ ب). هیچ گونه بسته شدن بیش‌تری در دومین چرخه بارگذاری با صلبیت بالا در سرتاسر دومین چرخه بارگذاری (E تا F) حاصل نمی‌شود. مکانیزم فوق هم‌چنین به خوبی اصل DRA را توضیح می‌دهد. هم‌چنین باید منحنی‌های مدول مماسی-تنش برای روش مدول مماسی و تابع تفاضل کرنش برای روش DRA رسم شوند زیرا که غیرخطی بودن^۱ برای اکثر سنگ‌ها در واقعیت بسیار واضح نیست [۵۲].



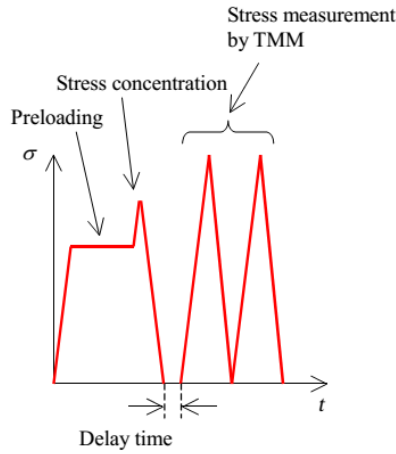
شکل ۳-۱۶: تصاویر نمادین تغییرشکل غیرخطی سنگ، الف) منحنی تنش-کرنش (چپ)، ب) منحنی مدول تانژانت-تنش (راست) [۵۲].

در آزمایش‌های فوجی و کندو (۲۰۱۰)، مغزه‌های سنگ با قطر ۳۰mm در طول راستای سریع‌ترین موج p از یک بلوک ماسه‌سنگ کیمچی حفاری شده بودند. نمونه‌ها در دمای ۸۰ درجه برای ۲۴ ساعت خشک شده بودند و سپس در آزمایشگاه برای بیش‌تر از یک روز قبل از آزمایش‌ها در محل آزمایش قرار داده شده بودند؛ سپس نمونه‌ها بصورت زیر مورد آزمایش قرار گرفتند:

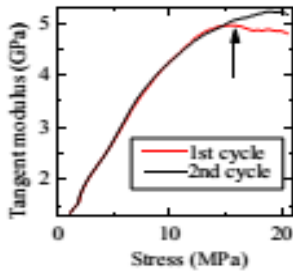
^۱ nonlinearity

- تحت بارگذاری فشاری در ۳۰٪ از مقاومت تراکم تک محوری (UCS) برای ۲۴ ساعت به عنوان پیش بارگذاری، برای شبیه سازی تنش سنگ برجا (شکل ۳-۱۷).
- تحت بارگذاری فشاری تا ۴۰٪ مقاومت تراکم تک محوری توسط یک الگوی بارگذاری برای تقریباً ۱ دقیقه، برای شبیه سازی تمرکز تنش در نمونه گیری سنگ (شکل ۳-۱۷).
- باربرداری و نگه داشتن آن برای زمان تاخیر مشخص،
- دوبار بارگذاری چرخه ای تا ۵۰٪ مقاومت تراکم تک محوری برای بدست آوردن منحنی مدول مماسی-تنش. همه بارگذاری ها و باربرداری هادر نرخ بارگذاری ۰٫۳۶mm/min انجام شده است.

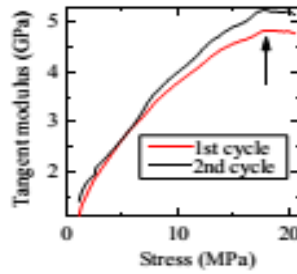
نقاط انحنا در ۴۰٪ UCS (۱۶MPa) برای زمان تاخیر بین ۰ تا ۱ ساعت مشاهده شده بوده اند (شکل ۳-۱۸ a-d). این یعنی این که حافظه پیش بارگذاری بلند مدت توسط حافظه تنش بزرگ تر کوتاه مدت پوشیده شده و مقدار تنش پیش بارگذاری اولیه بازیابی نشده است. شکل ۳-۱۸ (f-e) منحنی های مدول مماسی-تنش برای پیش تنش و تنش بزرگ تر-زمان کوتاه به ترتیب ۱۲ و ۱۶MPa نشان می دهد. نقاط انحنا در ۳۰٪ UCS (۱۲MPa) و ۴۰٪ آن برای زمان تاخیر ۳ ساعت مشاهده شده بودند (شکل ۳-۱۸ e). به این ترتیب یعنی، حافظه هر یک از پیش بارگذاری-طولانی مدت و بار بزرگ تر-کوتاه مدت تعیین شده اند. نقاط انحنا برای زمان تاخیر ۱ و ۳ روز تنها در ۳۰٪ UCS بدست آمده است (شکل ۳-۱۸ f و g). هیچ نقطه ای برای زمان تاخیر یک هفته مشاهده نشده است (شکل ۳-۱۸ h). بنابراین می توان نتیجه گرفت که حافظه های هر یک از پیش بارگذاری ها از دست رفته اند. بنابراین فوجی و کندو استنتاج کردند که حافظه مقدار تنش بزرگ برای یک مدت زمان کوتاه در نمونه گیری سنگ می تواند ناپدید شود، عین مقدار مولفه نرمال تنش سنگ برجا که برای یک مدت زمین شناسی طولانی در راستای نمونه اعمال شده است می تواند احتمالاً ارزیابی شود اگر یک زمان تاخیر مناسب در نظر گرفته شود [۵۲].



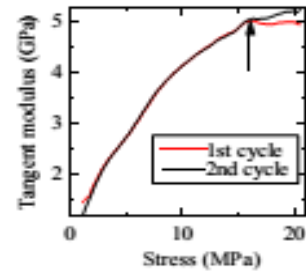
شکل ۳-۱۷: الگوی بارگذاری [۵۲].



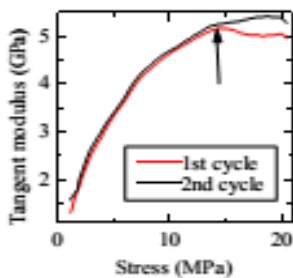
(a) No delay



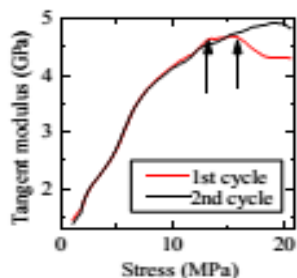
(b) 10 min. delay



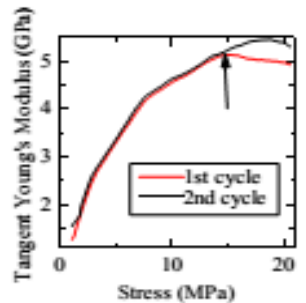
(c) 30 min. delay



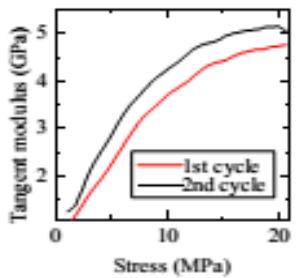
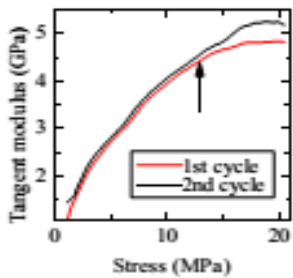
(d) 1 hour delay



(e) 3 hour delay



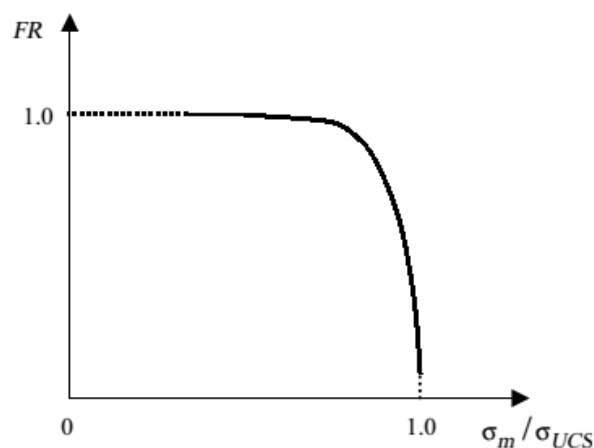
(f) 1 day delay



شکل ۳-۱۸: منحنی‌های مدول مماسی-تنش، با پیش تنش و تنش بزرگ تر-زمان کوتاه به ترتیب ۱۲ و ۱۶MPa [۵۲].

۶-۳ بررسی نوع سنگ و مرحله بارگذاری

تاکنون، اثر کایزر در بسیاری از انواع سنگ‌های گوناگون مشاهده شده است از قبیل گرانیت، گرانودیوریت، کوارتزیت، آندزیت، بازالت، گنیس، شیست، توف، مرمر، سنگ آهک، ماسه‌سنگ، دولومیت، شیل، لای سنگ و غیره [۳۳]. در سنگ‌های شکننده، این اثر، اگر تنش پیش بارگذاری از مقدار تنش در جایی که اتساع شروع می‌شود تجاوز نکند، مشخص‌ترین حالت است. اگر در طی پیش بارگذاری از آستانه اتساع تجاوز کرده باشد، اثر کایزر در طی پیش بارگذاری وضوح آن کم‌تر می‌شود، چون در این صورت فعالیت AE در تنش‌های پایین‌تر نمایان می‌شود که شناسایی اثر کایزر را مشکل می‌سازد یا مانع آن می‌شود [۵۲]. در یک سنگ شکننده با تنش پیش بارگذاری نزدیک به مقاومت نهایی، اثر کایزر در طی پیش بارگذاری کم‌تر مشخص است. می‌توان گفت، درحالی‌که پیش بارگذاری به سمت مقاومت نهایی سنگ پیش می‌رود، اثر کایزر به سمت تنش‌های پایین‌تر حرکت می‌کند. این حرکت می‌تواند به طور کمی توسط نسبت مناسبت (FR) توصیف شود که نسبت مقدار تنش نقطه اثر کایزر به حداکثر تنش پیشین بارگذاری است. وابستگی FR به تنش پیش بارگذاری برای یک سنگ شکننده به طور نمادین در شکل (۳-۱۹) نشان داده شده است [۳۳].



شکل ۳-۱۹: FR در دومین چرخه بارگذاری تراکم تک محوره-نسبت حداکثر تنش اولین چرخه بارگذاری به مقاومت تراکم تک محوره سنگ [۳۳].

به منظور بدست آوردن اثر کایزر با یک وضوح خوب، تنش پیش بارگذاری باید در محدوده‌ای از حدود ۳۰٪ تا حدود ۸۰٪ مقاومت نهایی باشد. این محدوده به یقین وابسته به سنگ است. مرزهای پایین‌تر این محدوده (۲۰-۳۰٪ از مقاومت) به علت این حقیقت که زیر این مرز، AE کوچکی تعیین شده است حتی بدون پیش بارگذاری، و این سکوت می‌تواند به اشتباه به عنوان اثر کایزر تفسیر شود [۳۳]. در سنگ‌های شکل‌پذیر، مانند سنگ نمک، هم قبل و هم بعد از آغاز فرآیند اتساع به خوبی اثر کایزر مشخص است. به علاوه، اثر کایزر در ناحیه پس شکست در بخش نزولی منحنی تنش-کرنش دارای وضوح کاملاً خوبی است [۵۳]. اثر هنگامی رخ می‌دهد که کرنش فعلی نمونه از مقدار بزرگ‌ترین کرنش پیشین تجاوز کند. بارگذاری کنترل شده باید به منظور مشاهده اثر کایزر در مرحله پس شکست به کار گرفته شود [۳۳]. در آزمایش‌های دانینگ و همکاران (۱۹۸۹) نتایج جالبی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای ماسه‌سنگ با یک سطح برش اره‌ای بدست آمده بود. سطح، انحراف یافته در ۳۵ درجه نسبت به محور تنش اصلی حداکثر، برای شبیه سازی یک گسل در پوسته زمین مدنظر آنها بود. دو چرخه بارگذاری برای هر نمونه شکل گرفته بود. یک اثر کایزر بسیار واضح در دومین چرخه مشاهده شده بود هنگامی که حداکثر بار اولین چرخه ۶۰٪ تنش تسلیم بود، یعنی شکستگی‌های بزرگ (قابل مشاهده با چشم غیرمسلح) در اولین چرخه اتفاق نیفتاده بود. چون شکستگی‌های بزرگ در فرم چسبیدن-لغزش در اولین چرخه اتفاق افتاد، اثر کایزر در دومین چرخه فاقد کیفیت لازم بود. هرچند، چون در اولین چرخه شکستگی‌های بزرگ در فرم لغزش پایدار اتفاق افتاد، یک اثر کایزر با وضوح بسیار خوب در دومین چرخه اندازه‌گیری شده بود [۵۴].

۷-۳ جمع‌بندی

برای سنگ‌ها هنگامی که تحت بار فشاری هستند، چند مرحله‌ی تغییرشکل قابل تعریف است. در هر یک از این مراحل در اثر بار تراکمی کرنش‌هایی در سنگ تحت اثر آن رخ می‌دهد. سپس در نهایت با افزایش بار ممکن است که شبکه‌ای از ترک‌های متصل شده تشکیل شوند که آن هم در نهایت منجر

به ایجاد سطح شکست می‌گردد. پژوهشگران در زمینه وابستگی جهت‌دار روش‌های تخمین تنش اعتقاد دارند ممکن است نمونه‌ای که برای آزمون آزمایشگاهی جهت‌دار شده است، در جهت تنش اصلی نباشد اما در یک زاویه‌ای نسبت به آن است. توسط پژوهشگران اظهار شده است که اثر کایزر در زاویه کم‌تر از ۱۰ درجه نسبت به جهت بارگذاری قبلی مشاهده شده است و در زاویه انحراف بیش‌تر از آن اثر کایزر مشاهده نشده است. اگرچه، در موارد معدودی با مقایسه جهت تنش بدست آمده توسط روش‌های تخمین تنش با جهت بدست آمده آن توسط روش‌های اندازه‌گیری مستقیم سازگاری نداشته است. روش DRA به دلیل این‌که از تفاضل کرنش استفاده می‌کند، تفاضل کرنشی که می‌تواند به اندازه تعدادی میکروکرنش باشد، محیط و شرایط آزمایش بایستی بدون نقص باشد یا در حد امکان شرایط به یک محیط آزمایش کامل و ایده‌آل نزدیک باشد. زیرا که در غیر این صورت می‌تواند به راحتی در مقدار کرنش قرایت شده تفاوت ایجاد کند و به سادگی در مقدار تخمین شده توسط این روش‌ها تاثیر بگذارد و باعث نتایج اشتباه گردد. از این‌رو، شناخت عواملی که در این خصوص اثر بگذارند اهمیت می‌یابد و برطرف نمودن آنها می‌تواند به نسبت زیادی سبب افزایش دقت کار گردد.

فصل چهارم:

بررسی امکان بازیابی تیش سنگ ها توسط آزمایش DRA

۱-۴ مقدمه

در این فصل با استفاده از روش تحلیل نرخ کرنش بازیابی تنش بر روی نمونه‌های تهیه شده از بلوک‌های انواع سنگ‌های آهک، ماسه سنگ، سنگ زیولیت، گچ و سنگ گرانیت که (دارای حافظه تنش صفر هستند) از مناطق مختلف گردآوری شده‌اند، مطالعه شده است. آزمایش‌ها بر روی نمونه‌ها طی پیش بارگذاری‌ها و چرخه‌های بارگذاری-باربرداری که در سطح تنش‌های مختلف برای هر نوع از نمونه‌های مغزه سنگ صورت گرفته است. سپس نتایج حاصل از هر کدام از آزمایش‌ها بر روی سنگ‌ها ارزیابی و باهم مقایسه شدند که جزییات آنها در ادامه تشریح می‌شود.

۲-۴ تهیه نمونه

برای بررسی روش تحلیل نرخ تغییرشکل در تخمین تنش پیشین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی برای نمونه‌های انتخاب شده بایستی مشابه بوده و شرایط آزمایش برای همه نمونه‌ها یکسان باشد. از این رو، نمونه‌های مغزه سنگ برای هر نوع سنگ از یک بلوک مشابه تهیه شدند. بلوک‌های انواع سنگ‌ها از جمله سنگ‌های ماسه سنگ، سنگ آهک، سنگ گچ، سنگ زیولیت و سنگ گرانیت از مناطق مختلف تهیه شدند.

طبق استاندارد ارایه شده توسط ISRM^۱ برای انجام آزمایش تراکم تک محوره، نمونه‌ها باید حتماً استوانه‌ای بوده و نسبت ارتفاع به قطر آنها بایستی حداقل بین ۱,۵-۲,۵ باشند. هم‌چنین قطر نمونه‌ها نباید از ۲۰ mm کوچک‌تر باشد. لازم است دو سطوح انتهایی نمونه به طور کامل صاف و صیقلی باشند و مقدار صافی این سطوح باید حدود ۰,۰۲ mm باشد. هم‌چنین عمود بودن سطح به محور نمونه نیز باید حدود ۰,۰۱ رادیان باشد. در این پژوهش سعی شده است تمام این موارد رعایت شود.

^۱ International Society for Rock Mechanics

با استفاده از دستگاه مغزه‌گیری و مته‌های با قطرهای ۵۴ و ۳۲ میلی‌متری از بلوک‌های سنگ‌های یاد شده، نمونه‌های مغزه استوانه‌ای تهیه گردید. شکل ۴-۱ تصویر دستگاه مغزه‌گیری را نشان می‌دهد. پس از آن، تمام نمونه‌های مغزه تهیه شده از بلوک‌های انواع سنگ‌ها بوسیله دستگاه مغزه‌گیری با قطرهای تهیه شده حدود ۵۴ و ۳۲ میلی‌متر به ترتیب در طول‌های حدود ۷ سانتی‌متر و ۱۰-۱۳٫۵ سانتی‌متر توسط دستگاه برش سنگ (شکل ۴-۲) برش داده شدند. سپس تمام نمونه‌ها پس از برش داده شدن نام‌گذاری شدند. شکل‌های ۴-۳، ۴-۴، ۴-۵، ۴-۶ و ۴-۷ به ترتیب تصویر نمونه‌های بدست آمده و نام‌گذاری شده برای هریک از سنگ‌های گرانیت، آهک، ماسه سنگ، گچ و زیولیت را نشان می‌دهند که همگی برای انجام آزمایش DRA تهیه شده‌اند. تعداد نمونه‌های مغزه برای هریک از سنگ‌های گرانیت، آهک، ماسه سنگ، گچ و زیولیت در راستای انجام آزمایش DRA و همچنین جهت تعیین خصوصیات مکانیکی هر یک از سنگ‌ها برای هر دو قطر مغزه ۵۴ و ۳۲ میلی‌متر در جدول ۴-۱ آورده شده است.



شکل ۴-۱: تصویر دستگاه مغزه گیری مورد استفاده.



شکل ۴-۲: تصویر دستگاه برش سنگ.



شکل ۳-۴: نمونه‌های مغزه تهیه شده از بلوک سنگ گرانیت جهت آزمایش DRA.



شکل ۴-۴: نمونه‌های مغزه تهیه شده از بلوک سنگ آهک جهت آزمایش DRA.



شکل ۵-۴: نمونه‌های مغزه تهیه شده از بلوک سنگ ماسه جهت آزمایش DRA.



شکل ۴-۶: نمونه‌های مغزه تهیه شده از بلوک سنگ گچ جهت آزمایش DRA.



شکل ۴-۷: نمونه‌های مغزه تهیه شده از بلوک سنگ زیولیت جهت آزمایش DRA.

جدول ۴-۱: تعداد نمونه‌های مغزه برای هر یک از سنگ‌ها.

نوع سنگ	سنگ گرانیت	سنگ آهک	سنگ ماسه‌سنگ	سنگ گچ	سنگ زیولیت
تعداد مغزه سنگ با قطر ۳۲mm	۹	۱۰	۱۰	۲	۴
تعداد مغزه سنگ با قطر ۵۴mm	۱	۱	۱	۸	۶

۳-۴ تجهیزات آزمایش

۱-۳-۴ سیستم اندازه‌گیری

برای انجام آزمایش DRA، به یک دستگاه بارگذاری، یک دستگاه ثبت اطلاعات و همچنین سیستمی برای اندازه‌گیری کرنش محوری جهت رفتارنگاری آن در طی بارگذاری نیاز است. در این

آزمایش‌ها، از کرنش‌سنج‌های ۲۰ و ۶۰ میلی‌متری که قابلیت اندازه‌گیری کرنش‌ها در حد میکرون را دارند، جهت اندازه‌گیری کرنش‌های محوری و همچنین کرنش‌های عرضی برای تعیین ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌های مغزه سنگ استفاده شده است. شکل ۴-۸ تصویری از این کرنش‌سنج‌ها را نشان می‌دهد. برای آزمایش DRA همه کرنش‌سنج‌ها برای هر کدام از نمونه‌ها در امتداد عمود بر قطر نمونه‌ها نصب شدند تا بتوان تغییرات را در این راستا اندازه‌گیری نمود.



شکل ۴-۸: کرنش‌سنج‌های ۲۰ و ۶۰ میلی‌متری استفاده شده در آزمایش‌ها.

۲-۳-۴ دستگاه بارگذاری و مشخصات آن

دستگاه مورد استفاده در این آزمایش یک دستگاه اعمال بار به صورت فشارش ساخت شرکت کنترلز ایتالیا مدل C53B02 از سری پیشرفته و تولید سال ۲۰۱۶ است (شکل ۴-۹). این دستگاه وزنی حدود ۱ تن (۱۰۴۰ کیلوگرم) و ظرفیت حداکثر نیروی ۳۰۰۰ KN با سطح پیستون ۴۸۳۰۵,۱ mm^۲ را دارد و می‌تواند بارگذاری‌های تراکمی را بر روی نمونه‌ها اعمال نماید. همچنین این دستگاه قابلیت ثبت خودکار تغییرات تنش و کرنش بوجود آمده در طول بارگذاری و باربرداری در نمونه را دارا است. دقت اندازه‌گیری تغییرشکل در این دستگاه به میزان ۱ میکرون است که بدلیل نیاز آزمایش با همین دقت از این دستگاه استفاده شده است.



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

۴-۴ تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها

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

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{M_{Sat} - M_S}{M_{Sat} - M_{Sub}} \quad (۱-۵)$$

$$\rho_S = \frac{M_S}{V} = \frac{M_S}{M_{Sat} - M_{Sub}} \quad (۲-۵)$$

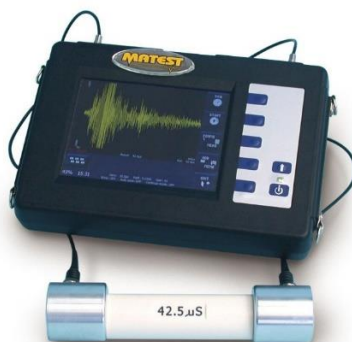
که در این رابطه‌ها n تخلخل، V_v حجم خلل و فرج، V حجم کل، M_{Sat} وزن اشباع، M_s وزن قطعه در حالت خشک، M_{Sub} وزن قطعه در حالت غوطه‌ور در آب (بر حسب گرم) و ρ_s چگالی خشک (بر حسب گرم بر سانتی‌متر مربع) است.

جدول ۴-۲: ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌ها.

نوع سنگ	گرانیت	زیولیت	گچ	آهک	ماسه سنگ
چگالی (gr/cm^3)	۲,۶۲	۱,۷۷	۲,۲۲	۲,۶۸	۲,۶۶
تخلخل (%)	۱,۳۱	۱۸,۶۵	۷,۰۸	۱,۲۸	۱,۲۶

از هریک از سنگ‌ها یک نمونه مغزه با قطر حدود ۵۴ (۵۳,۴) میلی‌متر و با طول حدود ۱۳,۷ سانتی‌متر برای بدست آوردن ویژگی‌های مکانیکی از جمله مقاومت تراکمی تک محوره، سرعت عبور موج p ، نسبت پواسون و مدول الاستیک تهیه گردید. برای تعیین سرعت موج p انواع سنگ‌ها، از نمونه مغزه‌های تهیه شده با طول و قطر ذکر شده در بالا، موج در جهت طولی هر یک از نمونه‌ها توسط دستگاه عبور داده شده و زمان عبور آن ثبت شد؛ این بر روی نمونه‌های Z_1 ، G_1 ، S_1 ، Gy_1 و L_1 به ترتیب سنگ زیولیت، گرانیت، ماسه سنگ، گچ و سنگ آهک هستند (شکل ۴-۱۰)، انجام شد. با داشتن طول نمونه و زمان عبور موج، سرعت عبور موج p برای هر یک از نمونه‌های سنگ‌ها محاسبه شده که نتایج آن در جدول ۴-۳ آورده شده است. بر روی هریک از این نمونه‌های ذکر شده در فوق یک کرنش‌سنج ۶۰ میلی‌متری بصورت عرضی و یک کرنش‌سنج ۶۰ میلی‌متری دیگر بصورت طولی که هر یک به ترتیب برای اندازه‌گیری تغییرشکل‌های عرضی و طولی روی این نمونه‌ها نصب شدند. بارگذاری تراکم تک محوره توسط دستگاه بارگذاری با نرخ بارگذاری 0.5MPa/s تا رسیدن به مقاومت نهایی

نمونه‌ها انجام شد. شکل ۴-۱۱ شکل ۴-۱۲ تصویر نمونه‌ها قبل و بعد از انجام آزمایش را نشان می‌دهد. در جدول ۴-۴ مقاومت بدست آمده برای هر یک از سنگ‌ها پس از انجام آزمایش آورده شده است.



شکل ۴-۱۰: دستگاه اندازه‌گیری عبور موج.

جدول ۴-۳: سرعت موج انواع سنگ‌های مورد آزمایش.

نمونه	Z_1	G_1	Gy_1	S_1	L_1
سرعت موج p (m/s)	۲۶۳۵	۵۳۰۳	۴۹۷۹	۴۹۹۱	۶۳۹۷



شکل ۴-۱۱: تصویر نمونه‌های هر یک از سنگ‌ها جهت تعیین ویژگی‌های مکانیکی.



شکل ۴-۱۲: تصویر نمونه‌ها پس از انجام آزمایش تراکم تک محوره برای تعیین مقاومت نهایی.

جدول ۴-۴: مقاومت نهایی بدست آمده برای هر یک نمونه‌های مورد آزمایش.

Z_1	G_1	G_{y_1}	L_1	S_1	نمونه سنگ
۵۴	۵۴	۵۴	۵۴	۵۴	قطر (mm)
۰,۵	۰,۵	۰,۵	۰,۵	۰,۵	نرخ بارگذاری (MPa/s)
۸۱	۱۲۶,۱۱	۲۱,۷۶	۹۰	۷۰	مقاومت نهایی تراکم تک محوره (MPa)

پس از انجام آزمایش تراکم تک محوره بر روی نمونه‌های فوق و داده‌های بدست آمده توسط کرنش‌سنج‌ها و مقادیر تنش که در سیستم ثبت و ذخیره شده‌اند، نمودار تنش کرنش برای هر یک از این نمونه‌ها رسم شد.

بعد از انجام آزمایش‌های ذکر شده، داده‌های موردنیاز برای محاسبه مدول الاستیک و نسبت پواسون از جمله تنش و کرنش محوری بدست آمد. بنابراین بوسیله این داده‌ها و به کمک نرم افزار اکسل نمودار

تنش محوری- کرنش محوری ترسیم شد. پس از آن از روی شیب بخش الاستیک منحنی یاد شده مدول الاستیک بدست آورده شد. نسبت پواسون و مدول الاستیک برای هر یک از نمونه‌ها در جدول ۴-۵ نتایج حاصل آورده شده است.

جدول ۴-۵: نسبت پواسون و مدول الاستیک هر یک از نمونه سنگ‌ها.

نمونه سنگ	Z_1	G_1	Gy_1	S_1	L_1
نسبت پواسون (ν)	۰,۲۶	۰,۲۱	۰,۳۰	۰,۲۴	۰,۲۲
مدول الاستیک (E) (GPa)	۳۳	۶۳	۶,۲	۵۰	۲۷

۴-۵ آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش DRA

برای دستیابی به موضوع پژوهش، پنج نوع سنگ مختلف همانطور که قبلاً توضیح داده شد انتخاب شدند. این سنگ‌ها عبارتند از سنگ‌های زیولیت، گچ، ماسه‌سنگ، آهک و گرانیت که از مناطق مختلف و از عمق‌های سطحی تهیه شدند. بنابراین نمونه‌های پیشنهاد شده دارای تاریخچه تنش کمی هستند. همه نمونه‌هایی که جهت انجام آزمایش‌های DRA تهیه شده‌اند دارای قطر مغزه حفاری ۳۲ (۳۲,۱) و ۵۴ mm (۵۳,۴) و نسبت ارتفاع به قطر حدود ۲-۲,۵ با بازه تغییرات $\pm 5\%$ هستند. بر روی هر یک از نمونه‌های مغزه سنگ‌ها یک کرنش‌سنج (که برای نمونه‌های مغزه با قطر ۵۴ mm کرنش‌سنج‌های mm ۶۰ و برای نمونه‌های مغزه با قطر ۳۲ mm کرنش‌سنج‌های mm ۲۰) در جهت عمود بر راستای قطر نمونه‌ها برای رفتارنگاری کرنش محوری در طی بارگذاری استفاده شده است. ابتدا هر یک از کرنش‌سنج‌ها بوسیله چسب بروی نمونه موردنظر چسبانده شده و دوسیم انتهایی کرنش‌سنج‌ها به یک سر ترمینال لحیم‌کاری می‌شود؛ و به سر دیگر ترمینال دو سیم دیگر لحیم می‌شوند. در نهایت دو سیم لحیم شده، به کابل سیستم ذخیره کننده اطلاعات متصل می‌شوند بنابراین نمونه آماده برای آزمایش می‌شود. شکل ۴-۱۳ بصورت نمادین نحوه اتصال کرنش‌سنج به نمونه و کابل به سیم‌های لحیم شده به

کرنش‌سنج جهت آماده سازی نمونه برای آزمایش را نشان می‌دهد. چنان‌چه که قبلاً نیز گفته شد، قبل از انجام آزمایش‌های DRA، آزمون‌های آزمایشگاهی براساس استانداردهای پیشنهاد شده توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ پارامترهای مکانیکی و فیزیکی اصلی سنگ‌های مورد آزمایش انجام شده است. شیوه بارگذاری (و پیش‌بارگذاری) ها برای انجام آزمایش‌های DRA بر روی نمونه‌های مغزه‌های سنگ بر اساس مقاومت نهایی تراکم تک محوره (برحسب کیلو نیوتن) بدست آمده برای هر یک از سنگ‌ها طراحی شده و سپس تنش‌های آنها برای هر یک از نمونه‌های مغزه با قطرهای متناظر با آنها محاسبه و آزمایش بر روی آنها انجام شده است. جزئیات برنامه طراحی شده برای پیش‌بارگذاری و بارگذاری‌ها جهت آزمایش DRA برای سنگ‌های مورد آزمایش در جدول ۴-۶ ارایه شده است. در طراحی این برنامه بارگذاری سعی شده است که تخمین تنش بوسیله روش DRA برای سطوح مختلف تنش از قبیل سطح تنش‌های پایین، متوسط و نسبتاً بالا مورد ارزیابی قرار گیرد. با توجه به این‌که در شرایط واقعی انجام آزمایش نمی‌توان به طور دقیق مقدار طراحی شده را انجام داد، برنامه بارگذاری (و پیش‌بارگذاری) واقعی برای سنگ‌ها کمی متفاوت از آن‌چه که طراحی شده، است. برنامه بارگذاری (و پیش‌بارگذاری) برای همه سنگ‌های گچ، گرانیت، زیولیت و ماسه‌سنگ در جدول ۴-۷ ارایه شده است. البته بایستی یادآوری شود که به علت گسیخته شدن نمونه‌های سنگ زیولیت در سطح پیش‌بارگذاری بالا، بارگذاری‌های سطح ۳ و ۴ در تنش‌های پایین‌تری نسبت به دیگر سنگ‌ها انجام شده است.



شکل ۴-۱۳: نمونه‌ای آماده سازی نمونه برای آزمایش.

جدول ۴-۶: برنامه بارگذاری و پیش بارگذاری کلی برای آزمایش‌های DRA.

سطح بارگذاری	پیش بارگذاری (بر حسب درصد مقاومت تراکم تک محوره)	بارگذاری (بر حسب درصد مقاومت تراکم تک محوره)
۱	٪۸	٪۲۰
۲	٪۲۵	٪۴۰
۳	٪۴۵	٪۶۰
۴	٪۶۵	٪۸۰

جدول ۴-۷: برنامه بارگذاری سنگ‌های زیولیت، ماسه‌سنگ، گچ و گرانیت.

نوع سنگ	سطح بارگذاری	نمونه آزمایش	پیش بارگذاری (MPa)	بارگذاری (MPa)	تعداد چرخه بارگذاری	مدت زمان پیش بارگذاری (Min)	قطر نمونه (mm)
گچ	۱	Gy _{۵-۴}	۱,۹۴	۵	۵	۹۰	۵۴
گچ	۲	Gy _{۵-۱۵}	۶,۴۸	۱۰,۸	۵	۶۰	۵۴
گچ	۳	Gy _{۲-۲۲}	۸,۶۳	۱۳,۸۱	۳	۱۲۰	۵۴
گچ	۴	Gy _{۲-۳۲}	۱۵,۵	۱۸,۱۳	۳	۶۰	۵۴
زیولیت	۱	Z _{۶-۱۵}	۷	۱۵,۵۴	۴	۶۰	۵۴
زیولیت	۲	Z _{۷-۲۶}	۱۸,۵	۳۲,۱	۴	۱۰۵	۳۲
زیولیت	۳	Z _{۷-۴۰}	۲۲,۸۸	۲۹	۵	۶۰	۵۴
زیولیت	۴	Z _{۶-۵۳}	۳۵,۸	۴۹,۵	۳	۶۰	۳۲
ماسه‌سنگ	۱	S _{۴-۵}	۶,۱۸	۱۷,۳	۳	۶۰	۳۲
ماسه‌سنگ	۲	S _{۲-۲۳}	۱۷,۵	۲۸	۳	۹۰	۳۲
ماسه‌سنگ	۳	S _{۲-۳۴}	۳۱,۵	۴۲	۳	۱۳۵	۳۲
ماسه‌سنگ	۴	S _{۲-۳۷}	۴۵,۵	۵۰	۵	۶۰	۳۲
گرانیت	۱	G _{۷-۲۰}	۱۰,۵	۲۶	۳	۶۰	۳۲
گرانیت	۲	G _{۲-۴۰}	۳۱,۵	۴۹	۴	۹۰	۳۲

۳۲	۹۰	۳	۷۵	۵۶,۷	G _{۷-۶۰}	۳	گرانیت
۳۲	۶۰	۲	۱۰۱,۳۵	۸۰,۳۵	G _{۹-۸۲}	۴	گرانیت

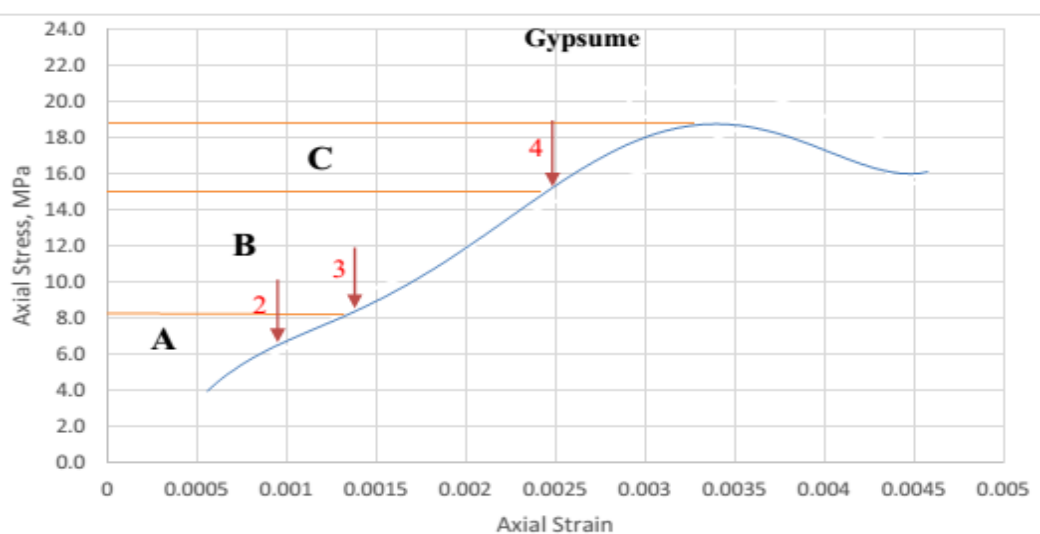
لازم به ذکر است که برای سنگ آهک نیز این برنامه بارگذاری طراحی شده بود اما با توجه به این که تمامی نمونه‌های سنگ آهک که در این راستا استفاده شدند، در حین مراحل پیش بارگذاری یا بارگذاری‌های چرخه‌ای گسیخته شد و بنابراین در این جدول جزئیات بارگذاری این سنگ نیآورده شده است. همچنین برای سطح دوم بارگذاری نمونه G_{۲-۴۰} سنگ گرانیت نیز حین بارگذاری گسیخته شد. شکل ۴-۱۴ تصاویر برخی نمونه‌های شکسته شده حین انجام آزمایش DRA را نشان می‌دهد.



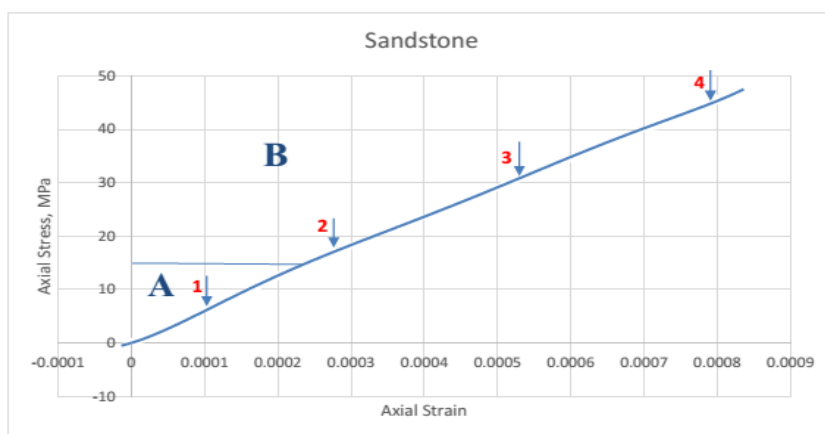
شکل ۴-۱۴: تصاویر نمونه‌های سنگ زیولیت، سنگ آهک، گرانیت و ماسه‌سنگ هنگام بارگذاری (پیش بارگذاری).

همان‌طور که در جدول ۴-۷ نشان داده شده، برای هر کدام از نمونه‌ها که به‌طور موفق آزمایش روی آنها انجام شد، از حداقل سه تا پنج چرخه بارگذاری-باربرداری که بارگذاری آنها تقریباً با نرخ $0,1 \text{ MPa/S}$ برای همه نمونه‌ها صورت گرفت. به علت حساس بودن میزان کرنش غیرالاستیک به نرخ

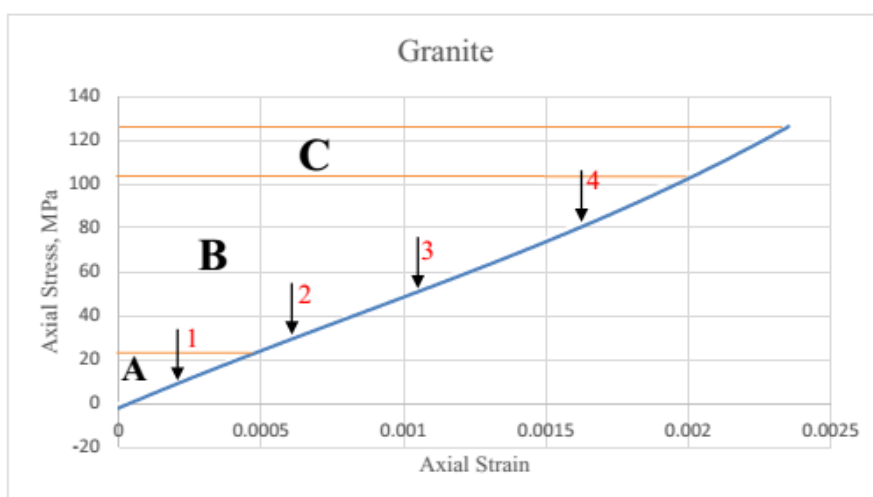
بارگذاری، نرخ بارگذاری تا حد امکان برای رفتارنگاری نمودار تنش-زمان ثابت نگه داشته شده است. هر نمونه مغزه حداقل به مدت یک ساعت تحت پیش بارگذاری قرار می‌گرفت و بعد از آن چرخه‌های بارگذاری - باربرداری اعمال می‌شد. منحنی‌های تنش- کرنش محوری هر یک از سنگ‌ها رسم شده و سپس به سه ناحیه A (ناحیه اول یا بسته شدن ترک‌ها و منافذ)، B (ناحیه دوم یا الاستیک) و C (ناحیه سوم یا پلاستیک برای نمودار مربوط به سنگ گچ) تقسیم‌بندی شدند. پس از آن، با توجه به طراحی‌های پیش بارگذاری‌ها و بارگذاری‌های چرخه‌ای انجام شده برای هر یک از سنگ‌ها، مقادیر آنها در نمودارهای تنش-کرنش محوری رسم شده برای هر سنگ با علامت فلش مشخص شده است تا موقعیت قرارگیری آنها در هی یک از سه ناحیه یاد شده مشخص گردد. شکل‌های ۴-۱۵، ۴-۱۶، ۴-۱۷ و ۴-۱۸ به ترتیب منحنی‌های تنش-کرنش محوری سنگ‌های گچ، ماسه‌سنگ، گرانیت و زیولیت برای سه ناحیه گفته شده را نشان می‌دهند. البته بایستی ذکر شود برای سنگ ماسه‌سنگ این نمودار به دلیل این که ارتباط با کرنش‌سنج در حین آزمایش از تنش حدود ۵۰ مگاپاسکال قطع شد برای این سنگ تا این تنش رسم شده است. چرخه‌های بارگذاری تقریباً با وقفه‌ای حدود ۱ دقیقه و بلافاصله پس از پایان باربرداری چرخه قبلی شروع شده‌اند.



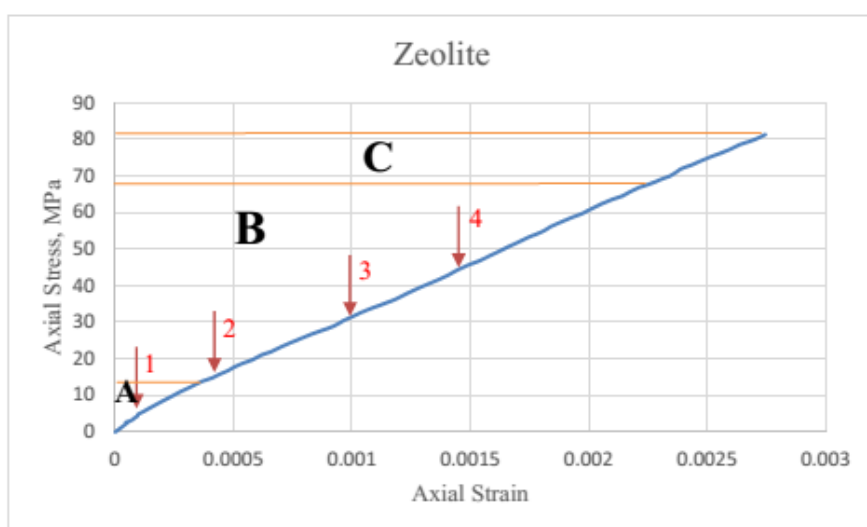
شکل ۴-۱۵: منحنی تنش-کرنش محوری سنگ گچ و سه ناحیه بسته شدن ترک، الاستیک و ناحیه پلاستیک.



شکل ۴-۱۶: منحنی تنش-کرنش محوری سنگ ماسه‌سنگ و ناحیه بسته شدن ترک و ناحیه الاستیک.

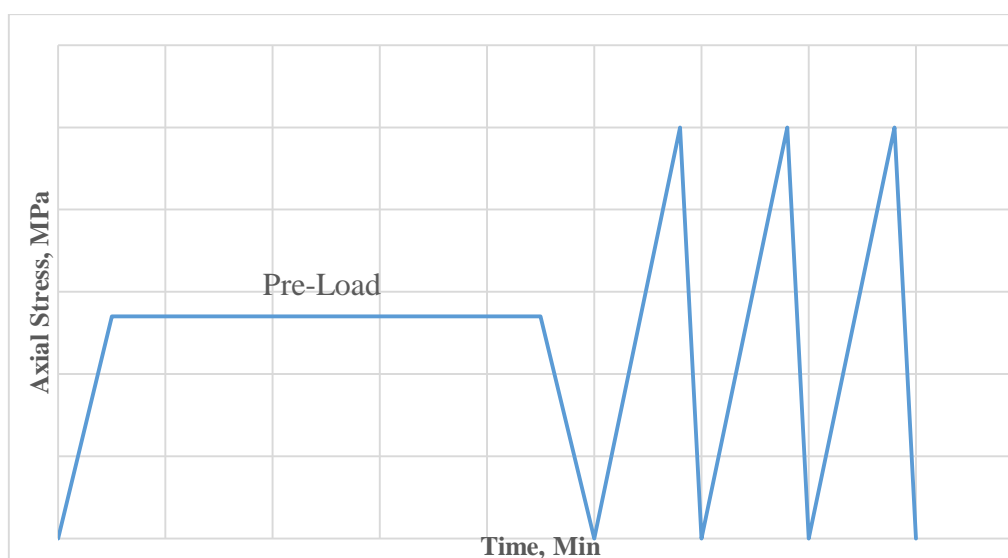


شکل ۴-۱۷: منحنی تنش-کرنش محوری سنگ گرانیت و سه ناحیه بسته شدن ترک، الاستیک و ناحیه پلاستیک.



شکل ۴-۱۸: منحنی تنش-کرنش محوری سنگ زیولیت و سه ناحیه بسته شدن ترک، الاستیک و ناحیه پلاستیک.

شکل ۴-۱۹ به صورت نمادین شیوه بارگذاری کلی برای نمونه‌ها را نشان می‌دهد. پس از آن، با توجه به مقادیر پیش بارگذاری‌ها و بارگذاری‌های چرخه‌ای طراحی‌ها شده برای هر یک از سنگ‌ها، آزمایش مورد نظر بر روی نمونه‌های سنگ انجام شدند. هم‌چنین در طی هر چرخه بارگذاری-باربرداری تنش و کرنش محوری ثبت و براساس آن برای دوچرخه بارگذاری متوالی و موفق نمودار تنش در برابر تفاضل کرنش برای هر نمونه رسم می‌شد. پس از آن از روی نمودارهای بدست آمده که نقاط انحنای واضحی را نشان می‌دهند، بررسی و سپس مقدار تنش در آن نقطه را با مقدار تنش پیش بارگذاری مقایسه شده است. محاسبه‌های ریاضی و رسم این نمودارها توسط برنامه توسعه داده شده Matlab ۹,۰,۱ انجام شده که کد نوشته شده در پیوست (الف) ارائه شده است. این کد به گونه‌ای تعریف شده است که تفاضل کرنش مربوط به دو چرخه بارگذاری متوالی موفق را در سطح تنش‌های یکسان محاسبه و نمودار تنش - تفاضل کرنش مربوط به این دو چرخه بارگذاری را رسم کند. شکل ۴-۲۰ تصاویر برخی از نمونه‌ها را که برای این آزمایش تهیه شدند را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۹: شیوه کلی بارگذاری در آزمایش DRA بر روی نمونه‌ها.

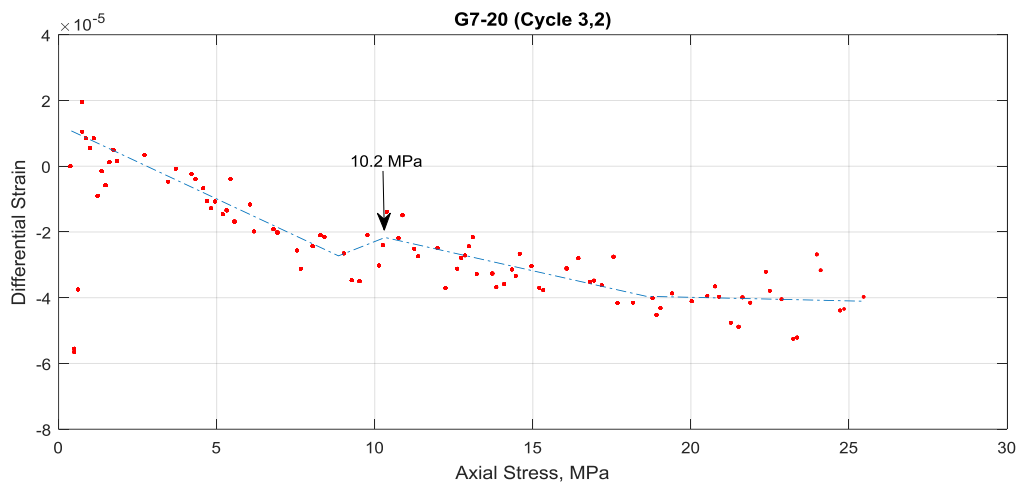


شکل ۴-۲۰: تصاویر برخی از نمونه‌های تهیه شده برای انجام آزمایش DRA.

۴-۶ نتایج آزمایش DRA روی نمونه‌های هر یک از سنگ‌های مورد آزمایش

۴-۶-۱ نمونه‌های سنگ گرانیت

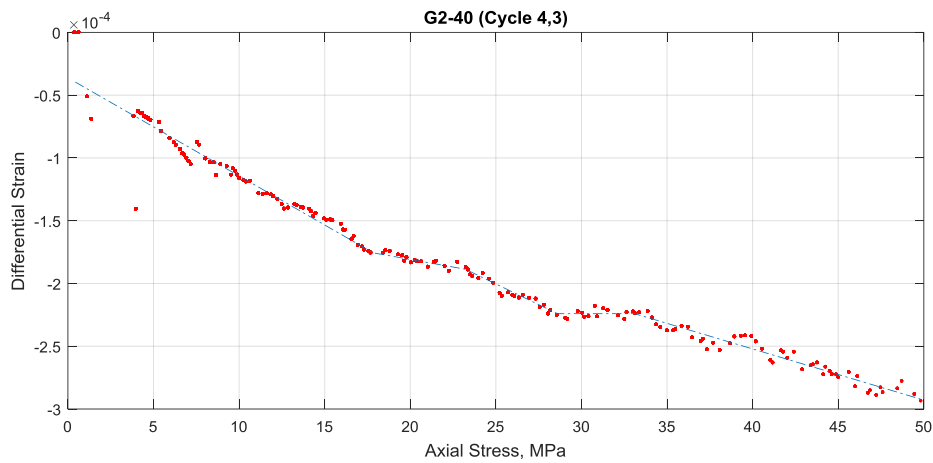
برای انجام آزمایش DRA در سطح مقادیر پیش بارگذاری‌های ارایه شده در جدول ۴-۷ برای سنگ گرانیت نمونه‌های مغزه G_2 ، G_7 و G_9 انتخاب شدند و آزمایش به طور موفق بر روی این نمونه‌ها صورت گرفت. طول هر یک از این نمونه‌ها حدود ۷cm و نسبت ارتفاع به قطر آنها تقریباً ۲:۱ است. سطح بارگذاری که مقدار تنش آن در ناحیه اول منحنی تنش- کرنش محوری این نوع سنگ قرار می‌گیرد، بر روی نمونه G_7 انجام شد. این نمونه تحت پیش بارگذاری ۱۰،۵MPa به مدت یک ساعت و سپس تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای حدود ۲۶MPa قرار گرفت. شکل ۴-۲۱ منحنی تنش-تفاضل کرنش نمونه G_7 را برای دومین و سومین چرخه‌ی بارگذاری نشان می‌دهد. حداکثر تنش در یک چرخه بطور موفق برای هر چرخه افزایش یافته شده است. از شکل مشخص است که دامنه کرنش کاهش یافته از مرتبه 10^{-5} است. فواصل زمانی بین انتهای باربرداری و شروع بارگذاری بعدی حدود ۱ دقیقه بود.



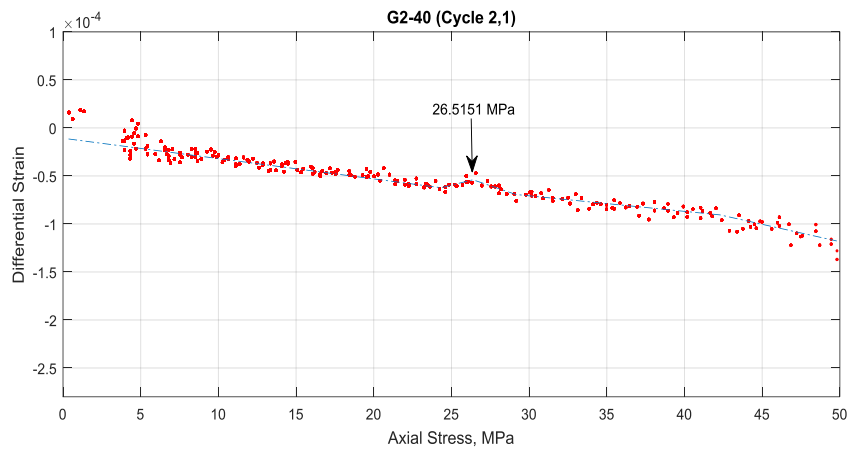
شکل ۴-۲۱: منحنی تنش-تفاضل کرنش نمونه G7-۲۰ برای دومین و سومین چرخه بارگذاری.

چنانچه که از نمودار مشاهده می‌شود شیب آن تا رسیدن به تنش محوری حدود ۹MPa منفی است و آن بدین معنی است که تغییرشکل در بارگذاری سوم نسبت به مقدار آن در بارگذاری دوم در دو چرخه بارگذاری موفق، کاهش پیدا کرده است. پس از آن و در تنش‌های پایین‌تر از تنش پیش بارگذاری، منحنی دارای شیب مثبت است. شیب گرادیان مثبت نیز بیانگر این است که کرنش در سومین بارگذاری نسبت به کرنش در دومین بارگذاری در دو چرخه بارگذاری موفق بیشتر است. سپس با افزایش تنش رفته رفته شدت آن کاهش پیدا کرده است تا این‌که در نقطه‌ای نزدیک به مقدار تنش پیشین به حداقل رسیده و پس از آن به طور مجدد شیب منحنی منفی شده است. بنابراین نقطه انحنای نسبتاً واضحی برای این نمونه در تنش پیش بارگذاری برای ناحیه بسته شدن ترک مشاهده شده است. برای نمونه حاضر، مقدار تنش پیشین تخمین شده توسط روش DRA حدود ۱۰,۲ MPa است، که در واقع نزدیک به مقدار تنش پیش بارگذاری ۱۰,۵MPa است. همچنین مقدار نسبت مناسب، که در اینجا به عنوان نسبت تنش پیشین تخمین شده توسط روش DRA به تنش پیش بارگذاری نمونه تعریف شده، برابر ۰,۹۷۱۴ است. نسبت مناسب در واقع نشانگر دقت روش در تخمین تنش پیشین برای نمونه‌ها را نشان می‌دهد و هر چقدر که این نسبت به یک نزدیک‌تر باشد دقت آن بالاتر خواهد بود.

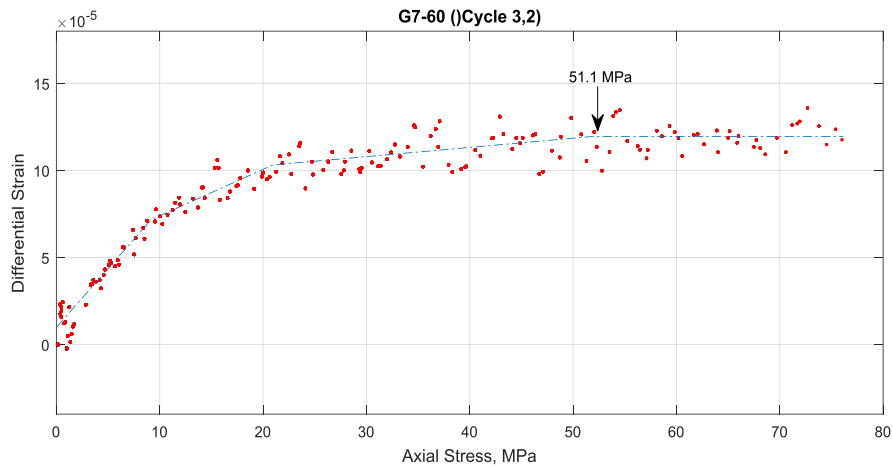
سطح دوم بارگذاری برای سنگ گرانیت که مقدار تنش پیش بارگذاری آن در ناحیه الاستیک منحنی تنش- کرنش محوری سنگ گرانیت قرار می‌گیرد، بر روی نمونه $G_{۲.۴}$ انجام شد. این نمونه تحت پیش بارگذاری $۳۱,۵MPa$ به مدت $۱,۵$ ساعت و بارگذاری‌های چرخه‌ای $۴۹MPa$ قرار گرفت. شکل‌های ۲۲-۴ و ۲۳-۴ نمودارهای تنش محوری - تفاضل کرنش محوری برای این نمونه را به ترتیب برای چرخه‌ی بارگذاری چهارم و سوم و چرخه دوم و اول نشان می‌دهد. همان‌طور که از این دو شکل مشخص است دامنه کرنش کاهش یافته در این نمودارها از مرتبه $۱۰^{-۵}$ است. برای نمودار تنش-تفاضل کرنش برای چهارمین و سومین چرخه بارگذاری برای ناحیه الاستیک، تغییر گرادیان در تنش نزدیک به تنش پیش بارگذاری مشاهده نشده است. چنان‌چه که در شکل ۲۳-۴ برای اولین و دومین چرخه بارگذاری مشاهده می‌شود، اگرچه نقطه انحنا در نمودار مشاهده می‌شود اما آن به‌طور واضح و روشن اتفاق نیفتاده است. تغییر گرادیان در محدوده تنش نزدیک به تنش پیش بارگذاری با فلش مشخص شده است که مقدار حدود $۲۶,۵MPa$ را نشان می‌دهد و که نسبت مناسب آن در این صورت حدود $۰,۸۴۱۲$ بدست می‌آید. رخ ندادن تغییر شیب در منحنی تنش - تفاضل کرنش برای چهارمین و سومین چرخه بارگذاری ممکن است به این دلیل باشد که در ناحیه یاد شده احتمالاً مدت زمان پیش بارگذاری حدود یک ساعت و نیم برای به حافظه سپردن مقدار پیش بارگذاری برای این نمونه در این سطح تنش پیش بارگذاری کافی نبوده (در واقع به‌طور مناسب اثر آن در حافظه این سنگ ذخیره نشده) است. شکل ۲۴-۴ نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط چرخه‌های دوم و سوم برای سطح سوم بارگذاری روی نمونه $G_{۷.۶}$ که مقدار تنش پیش بارگذاری آن در ناحیه الاستیک قرار می‌گیرد، را نشان می‌دهد. دامنه کرنش در این نمودار هم از مرتبه $۱۰^{-۵}$ است.



شکل ۴-۲۲: نمودار تنش-تفاضل کرنش نمونه $G_{۲-۴}$ برای چهارمین و سومین چرخه بارگذاری.



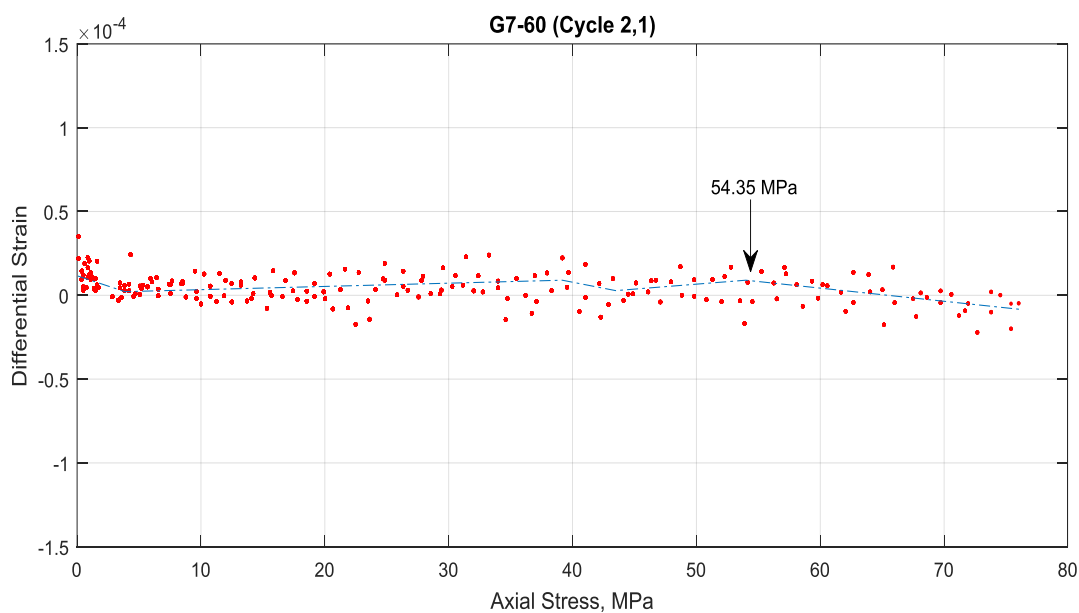
شکل ۴-۲۳: نمودار تنش-تفاضل کرنش نمونه $G_{۲-۴}$ برای دومین و اولین چرخه بارگذاری.



شکل ۴-۲۴: نمودار تنش-تفاضل کرنش نمونه $G_{۷-۶}$ برای دومین و سومین چرخه بارگذاری.

مقدار پیش بارگذاری $56,7\text{MPa}$ و به مدت $1,5$ ساعت و بارگذاری چرخه‌ای 75MPa بر روی این نمونه اعمال شد. همان‌طور که از نمودار مشاهده می‌شود در سه در تنش‌های حدود $22,9$ و $51,1\text{MPa}$ نقاط انحنای رخ داده است. ممکن است که نقطه انحنای در تنش حدود 9MPa اثر پیش بارگذاری $10,5\text{MPa}$ (در اولین آزمایش DRA بر روی این نمونه مغزه) باشد. اما برای نقطه انحنای در تنش حدود 21MPa ممکن است که به دو دلیل اتفاق افتاده باشد. اول، بر اساس اثر حافظه سنگ، ممکن است که نمونه سنگ قبلاً تحت تنشی نزدیک به مقدار آن در این نقطه انحنای قرار گرفته است؛ دوم، این که در نمونه آسیب‌هایی چه در هنگام انتقال آن به محل آزمایش چه در طی بارگذاری‌ها بوجود آمده که باعث ایجاد نقطه انحنای در آن نقطه شده است. نقطه انحنای در نقطه تنش حدود 51MPa در تنش نزدیک به تنش پیش بارگذاری در این مرحله و در ناحیه الاستیک رخ داده است. اگرچه نقطه‌ی انحنای در این نقطه وضوح بالایی نداشته اما تغییر شیب در تنش حدود $51,1\text{MPa}$ نشان می‌دهد که تنش پیش بارگذاری با نسبت مناسب حدود $0,9012$ بازیابی شده است. همچنین این نمودار برای چرخه‌های بارگذاری اول و دوم همین نمونه رسم شده است (شکل ۴-۲۵). دامنه کرنش در این نمودار از مرتبه 10^{-4} است. تغییر شیب در این نمودار در تنش حدود $54,35\text{MPa}$ که نزدیک به تنش پیش بارگذاری است با فلش نشان داده شده است و نسبت مناسب برای آن $0,9585$ است. این مقدار نسبت به نتیجه بدست آمده برای چرخه‌های بارگذاری دوم و سوم، به مقدار پیش بارگذاری نزدیک‌تر است. این اتفاق ممکن است به خاطر این که تنش پیش بارگذاری به خوبی در حافظه سنگ ذخیره نشده، رخ داده است و باعث شده است که مقدار تخمین شده توسط روش DRA برای چرخه‌های بعدی کم‌تر از مقدار تخمین شده در چرخه‌های اول و دوم باشد. با توجه به توضیحات ارائه شده فوق، برای این حالت میانگین دو مقدار تنش تخمین شده در هر یک از نمودار تنش-تفاضل کرنش برای چرخه‌های دوم و سوم و نمودار آن در چرخه اول و دوم برابر با که $52,72\text{MPa}$ است در نظر گرفته شده است. بنابراین نسبت مناسب در این حالت $0,92$ خواهد بود. تغییر شیب در این نمودار در تنش حدود $54,35\text{MPa}$ که نزدیک به تنش پیش بارگذاری

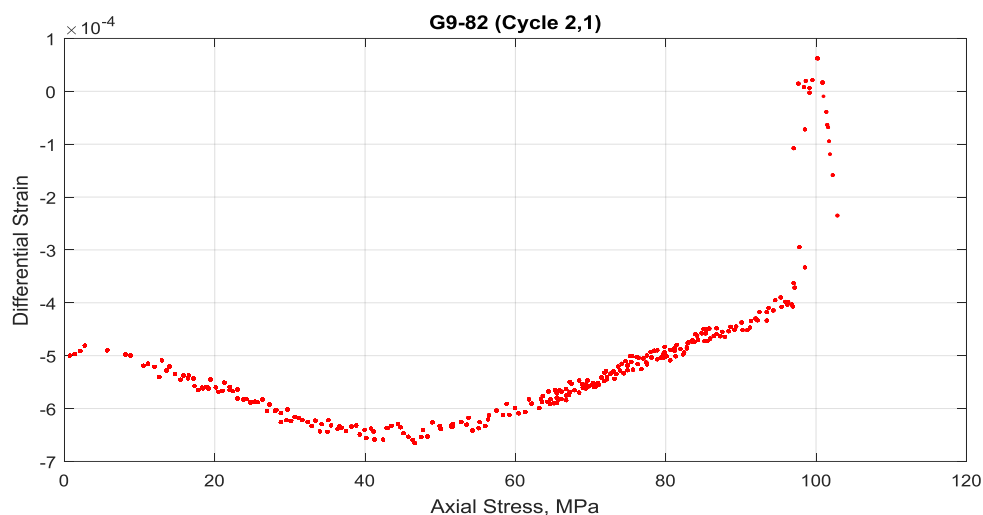
است با فلش نشان داده شده است و نسبت مناسب برای آن ۰,۹۵۸۵ است. این مقدار نسبت به نتیجه بدست آمده برای چرخه‌های بارگذاری دوم و سوم، به مقدار پیش بارگذاری نزدیک‌تر است. این اتفاق ممکن است به خاطر این‌که تنش پیش بارگذاری به خوبی در حافظه سنگ ذخیره نشده، رخ داده است و باعث شده است که مقدار تخمین شده توسط روش DRA برای چرخه‌های بعدی کم‌تر از مقدار تخمین شده در چرخه‌های اول و دوم باشد. با توجه به توضیحات ارائه شده فوق، برای این میانگین دو مقدار تنش تخمین شده در هر یک از نمودار تنش-تفاضل کرنش برای چرخه‌های دوم و سوم و نمودار آن در چرخه اول و دوم برابر با که ۵۲,۷۲MPa است در نظر گرفته شده است. بنابراین نسبت مناسب در این حالت ۰,۹۲ خواهد بود.



شکل ۴-۲۵: نمودار تنش-تفاضل کرنش نمونه G_{۷-۶۰} برای اولین و دومین چرخه بارگذاری.

سطح چهارم (مقدار تنش پیش بارگذاری در ناحیه الاستیک منحنی تنش-کرنش محوری) بارگذاری با مقدار پیش بارگذاری ۸۰,۳۵MPa به مدت یک ساعت و مقدار بارگذاری چرخه‌ای ۱۰۱MPa بر روی نمونه G_{۹-۸۲} صورت گرفت. چون این نمونه در انتهای چرخه بارگذاری دوم گسیخته شد تنها برای اولین و دومین چرخه‌ی بارگذاری نمودار تنش-تفاضل کرنش برای آن رسم شد که در

شکل ۴-۲۶ نشان داده شده است. همان گونه که از نمودار مشخص است در ابتدا شیب گرادیان منفی است و پس از آن هیچ نقطه انحنایی به ویژه در محدوده نزدیک به تنش پیش بارگذاری رخ نداده است.

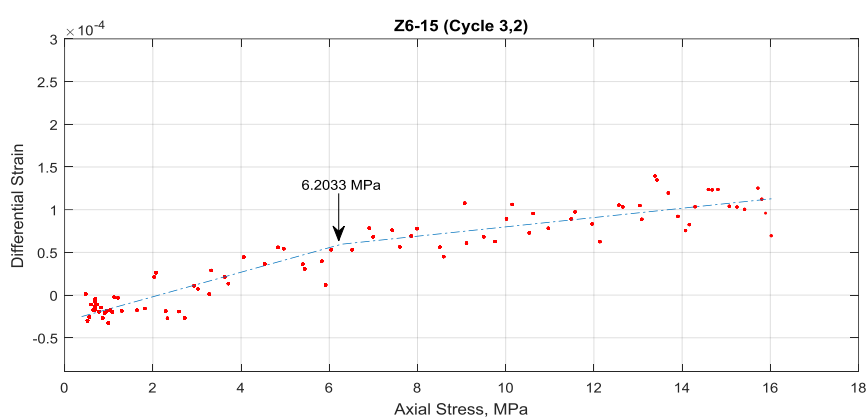


شکل ۴-۲۶: نمودار تنش-تفاضل کرنش نمونه G9-82 برای اولین و دومین چرخه بارگذاری.

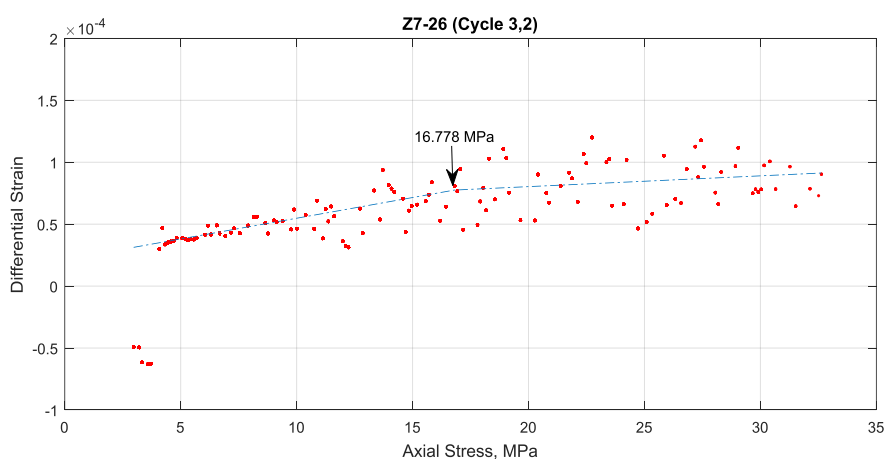
۴-۶-۲ نمونه‌های سنگ زیولیت

آزمایش DRA برای سنگ زیولیت به‌طور موفق بر روی نمونه‌های مغزه Z_6 (Z_{6-15} و Z_{6-53}) و Z_7 (Z_{7-26} و Z_{7-40}) انجام شد. سطح اول بارگذاری با مقدار پیش بارگذاری (که در منحنی تنش-کرنش محوری در ناحیه اول قرار می‌گیرد) ۷MPa به مدت یک ساعت و بارگذاری‌های چرخه‌ای به مقدار $15,54\text{MPa}$ بر روی نمونه Z_{6-15} صورت گرفت. شکل ۴-۲۷ نتیجه این آزمایش را برای چرخه‌های بارگذاری دوم و سوم نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودار مشخص است دامنه کرنش از مرتبه 10^{-4} است. نقطه انحنای نسبتاً واضحی در نمودار با فلش مشخص شده که در تنش نزدیک به مقدار پیش بارگذاری و حدود $6,2\text{MPa}$ اتفاق افتاده است. این نشان می‌دهد که این مقدار تنش پیش بارگذاری در ناحیه اول (بسته شدن ترک) برای سنگ زیولیت با نسبت مناسب حدود $0,88$ بازیابی شده است. بر روی نمونه Z_{7-26} آزمایش سطح دوم بارگذاری (با مقدار تنش واقع در ناحیه دوم یا الاستیک منحنی تنش-کرنش محوری) با تنش پیش بارگذاری $18,5\text{MPa}$ به مدت حدود $1,5$ ساعت تحت آن اعمال

و سپس بارگذاری‌های چرخه‌ای 32MPa روی آن انجام شد. نمودار تنش-تفاضل کرنش برای این آزمایش در شکل ۴-۲۸ نشان داده شده است. چنانچه که از نمودار مشاهده می‌شود در تنش حدود $16,77\text{MPa}$ نقطه انحنای واضحی مشاهده شده است، که مقدار آن به مقدار تنش پیش بارگذاری نزدیک است. برای این آزمایش تنش بازبایی شده برای مقدار تنش در سطح پیش بارگذاری دوم دارای نسبت مناسبت حدود $0,90$ است.



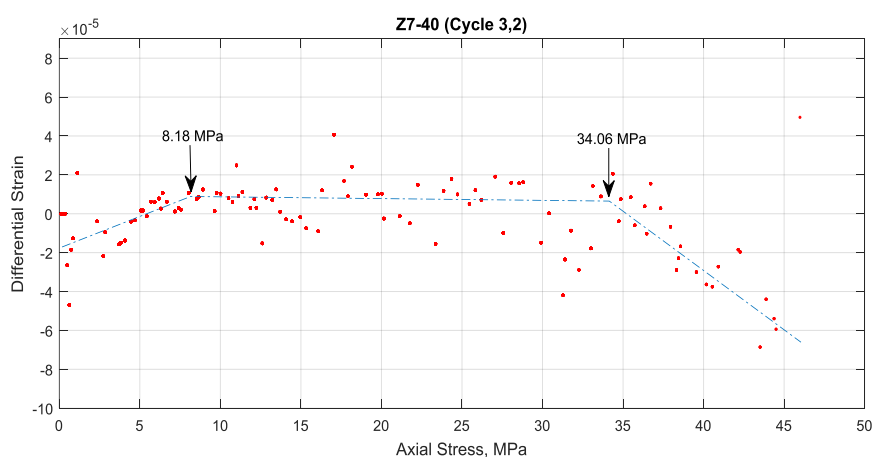
شکل ۴-۲۷: منحنی تنش-تفاضل کرنش نمونه $Z6-15$ برای دومین و سومین چرخه بارگذاری.



شکل ۴-۲۸: منحنی تنش-تفاضل کرنش نمونه $Z7-26$ برای دومین و سومین چرخه بارگذاری.

شکل ۴-۲۹ نمودار تنش-تفاضل کرنش نمونه $Z7-40$ برای دومین و سومین چرخه‌ی بارگذاری برای سطح بارگذاری چهارم که مقدار تنش پیش بارگذاری آن در ناحیه الاستیک قرار می‌گیرد، را نشان

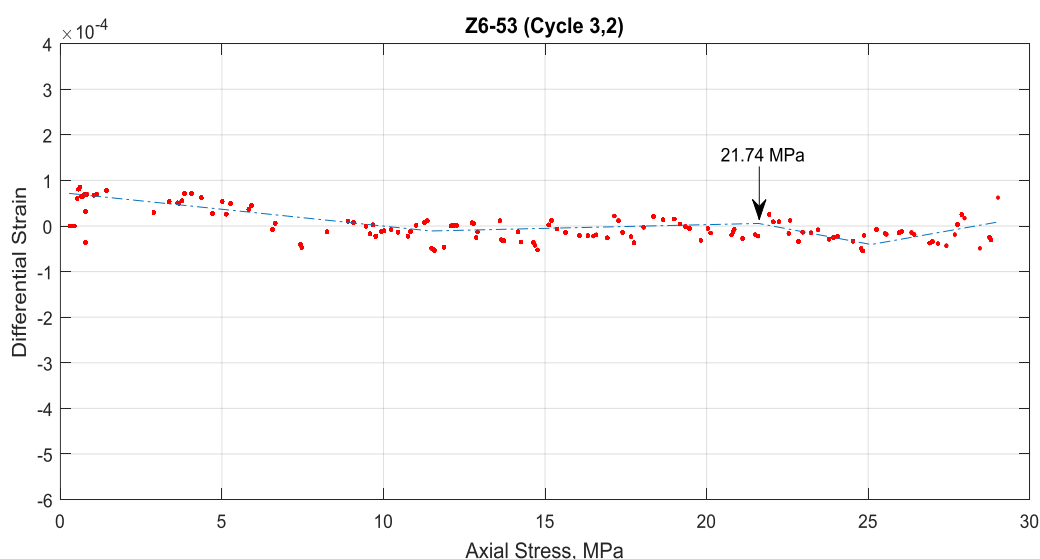
می‌دهد. تنش پیش بارگذاری $35,8\text{MPa}$ به مدت یک ساعت بر روی آن اعمال شد و پس از آن تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای $49,5\text{MPa}$ قرار گرفت. چنانچه که از این منحنی مشخص شده دو نقطه انحنای است که به ترتیب در دو مقدار $8,18\text{MPa}$ و 34MPa مشاهده شده است که با دو فلش روی نمودار نشان داده شده است. در ابتدا شیب نمودار مثبت است و این نشان می‌دهد که مقادیر کرنش در بارگذاری دوم از مقادیر آن در بارگذاری سوم بیش‌تر بوده و تا نقطه‌ای نزدیک به تنش $8,18\text{MPa}$ این روند ادامه داشته است. پس از آن، شیب نمودار دارای تغییر خاصی نبوده تا این که در نقطه‌ای نزدیک به تنش پیش بارگذاری به طور مجدد شیب آن تغییر می‌کند طوری که این بار شیب آن منفی شده است. بنابراین نقطه انحنای واضحی برای مقدار تنش پیش بارگذاری در ناحیه الاستیک رخ داده است. نقطه انحنای اول، احتمالاً به دلیل آسیب‌هایی که در نمونه وجود داشته رخ داده است. این آسیب‌ها ممکن است که ترک‌های ریز از پیش موجود در نمونه باشند یا این که در طی حمل نمونه و همچنین در طی بارگذاری‌ها اتفاق افتاده باشند. با توجه به این توضیحات مقدار تنش در نقطه انحنای اول در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین مقدار تنش تخمین شده برای این نمونه 34MPa و نسبت مناسب آن حدود $0,95$ محاسبه شده است.



شکل ۴-۲۹: منحنی تنش-تفاضل کرنش نمونه Z۷-۴۰ برای دومین و سومین چرخه بارگذاری.

سطح بارگذاری سوم که در منحنی تنش- کرنش محوری تنش پیش بارگذاری آن در ناحیه دوم الاستیک قرار می‌گیرد، بر روی نمونه Z_{۶-۵۳} انجام شد که تحت تنش پیش بارگذاری ۲۲,۸۸MPa به مدت ۶۰ دقیقه و بارگذاری‌های چرخه‌ای ۲۹MPa قرار گرفت. شکل ۴-۳۰ نمودار تنش محوری-تفاضل کرنش برای دومین و سومین چرخه‌ی بارگذاری برای این نمونه را نشان می‌دهد. دامنه کرنش کاهش یافته در این نمودار از مرتبه ۱۰^{-۴} است.

چنانچه که مشخص است نقطه انحنای با وضوح نسبتاً کمی در نقطه‌ای به مقدار تنش حدود ۲۱,۷۴MPa اتفاق افتاده است که توسط فلش در نمودار نشان داده شده است. بدین ترتیب، مقدار تنش بازیابی شده برای آن با مقدار نسبت مناسب حدود ۰,۹۵ صورت گرفته است.

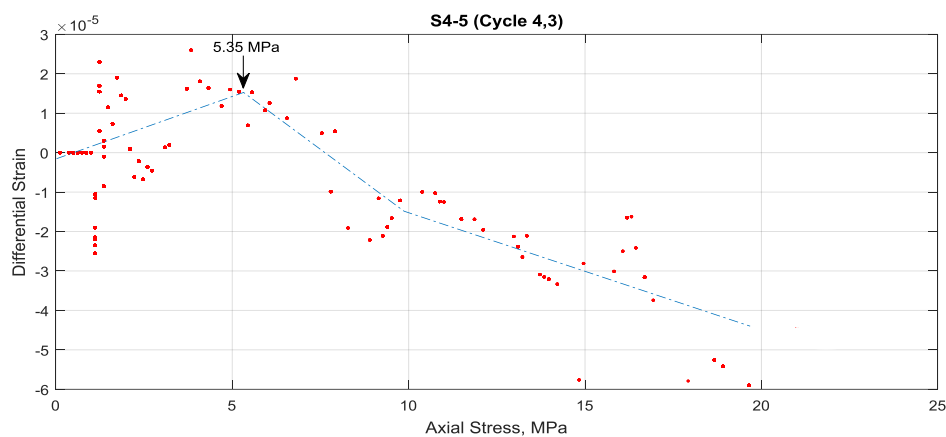


شکل ۴-۳۰: منحنی تنش-تفاضل کرنش نمونه Z_{۶-۵۳} برای دومین و سومین چرخه بارگذاری.

۴-۶-۳ نمونه‌های سنگ ماسه‌سنگ

برای سنگ ماسه‌سنگ، آزمایش DRA بر روی نمونه‌های S_۴ (S_{۴-۵}) و S_۲ (S_{۲-۲۳}، S_{۲-۳۴} و S_{۲-۴۵}) انجام شد. شکل ۴-۳۱ نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط به نمونه S_{۴-۵} که تحت تنش پیش بارگذاری ۶,۱۸MPa به مدت یک ساعت و بارگذاری‌های چرخه‌ای ۱۷,۳MPa قرار گرفت، برای سومین و

چهارمین چرخه بارگذاری را نشان می‌دهد. در منحنی تنش- کرنش محوری برای این سنگ، مقدار تنش پیش بارگذاری آن در ناحیه اول قرار گرفته است. چنانچه مشخص است دامنه کرنش از مرتبه 10^{-5} بوده و نقطه انحنای واضحی برای مقدار تنش پیش بارگذاری در این ناحیه و در تنش حدود $5,35\text{MPa}$ رخ داده است. بنابراین نسبت مناسب برای این حالت $0,86$ خواهد بود.

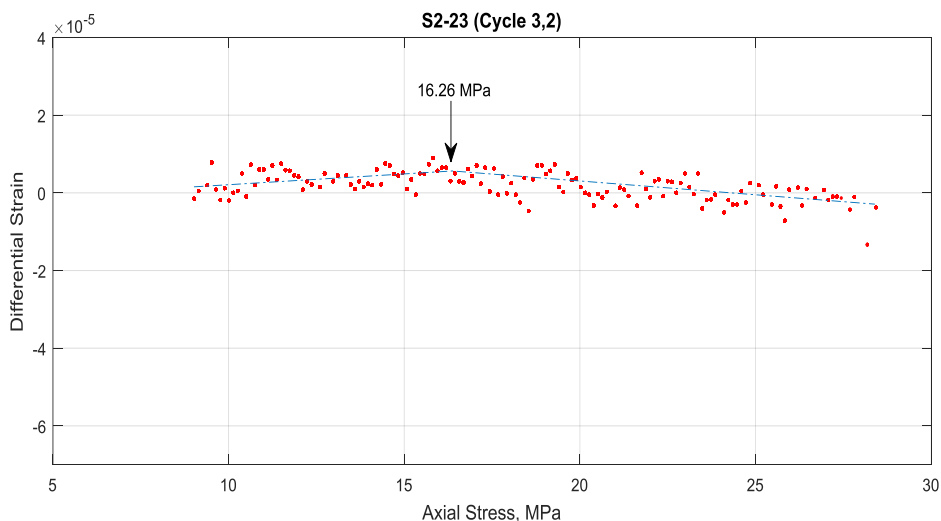


شکل ۴-۳۱: نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط سومین و چهارمین چرخه بارگذاری نمونه S_{۴-۵}.

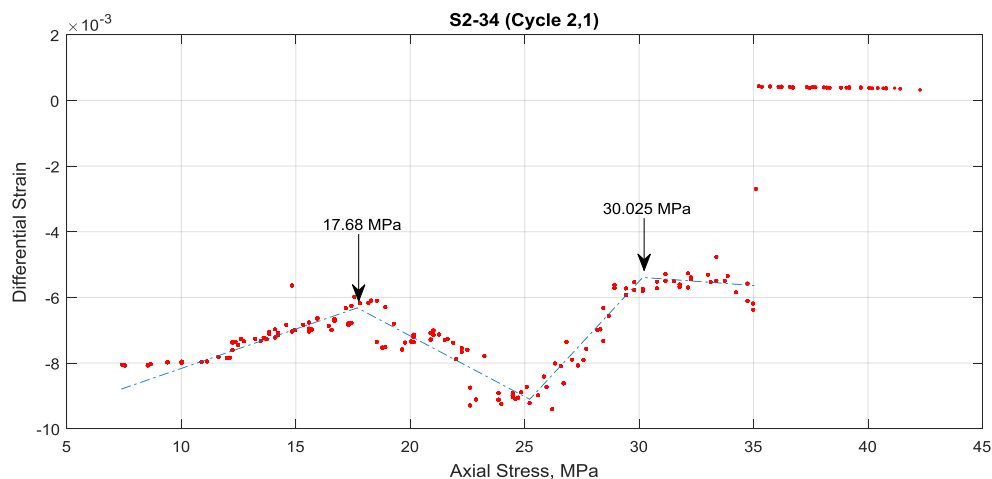
سطح دوم بارگذاری برای این نوع سنگ، بر روی نمونه S_{۲-۲۳} که تحت پیش بارگذاری $17,5\text{MPa}$ به مدت $1,5$ ساعت و بارگذاری‌های چرخه‌ای 28MPa قرار گرفت، انجام شد. مقدار تنش پیش بارگذاری برای این حالت در منحنی تنش-کرنش محوری در ناحیه الاستیک قرار دارد. شکل ۴-۳۲ نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط به این آزمایش را برای دومین و سومین چرخه بارگذاری نشان می‌دهد. برای مقدار تنش پیش بارگذاری در این ناحیه، منحنی تنش-تفاضل کرنش نقطه انحنای با وضوح به نسبت پایین‌تر نسبت به حالت قبل برای این نوع سنگ رخ داده است؛ با این وجود، مقدار تنش در این نقطه توسط روش DRA حدود $16,26\text{MPa}$ برآورد شده است و بنابراین نسبت مناسب حدود $0,93$ خواهد بود.

سطح سوم بارگذاری بر روی همان نمونه تحت پیش بارگذاری $31,5\text{MPa}$ به مدت حدود 135 دقیقه و بارگذاری‌های چرخه‌ای 42MPa صورت گرفت. مقدار تنش پیش بارگذاری برای این حالت نیز در منحنی تنش-کرنش محوری در ناحیه الاستیک قرار دارد. نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط به این

آزمایش برای هر یک از اولین و دومین و برای سومین چرخه بارگذاری رسم شده است. شکل ۳۳-۴ نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط به این آزمایش را برای اولین و دومین چرخه بارگذاری نشان می‌دهد. دامنه کرنش در این نمودار از مرتبه 10^{-3} است این نشان می‌دهد که دامنه تغییرات کرنش زیاد است. مهم‌ترین اتفاقی که در این نمودار افتاده این است که نقطه انحنا در دو نقطه از منحنی تنش محوری-تفاضل کرنش رخ داده است. نقطه اول در تنش محوری حدود $17,68\text{MPa}$ (نزدیک به مقدار پیش بارگذاری در سطح بارگذاری دوم) و نقطه دوم در تنش محوری حدود $30,02\text{MPa}$ (نزدیک به تنش پیش بارگذاری در سطح بارگذاری سوم) اتفاق افتاده است. این نشان می‌دهد که سنگ حافظه تنش را حتی برای سطح پیش بارگذاری‌هایی که قبلاً تجربه کرده است (احتمالاً پیش بارگذاری در سطح بارگذاری $17,5\text{MPa}$ روی همین نمونه) حفظ کرده، اگرچه، مقدار تخمین زده شده در نمودار ۳۲-۳ کمی بیش‌تر از آن است.



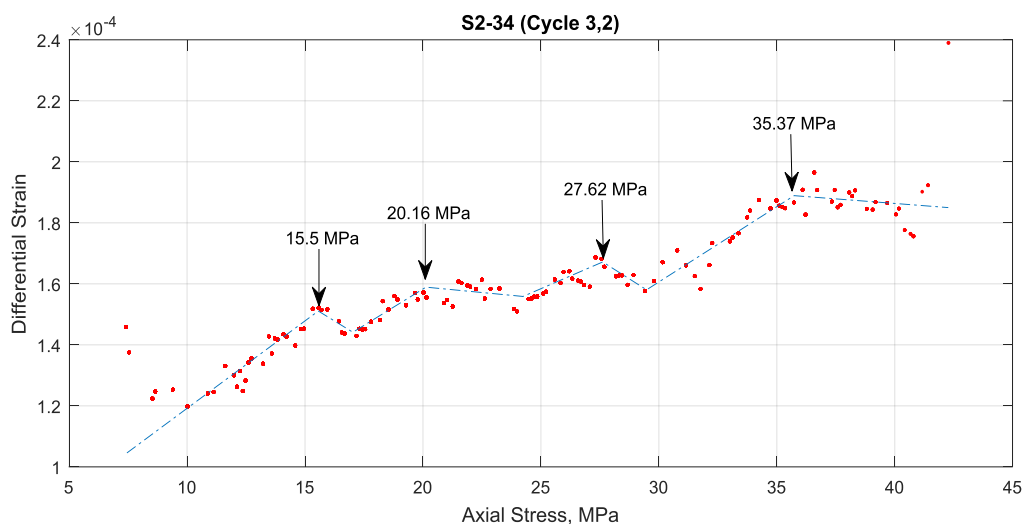
شکل ۳۲-۴: نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط دومین و سومین چرخه بارگذاری نمونه S_{۲-۲۳}.



شکل ۴-۳۳: نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط اولین و دومین چرخه بارگذاری نمونه S_{۲-۳۴}.

شکل ۴-۳۴ نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط به این آزمایش را برای دومین و سومین چرخه بارگذاری نشان می‌دهد. دامنه کرنش در این نمودار از مرتبه 10^{-4} است که نشان می‌دهد نسبت به نمودار بدست آمده از اولین و دومین چرخه بارگذاری در شکل ۴-۳۳، دامنه تغییرات کرنش کاهش یافته است. همان‌طور که در نمودار مشخص است نقطه‌ی انحنای در این نمودار در چهار نقطه به ترتیب در تنش‌های محوری $15,5 \text{ MPa}$ ، $20,16 \text{ MPa}$ ، $27,62 \text{ MPa}$ و $35,37 \text{ MPa}$ نمایان شده است. این نقاط انحنای احتمالاً در نمودار ارایه شده در شکل ۴-۳۳ نیز وجود داشته‌اند اما چون دامنه تغییرات کرنش در آن نمودار بزرگ‌تر بوده این نقاط در نمودار مشاهده نشده‌اند. در نتیجه باعث شده که نمودارها از حالت واقعی خود ملایم‌تر شده و دو نقطه انحنای یاد شده در این نمودار اتفاق افتاده است. با این حال آنچه که مشخص است این است که نمونه مغزه سنگ دو مقدار پیش بارگذاری اعمال شده بر آن ($17,5 \text{ MPa}$ و $31,5 \text{ MPa}$) را در حافظه خود نگه داشته است (مقادیرهای $15,5$ و $27,62 \text{ MPa}$). به علاوه، دو نقطه انحنای دیگر ($20,16$ و $35,37 \text{ MPa}$) نیز ممکن است به دو دلیلی که برای نمونه G_7 توضیح داده شد اتفاق افتاده باشد. با این وجود این نمودارها نشان می‌دهند که سنگ مقادیر تنش‌هایی که در دوره‌های مختلف تجربه کرده را حفظ کرده است. برای این آزمایش در سطح پیش بارگذاری

گفته شده در ناحیه الاستیک، مقدار $27,62 \text{ MPa}$ به عنوان مقدار تنش تخمین شده توسط روش DRA در نظر گرفته شده و نسبت مناسبت نیز حدود $0,87$ است.

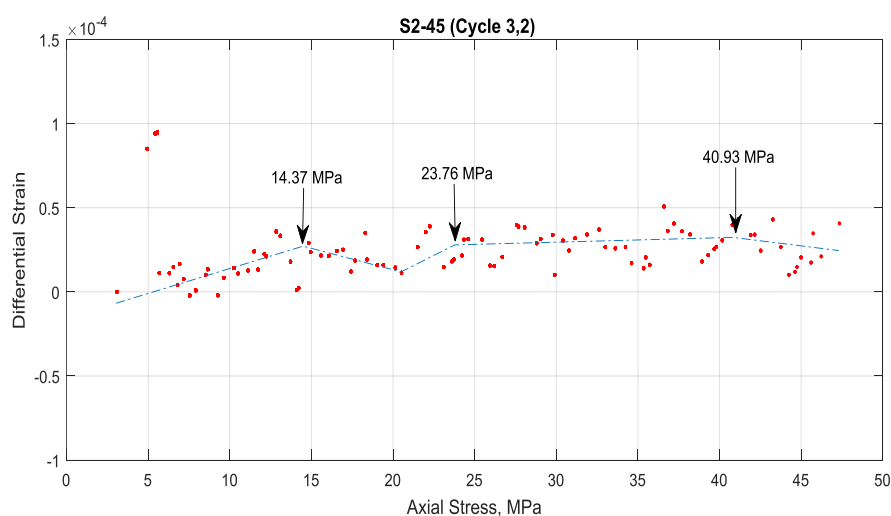


شکل ۴-۳۴: نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط دومین و سومین چرخه بارگذاری نمونه S_{۲-۳۴}.

دامنه کرنش در این نمودار از مرتبه 10^{-4} است که نشان می‌دهد نسبت به نمودار بدست آمده از اولین و دومین چرخه بارگذاری در شکل ۴-۳۴، دامنه تغییرات کرنش کاهش یافته است. همان‌طور که در نمودار مشخص است نقطه‌ی انحنای در این نمودار در چهار نقطه به ترتیب در تنش‌های محوری $15,5 \text{ MPa}$ ، $20,16 \text{ MPa}$ ، $27,62 \text{ MPa}$ و $35,37 \text{ MPa}$ نمایان شده است. این نقاط انحنای احتمالی در نمودار ارایه شده در شکل ۴-۳۳ نیز وجود داشته‌اند اما چون دامنه تغییرات کرنش در آن نمودار بزرگ‌تر بوده این نقاط در نمودار مشاهده نشده‌اند. در نتیجه باعث شده که نمودارها از حالت واقعی خود ملایم‌تر شده و دو نقطه انحنای یاد شده در این نمودار اتفاق افتاده است. با این حال آنچه که مشخص است این است که نمونه مغزه سنگ دو مقدار پیش بارگذاری اعمال شده بر آن ($17,5 \text{ MPa}$ و $31,5 \text{ MPa}$) را در حافظه خود نگه داشته است (مقدارهای $15,5$ و $27,62 \text{ MPa}$). به علاوه، دو نقطه انحنای دیگر ($20,16$ و $35,37 \text{ MPa}$) نیز ممکن است به دو دلیلی که برای نمونه G_{۷-۶} توضیح داده شد اتفاق افتاده باشد. با این وجود این نمودارها نشان می‌دهند که سنگ مقادیر تنش‌هایی که در دوره‌های مختلف تجربه

کرده را حفظ کرده است. برای این آزمایش در سطح پیش بارگذاری گفته شده در ناحیه الاستیک، مقدار $27,62 \text{ MPa}$ به عنوان مقدار تنش تخمین شده توسط روش DRA در نظر گرفته شده و نسبت مناسب نیز حدود $0,87$ است.

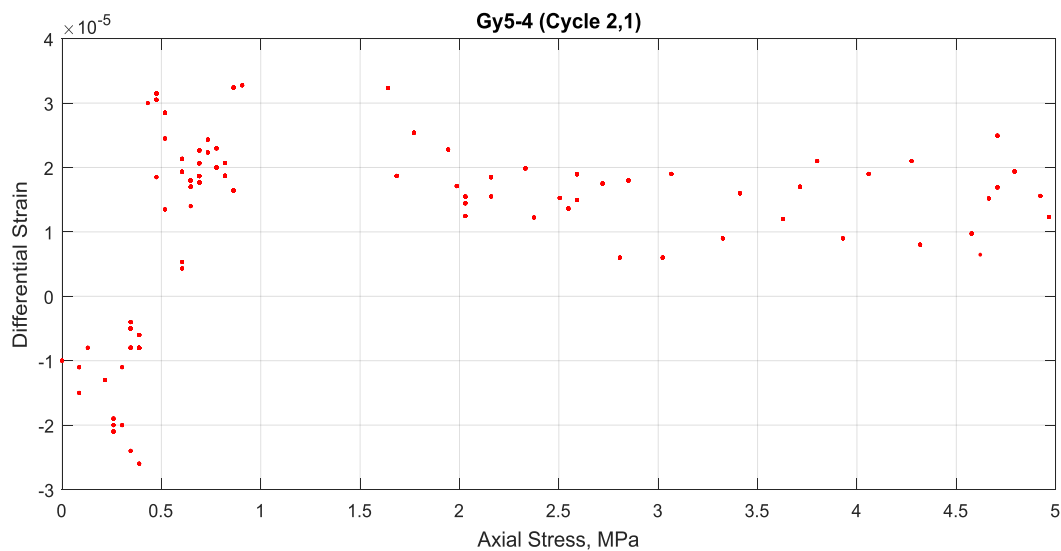
شکل ۴-۳۵ نمودار تنش-تفاضل کرنش نمونه S_{2-45} را برای دومین و سومین چرخه بارگذاری را نشان می‌دهد. این سطح بارگذاری شامل پیش بارگذاری $45,5 \text{ MPa}$ (که در منحنی تنش محوری-کرنش محوری در ناحیه الاستیک قرار می‌گیرد) به مدت حدود یک ساعت و بارگذاری‌های چرخه‌های حدود 50 MPa است. دامنه کرنش از مرتبه 10^{-4} است. نقطه انحنای در نمودار فوق در سه نقطه مشاهده شده است. مقدار تنش $40,93 \text{ MPa}$ مقدار تنش تخمین شده برای این مرحله است که با وضوح کمتری نسبت به دو نقطه انحنای دیگر در نمودار مشخص شده است. دو نقطه انحنای در تنش‌های $14,37$ و $23,76 \text{ MPa}$ ممکن است حاصل اثر مقادیر تنش پیش بارگذاری شده در طی دو سطح قبلی روی این نمونه باشد که این هم احتمالاً می‌تواند دلیلی بر حافظه تنش سنگ باشد که سنگ قبلاً تحت آن بوده و آن را در حافظه خود ذخیره نموده است. بدین ترتیب تنش بازیابی شده برای مقدار پیش بارگذاری در ناحیه تسلیم حدود $40,93 \text{ MPa}$ است و نسبت مناسب نیز حدود $0,90$ خواهد بود.



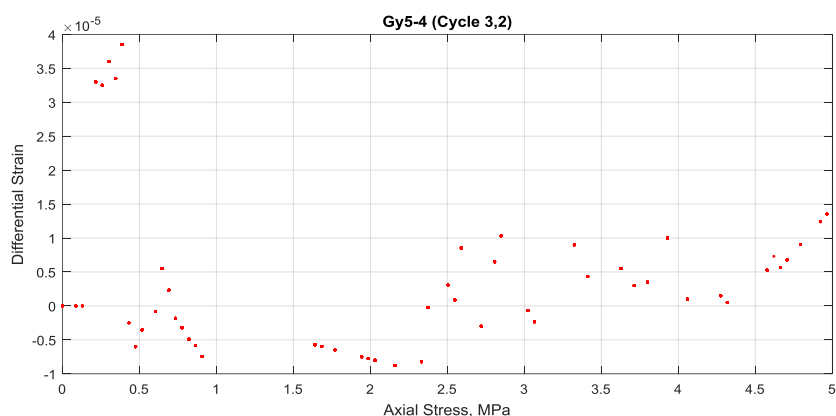
شکل ۴-۳۵: نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط دومین و سومین چرخه بارگذاری نمونه S_{2-45} .

۴-۶-۴ نمونه‌های سنگ گچ

آزمایش‌های DRA برای سنگ گچ بر روی نمونه‌های Gy_2 (Gy_{2-22} و Gy_{2-23}) و Gy_5 (Gy_{5-4}) و Gy_{5-15} انجام شدند. سطح ۱ بارگذاری با پیش بارگذاری $1,94\text{MPa}$ به مدت ۱,۵ ساعت و بارگذاری‌های چرخه‌ای به مقدار 5MPa بر روی نمونه Gy_{5-4} انجام شد که محدوده تنش پیش بارگذاری آن در نمودار تنش- کرنش محوری در ناحیه اول قرار می‌گیرد. شکل‌های ۴-۳۶ و ۴-۳۷ نتیجه آزمایش DRA این نمونه را به ترتیب برای اولین و دومین و برای دومین و سومین چرخه بارگذاری نشان می‌دهند. همان‌طور که از نمودارها مشخص است در محدوده تنش پیش بارگذاری ($1-2\text{MPa}$) مقادیر داده‌ها به اندازه کافی نبوده و بنابراین نمی‌توان از نتایج ارایه شده برای این مورد در این سطح بارگذاری استفاده کرد؛ اگرچه نقطه انحنا می‌توانست در تنش نزدیک به تنش پیش بارگذاری برای منحنی تنش-تفاضل کرنش مربوط به اولین و دومین و همچنین دومین و سومین چرخه بارگذاری مشاهده شود.

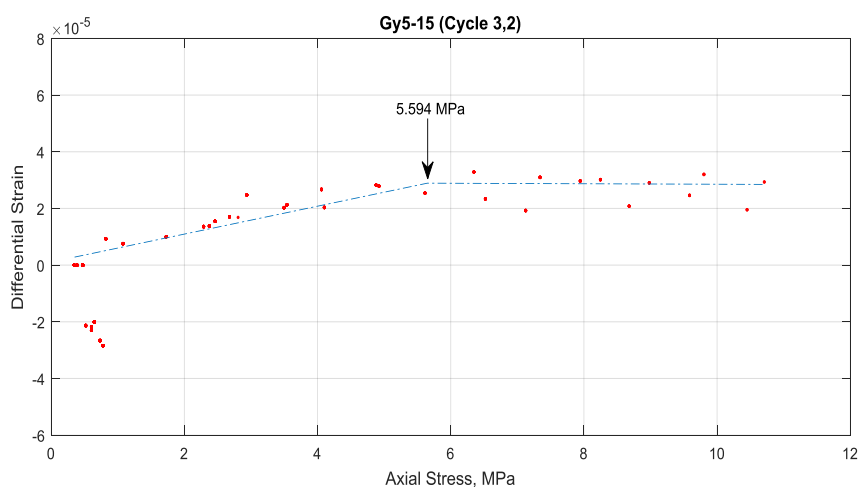


شکل ۴-۳۶: نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط اولین و دومین چرخه بارگذاری نمونه Gy_{5-4} .



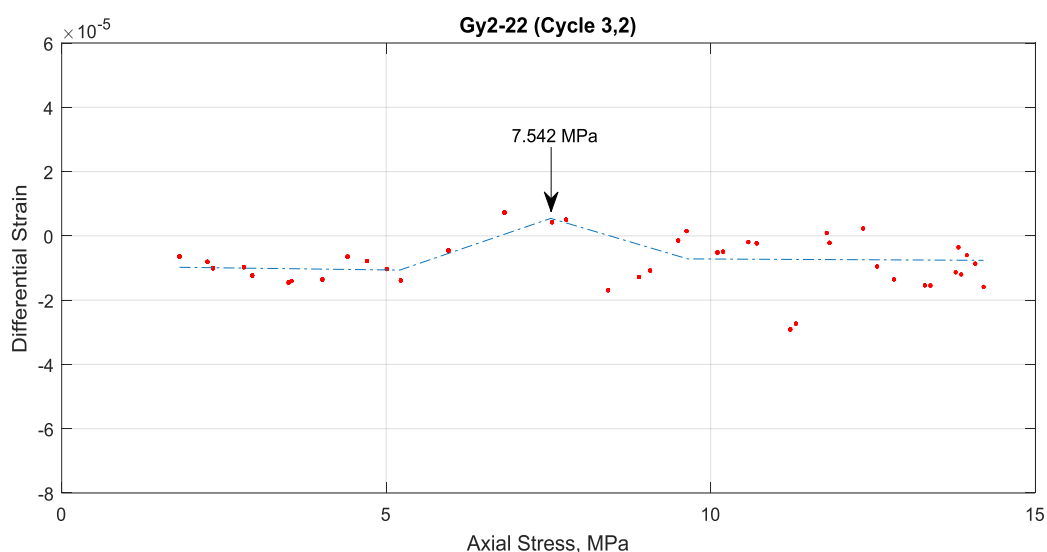
شکل ۴-۳۷: نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط دومین و سومین چرخه بارگذاری نمونه Gy_{۵-۴}.

سطح دوم بارگذاری هم بر روی همان نمونه (محدوده تنش پیش بارگذاری برای این نمونه نیز با توجه به نمودار تنش-کرنش محوری، در ناحیه اول قرار گرفته است) تحت تنش پیش بارگذاری حدود ۶,۵MPa به مدت یک ساعت قرار گرفت. بارگذاری‌های چرخه‌ای ۱۱MPa بر روی آن اعمال شدند. شکل ۴-۳۸ نمودار تنش-تفاضل کرنش نمونه Gy_{۵-۱۵} را برای دومین و سومین چرخه بارگذاری را نشان می‌دهد. چنانچه که از شکل ۴-۳۸ مشاهده می‌شود نقطه انحنای نسبتاً واضحی در تنش حدود ۵,۵۹۴MPa مشاهده شده است. بنابراین تنش پیش بارگذاری در ناحیه اول با نسبت مناسب حدود ۰,۸۶ بازیابی شده است.

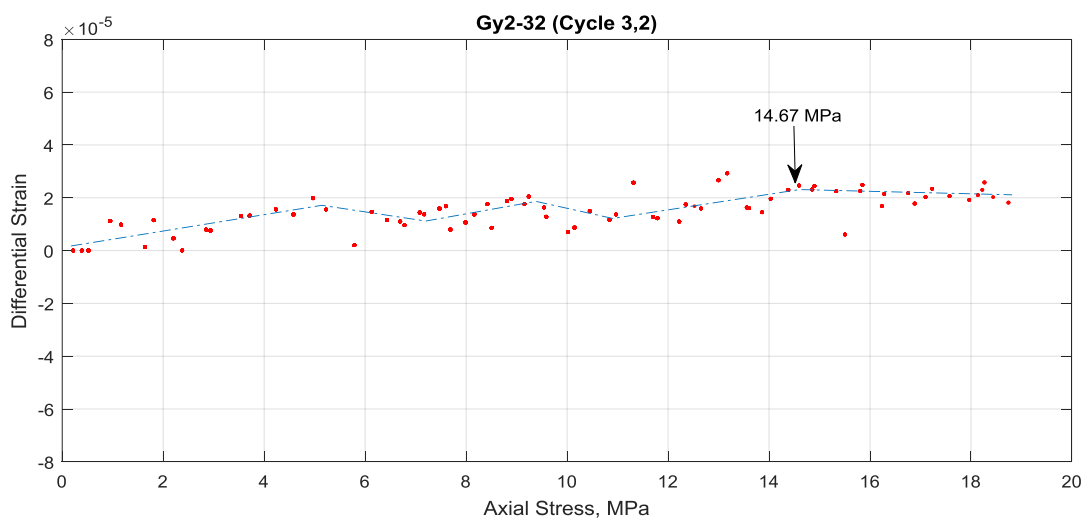


شکل ۴-۳۸: نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط دومین و سومین چرخه بارگذاری نمونه Gy_{۵-۱۵}.

بارگذاری‌های سطح دوم و سوم بر روی نمونه Gy_{۲-۲۲} و نمونه Gy_{۲-۲۳} به ترتیب تحت پیش بارگذاری‌های ۸,۶۳ و ۱۵,۵MPa هر یک به مدت دو و یک ساعت اعمال شدند. شکل‌های ۴-۳۹ و ۴-۴۰ منحنی‌های تنش-تفاضل کرنش برای دومین و سومین چرخه بارگذاری را نشان می‌دهند. تنش‌های پیش بارگذاری با توجه به نمودار تنش-کرنش محوری برای سطوح پیش بارگذاری سوم و چهارم به ترتیب در ناحیه‌های الاستیک و پلاستیک قرار می‌گیرند.



شکل ۴-۳۹: نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط دومین و سومین چرخه بارگذاری نمونه Gy_{۲-۲۲}.



شکل ۴-۴۰: نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط دومین و سومین چرخه بارگذاری نمونه Gy_{۲-۲۲}.

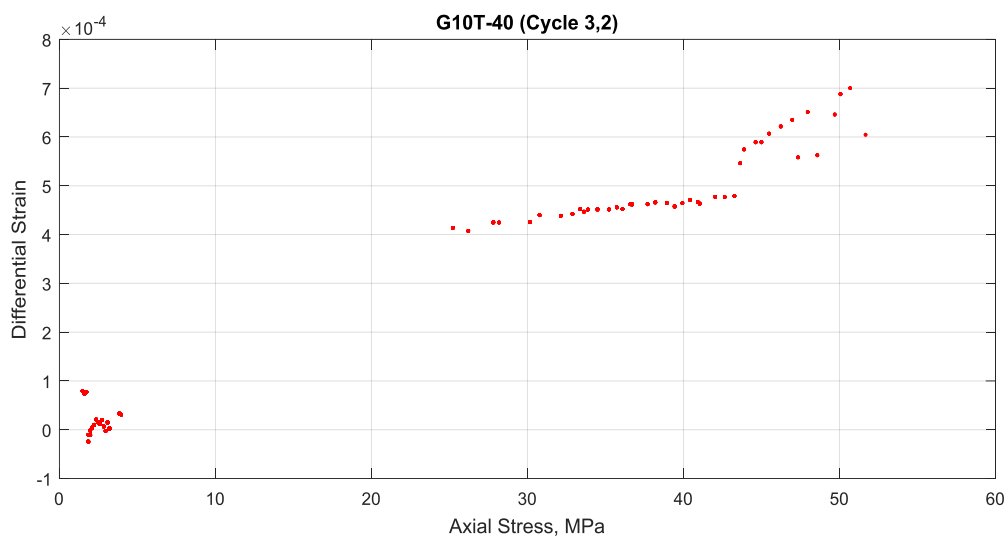
همان طور که مشخص است دامنه کرنش هریک از نمودارها از مرتبه 10^{-5} است. به ترتیب تنش تخمین شده و نسبت مناسبت برای آزمایش Gy_{2-22} ، $7,54MPa$ و $0,87$ و برای نمونه Gy_{2-23} ، $14,67MPa$ و $0,81$ است. این نشان می‌دهد که بازیابی تنش برای مقدار تنش پیش بارگذاری در ناحیه دوم بهتر صورت گرفته است. نقاط انحنای دیگر در شکل ۴-۴۰ را می‌توان با توضیح مشابهی که برای نمونه آزمایش G_{7-6} گفته شد، توجیه نمود.

۴-۶-۵ آزمایش DRA بر روی نمونه‌ها با زمان تاخیر

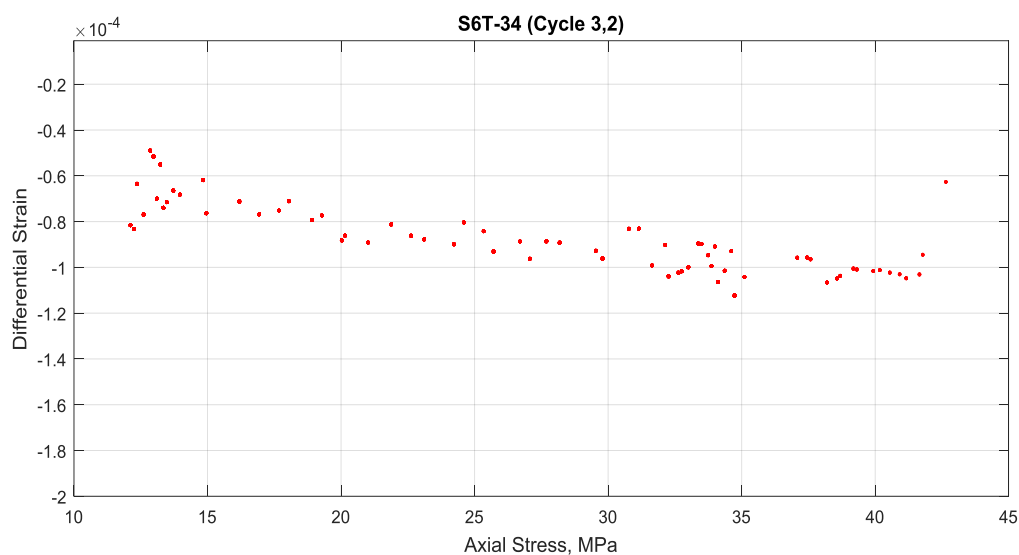
بر روی دو نمونه مغزه سنگ گرانیت ($G_{10.T-34}$) و سنگ ماسه‌سنگ (S_{6T-34}) آزمایش DRA با در نظر گرفتن زمان تاخیر (زمان بین پیش بارگذاری و انجام آزمایش بارگذاری‌های چرخه‌ای برای تخمین تنش پیشین) انجام شد. جزییات مقادیر پیش بارگذاری بارگذاری‌های چرخه‌ای و همچنین مدت زمان پیش بارگذاری و زمان تاخیر بین زمان پیش بارگذاری و انجام آزمایش DRA در جدول ۴-۸ ارایه شده است. مقدار تنش پیش بارگذاری هر دو در ناحیه الاستیک قرار دارد. شکل‌های ۴-۴۱ و ۴-۴۲ به ترتیب نمودار تنش-تفاضل کرنش نمونه‌های S_{6T-34} و $G_{10.T-34}$ را برای دومین و سومین چرخه بارگذاری را نشان می‌دهند. برای شکل ۴-۴۱ به دلیل این که مقادیر تنش و تفاضل کرنش در محدوده نزدیک به تنش پیش بارگذاری و کم‌تر از آن موجود نیست، متأسفانه بایستی نتیجه این آزمایش نادیده گرفته شود. اما چنانچه که از نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط به نمونه مغزه ماسه‌سنگ مشخص است در مقادیر تنش‌های نزدیک به تنش پیش بارگذاری هیچ گونه نقطه انحنایی نزدیک به مقدار تنش پیش بارگذاری رخ نداده است. بنابراین برای زمان تاخیر حدود ۶,۵ ساعت برای این نمونه مغزه با تنش پیش بارگذاری یاد شده، اثر کایزر مشاهده نشده است.

جدول ۴-۸: مشخصات بارگذاری‌های نمونه‌های آزمایش DRA با در نظر گرفتن زمان تاخیر.

نام نمونه	قطر مغزه (mm)	پیش بارگذاری (MPa)	بارگذاری چرخه‌ای (MPa)	تعداد چرخه بارگذاری	مدت زمان پیش بارگذاری (h)	مدت زمان تاخیر (Min)
G ₁₀ T-۳۴	۳۲	۳۱,۵	۴۹	۴	۱۲,۵	۳۹۰
S ₆ T-۳۴	۳۲	۳۱,۵	۴۲	۴	۱۲,۵	۳۸۰



شکل ۴-۴۱: منحنی تنش-تفاضل کرنش مربوط دومین و سومین چرخه بارگذاری نمونه G₁₀T-۳۴.



شکل ۴-۴۲: نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط دومین و سومین چرخه بارگذاری نمونه S₆T-۳۴.

۷-۴ تجزیه و تحلیل نتایج

به منظور دستیابی به اهداف پژوهش، نمونه‌های مغزه سنگ از سنگ‌های ماسه‌سنگ، گرانیت، گچ، زیولیت و آهک تهیه شد. نتایج این آزمایش‌های صورت گرفته به طور خلاصه در جدول ۹-۴ گردآوری شده است.

جدول ۹-۴: نتایج آزمایش DRA بر روی نمونه‌های مغزه هر یک از سنگ‌ها.

نسبت مناسب	مقدار تخمین شده توسط DRA (MPa)	مقدار پیش بارگذاری (MPa)	سطح بارگذاری	نام نمونه	نوع سنگ
۰,۹۷	۱۰,۲	۱۰,۵	۱	G _{۷-۲۰}	گرانیت
۰,۸۴	۲۶,۵	۳۱,۵	۲	G _{۲-۲۰}	
۰,۹۲	۵۲,۷۲	۵۶,۷	۳	G _{۷-۶۰}	
-	-	۸۰,۳۵	۴	G _{۹-۸۲}	
۰,۸۸	۶,۲	۷	۱	Z _{۶-۱۵}	زیولیت
۰,۹۰	۱۶,۷۷	۱۸,۵	۲	Z _{۷-۲۶}	
۰,۹۵	۲۱,۷۴	۲۲,۸۸	۳	Z _{۷-۴۰}	
۰,۹۵	۳۴	۳۵,۸	۴	Z _{۶-۵۳}	
۰,۸۶	۵,۳۵	۶,۱۸	۱	S _{۴-۵}	ماسه‌سنگ
۰,۹۳	۱۶,۲۶	۱۷,۵	۲	S _{۲-۲۳}	
۰,۸۷	۲۷,۶۲	۳۱,۵	۳	S _{۲-۳۴}	
۰,۹۰	۴۰,۹۳	۴۵,۵	۴	S _{۲-۴۵}	
-	-	۱,۹۴	۱	Gy _{۵-۴}	گچ
۰,۸۶	۵,۹۴	۶,۴۸	۲	Gy _{۵-۱۵}	
۰,۸۷	۷,۵۴	۸,۶۳	۳	Gy _{۲-۲۲}	
۰,۸۱	۱۴,۶۷	۱۵,۵	۴	Gy _{۲-۲۳}	

از نتایج ارایه شده فوق برای درک بهتر مقادیر بدست آمده از آزمایش DRA، نسبت مناسبت (FR) برای هر ناحیه و برای هر یک از سنگ‌ها در جدول ۴-۱۰ بصورت زیر گردآوری شده است.

جدول ۴-۱۰: مقادیر FR بدست آمده برای هر یک از سنگ‌ها در ناحیه‌های اول، دوم و سوم (برای سنگ گچ).

مقدار نسبت مناسبت در ناحیه سوم	مقدار نسبت مناسبت در ناحیه دوم			مقدار نسبت مناسبت در ناحیه اول	ناحیه
					نوع سنگ
-	-	۰,۹۲	۰,۸۴	۰,۹۷	گرانیت
-	۰,۹۵	۰,۹۵	۰,۹۰	۰,۸۸	زیولیت
-	۰,۹۰	۰,۸۷	۰,۹۳	۰,۸۶	ماسه سنگ
۰,۸۱	۰,۸۷			۰,۸۶	گچ

همان گونه که از منحنی‌های تنش- کرنش سنگ‌ها و دو جدول فوق مشاهده می‌شود، برای سنگ گرانیت در سطح بارگذاری ۱ که مقدار تنش آن در ناحیه بسته شدن ترک قرار گرفته است، تنش پیش بارگذاری تخمین شده توسط روش DRA، با خطای حدود ۳٪ بازیابی شده است. این در حالی است که دوسطح بارگذاری دوم و سوم که مقدارهای آنها در محدوده الاستیک قرار گرفته و تنش بازیابی شده توسط DRA برای آنها به ترتیب با خطای حدود ۱۶ و ۸٪ صورت گرفته است. سطح بارگذاری ۴ این سنگ که در ناحیه الاستیک قرار دارد اما با توجه به گسیخته شدن نمونه برای این مورد نتیجه‌ای برای این مرحله برای سنگ گرانیت وجود ندارد. این نتایج نشان می‌دهند که بیش‌ترین مقدار تنش پیش بارگذاری بازیابی شده برای این سنگ گرانیت در ناحیه بسته شدن ترک (نسبت مناسبت ۰,۹۷) و

کمترین مقدار تنش بازیابی شده (۰,۸۴) در ناحیه الاستیک برای این سنگ اتفاق افتاده است. برای سنگ زیولیت مقادیر بارگذاری‌ها در سطوح اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب در ناحیه‌های بسته شدن ترک و الاستیک منحنی تنش- کرنش محوری این نوع سنگ قرار گرفته‌اند. برای این سنگ مقدار تنش پیش بارگذاری در ناحیه الاستیک، با خطای حدود ۱۲٪ توسط روش DRA بازیابی شده است که این مقدار کمترین مقدار تنش پیش بارگذاری بازیابی شده برای این نوع سنگ است. برای سطوح پیش بارگذاری دوم تا چهارم که در ناحیه الاستیک منحنی تنش- کرنش محوری سنگ زیولیت قرار دارند، مقادیر بازیابی شده توسط روش یاد شده به ترتیب با خطاهای حدود ۱۰، ۵ و ۵٪ صورت گرفته است. بیشترین مقدار تنش پیش بارگذاری شده برای بارگذاری‌ها در سطوح سوم و چهارم است. این‌ها نشان می‌دهند که با افزایش مقادیر پیش بارگذاری و از ناحیه بسته شدن ترک تا ناحیه الاستیک مقدارهای بازیابی شده توسط روش DRA برای این سنگ با کاهش خطای بازیابی همراه بوده و پس از مقدار تنش پیش بارگذاری معینی تقریباً نسبت مناسبی برای این نوع سنگ ثابت مانده است. برای ماسه‌سنگ نیز مانند سنگ زیولیت سطح بارگذاری ۱ در ناحیه بسته شدن ترک و سطوح بارگذاری ۲، ۳ و ۴ در ناحیه منحنی تنش محوری- کرنش محوری ماسه‌سنگ قرار دارند. برای سطح بارگذاری ۱ مقدار تنش پیش بارگذاری بازیابی شده با خطای حدود ۱۴٪ همراه بوده است که کمترین مقدار بازیابی شده توسط روش DRA برای این سنگ است. مقادیر بازیابی شده برای سطح بارگذاری‌های ۲ و ۳ که هر دو در ناحیه الاستیک قرار دارند، به ترتیب با نسبت مناسب‌های ۰,۹۳ و ۰,۸۷ بازسازی تنش پیش بارگذاری انجام شده است که نشان می‌دهد برای سطح بارگذاری ۲ مقدار بازیابی شده بیش‌تر و بهتر صورت گرفته است و در واقع بیش‌ترین مقدار بازیابی شده برای این سنگ است. مقدار تخمین شده برای پیش بارگذاری در سطح بارگذاری ۴ با خطای حدود ۱۰٪ همراه بوده است. بنابراین مقدار تنش پیش بارگذاری بازیابی شده برای سطح بارگذاری ۱ و ۲، از ناحیه بسته شدن ترک به سمت ناحیه الاستیک افزایش و برای سطح بارگذاری ۳ به طور مجدد با کاهش همراه بوده است با این حال مقدار آن از مقدار بازیابی

شده برای ناحیه بسته شدن ترک بیش تر بوده است. پس از آن این مقدار بازیابی شده باری سطح بارگذاری پایانی، افزایش یافته است. به طور کلی می توان گفت که از ناحیه A تا B سطح مقدار بازیابی شده توسط روش DRA برای ماسه سنگ افزایش یافته است. برای سنگ گچ، مقادیر تنش های پیش بارگذاری سطوح ۱ تا ۳ به ترتیب در ناحیه های بسته شدن ترک، مرز ناحیه های بسته شدن ترک و الاستیک و در ناحیه پلاستیک قرار گرفته اند. برای مقدار تنش پیش بارگذاری سطح یک که سطح تنش کم بوده است، مقداری تخمین نشده است. برای سطح بارگذاری ۱ که در ناحیه اول منحنی تنش محوری- کرنش محوری قرار دارد، بازیابی تنش با خطای حدود ۱۴٪ توسط روش DRA انجام شده است که در این مرحله بارگذاری در بین سنگ ها، پس از گرانیب پایین ترین مقدار بازیابی شده را شامل شده است. برای سطح بارگذاری ۳ که مقدار آن در محدوده مرز بین ناحیه بسته شدن ترک و ناحیه الاستیک قرار گرفته است، تنش پیش بارگذاری با خطای حدود ۱۳٪ بازیابی شده است که نسبت به حالت قبل بیش تر است و در واقع بیش ترین مقدار بازیابی شده توسط روش DRA برای سنگ گچ است. برای سطح بارگذاری ۴ که در ناحیه تسلیم در منحنی تنش-کرنش محوری این سنگ واقع است، مقدار تنش پیش بارگذاری شده با خطای حدود ۱۹٪ بازیابی شده است که علاوه بر این که کم ترین مقدار بازیابی شده توسط روش DRA برای سنگ گچ است کم ترین مقدار بازیابی شده در بین کل نمونه ها و در بین همه ناحیه ها نیز محسوب می شود. بنابراین به طور کلی مقادیر تنش پیش بارگذاری از ناحیه اول (بسته شدن ترک) تا ناحیه سوم (پلاستیک) در ابتدا افزایش نسبی در مقدار بازیابی مشاهده شده و سپس کاهش زیادی در مقدار بازیابی شده توسط روش DRA برای این سنگ همراه بوده است. می توان کم ترین و بیش ترین مقدار تنش پیش بارگذاری بازیابی شده توسط روش DRA را برای دو ناحیه ی بسته شدن ترک و ناحیه ی الاستیک بصورت جدول ۴-۱۱ خلاصه کرد. چنانچه که از جدول مشاهده می شود، سنگ گچ و ماسه سنگ در ناحیه اول و در ناحیه دوم پس از گرانیب شامل ضعیف ترین مقدار تنش پیش بارگذاری بازیابی شده توسط روش DRA است. از سوی دیگر، سنگ گرانیب و زیولیت

به ترتیب در دو ناحیه اول و دوم بیشترین مقدار بازیابی شده در بین چهار نوع سنگ مورد آزمایش را شامل شده است. مقدار تنش بازیابی شده در ناحیه اول برای سنگ گرانیت که دارای بیشترین مقدار مدول الاستیک و پس از سنگ آهک دارای بیشترین سرعت عبور موج p و همچنین دارای کمترین نسبت پواسون است، به خوبی و نسبت به دیگر سنگ‌های مورد آزمایش بسیار بهتر بازیابی شده است. با توجه به مدول الاستیک و سرعت عبور موج p بالای سنگ گرانیت که نشان دهنده ساختار منسجم این سنگ است، این اتفاق ممکن است کرنش‌های غیرالاستیک که بیش‌تر (در واقع تنها) تحت تاثیر تنش پیش بارگذاری رخ داده است و بنابراین هنگام اعمال بارگذاری‌های چرخه‌ای همین کرنش‌ها در رابطه ۲-۳، باقی مانده و باعث شده در نمودار تنش-تفاضل کرنش انحنا در تنشی بسیار نزدیک به تنش پیشین مشاهده شود.

جدول ۴-۱۱: کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار تنش پیش بارگذاری شده در هر یک از ناحیه A و B.

مقدار تنش بازیابی شده توسط روش DRA	کیفیت و مقدار تنش بازیابی روش DRA متوسط	کیفیت و مقدار تنش بازیابی روش DRA خیلی خوب
ناحیه بسته شدن ترک	گچ و ماسه‌سنگ	گرانیت
ناحیه الاستیک	گرانیت	زیولیت

براساس نتایج فوق، با این‌که سنگ زیولیت دارای پایین‌ترین چگالی و سرعت عبور موج p و همچنین بیش‌ترین مقدار جذب آب در بین سنگ‌های دیگر در این پژوهش داشته، با این حال علاوه بر این‌که در ناحیه الاستیک بهترین بازیابی تنش پیش بارگذاری را داشته در حالت کلی بهترین بازیابی تنش برای این سنگ رخ داده است. ممکن است به علت ساختار یکپارچه و منسجم و البته الاستیک و شکننده این سنگ، آسیب‌های ناشی از پیش بارگذاری (کرنش‌های غیرالاستیک) در حافظه آن به خوبی

ذخیره شده و از این رو، بازیابی تنش برای آن بهتر صورت گرفته است. از سوی دیگر، سنگ گچ که دارای بیشترین تخلخل و کمترین چگالی پس از سنگ زیولیت است، ضعیفترین نتایج را در بازیابی تنش پیش بارگذاری در بین سنگها داشته است. این ممکن است که به دلیل رفتار شکل پذیر سنگ گچ باشد که باعث شده تغییر شکل های (کرنش های غیر الاستیک) زیاد در تنش های مختلف در آن اتفاق بیفتد و در نتیجه، سبب جابجا شدن نقطه انحنا در منحنی تنش-تفاضل کرنش گشته است. البته ماسه سنگ نیز در هر دو ناحیه اول (بسته شدن ترک) و دوم (الاستیک) نتیجه بازیابی تنش یکسانی با سنگ گچ داشته است. هر دوی این سنگها سرعت عبور موج p تقریبا کسانی داشته اند، اگرچه ویژگی های فیزیکی آنها متفاوت است. آنچه که مشخص است این است که دو سنگ شکننده زیولیت و گرانیت هرچند که خصوصیات ژئومکانیکی آنها از جمله سرعت عبور موج p ، چگالی، تخلخل و مدول الاستیک این دو سنگ بسیار متفاوت است اما در حالت کلی، بهترین نتیجه های بازیابی تنش پیش بارگذاری توسط روش یاد شده را داشته اند. در نقطه مقابل سنگ شکل پذیر گچ با مقادیر تنش های بازیابی شده پایین تر نسبت به دیگر نمونه های سنگها، ضعیفترین نتیجه در بین هر یک از چهار نوع سنگ یاد شده را داشته است. برای مقایسه کلی نتایج بدست آمده در هر یک از ناحیه ها، میانگین کلی مقادیر نسبت مناسبت های ارایه شده در جدول ۴-۹ محاسبه شدند. برای ناحیه های اول و دوم مقادیرهای متوسط کلی نسبت مناسبت ها به ترتیب برابر با ۰,۸۹۲ و ۰,۹۰۳ هستند. این نشان می دهد که مقادیر تنش های پیش بارگذاری بازیابی شده توسط روش DRA برای سنگها در ناحیه دوم بیش تر از مقدار آن در ناحیه اول بوده است. در واقع مقادیرهای بازیابی شده به طور کلی با سیر صعودی نسبی از ناحیه اول تا ناحیه دوم رخ داده است. از سوی دیگر، بهترین بازیابی تنش برای سنگ های گرانیت و زیولیت اتفاق افتاده است با این که خصوصیات ژئومکانیکی آنها از جمله سرعت عبور موج p ، چگالی و تخلخل که برای هر دو بسیار متفاوت است اما هر دو رفتار شکننده ای دارند. از طرف دیگر، سنگ شکل پذیر گچ

که پس از سنگ زیولیت دارای کمترین سرعت عبور موج، چگالی و هم‌چنین بیش‌ترین جذب است، ضعیف‌ترین نتیجه در بازیابی تنش پیشین را داشته است.

۸-۴ جمع‌بندی

همان‌طور که گفته شد، جهت انجام آزمایش DRA از بلوک‌های آماده شده از سنگ‌های مختلف گرانیت، گچ، زیولیت، آهک و ماسه‌سنگ نمونه‌های مغزه با دو قطر ۳۲ و ۵۴mm تهیه شدند. همه نمونه‌های مغزه ۳۲mm و برخی از نمونه‌های مغزه ۵۴mm برای آزمایش DRA تهیه شدند. برای انجام آزمایش‌های تعیین ویژگی‌های مکانیکی مغزه‌های با قطر ۵۴mm استفاده شدند که بر روی هر یک از آن نمونه‌ها یک عدد کرنش‌سنج (۶۰mm) در جهت محور طولی نمونه و یک کرنش‌سنج دیگر در جهت عمود بر آن برای رفتارنگاری تغییرات کرنش در تنش‌های اعمال شده، چسبانده شدند. مهم‌ترین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ از جمله چگالی، تخلخل، سرعت موج، نسبت پواسون و مدول الاستیسیته هر یک از سنگ‌ها بدست آورده شدند. پس از آن بر روی نمونه‌های مغزه تهیه شده جهت آزمایش DRA یک عدد کرنش‌سنج ۲۰mm در جهت طولی نمونه‌ها نصب شدند. سپس شیوه بارگذاری برای انجام آزمایش طراحی شده و چهار سطح بارگذاری مختلف برای هریک از نمونه‌های مغزه سنگ برنامه‌ریزی و آزمایش بر روی آن نمونه‌ها انجام شد. بعد از آن، نمودارهای تنش-تفاضل کرنش برای هریک از آزمایش‌ها ترسیم و تنش پیش بارگذاری بدین ترتیب توسط روش DRA تخمین شد. پس از آن نسبت مناسب برای هر یک از آزمایش‌های صورت گرفته نیز محاسبه شد. هم‌چنین در نهایت نتایج بدست آمده از آزمایش‌های DRA به طور خلاصه گردآوری و سپس تجزیه و تحلیل برای آنها صورت گرفت. براساس نتایج بدست آمده از آزمایش‌های تحلیل نرخ کرنش در سنگ‌های متفاوت که تحت سطوح تنش مختلف پیش بارگذاری شده‌اند می‌توان گفت که ارتباط منطقی و واضحی بین خواص فیزیکی سنگ و نتایج بازیابی تنش وجود ندارد. با این حال، وضوح نقطه انحنا در سنگ‌های گرانیت و ماسه‌سنگ و زیولیت بهتر از سنگ گچ بوده و هم‌چنین نسبت مناسب که بیانگر نسبت تنش تخمین

شده توسط روش DRA و تنش پیش بارگذاری است، برای این سنگ‌ها مقدار بیش‌تری بدست آمده است. بنابراین بازیابی تنش در نمونه سنگ‌های آزمایش شده که دارای رفتار و خواص متفاوت بوده‌اند توسط روش تحلیل نرخ تغییرشکل امکان‌پذیر است.

فصل پنجم:

"تجربہ گیری و پیشہ نادر"

هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی رفتار انواع سنگ‌ها در تخمین تنش پیشین (در اینجا تنش پیش بارگذاری) توسط روش تحلیل نرخ تغییرشکل که برپایه حافظه سنگ است و همچنین بررسی این رفتار در سطوح بارگذاری مختلف است. برای دستیابی به این اهداف، آزمایش‌های DRA بر روی مغزه‌های تهیه شده از سنگ‌های گرانیت، زیولیت، ماسه‌سنگ و سنگ گچ توسط دستگاه بارگذاری تراکم تک محوره انجام شده و سپس تنش‌های پیش بارگذاری توسط روش یاد شده تخمین شدند که نتایج آن در ادامه آورده شده است.

۲-۵ نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب ارائه شده در فصل‌های گذشته آزمایش‌های انجام شده نتایج زیر بدست آمده است.

- ✓ با توجه به آزمایش‌های انجام شده، نتایج نشان می‌دهند که اثر کایزر در همه سطوح بارگذاری تعریف شده برای و در سه ناحیه‌ی تعریف شده، برای هر یک از سنگ‌های گرانیت، زیولیت، ماسه‌سنگ و سنگ گچ مشاهده شده است.
- ✓ در هر یک از آزمایش‌های صورت گرفته بر روی نمونه‌ها، مقدار تنش تخمین شده توسط روش تحلیل نرخ تغییرشکل در یک نقطه انحنای که مقدر تنش در آن نقطه نزدیک به مقدار تنش در پیش بارگذاری بوده و دارای اخلاف کمی با آن است.
- ✓ با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که روش تحلیل نرخ تغییرشکل می‌تواند برای تخمین تنش‌های پیشین انواع سنگ‌ها (سنگ‌های سخت یا شکننده و سنگ‌های نرم یا شکل‌پذیر) مناسب باشد.

- ✓ بیش‌ترین خطای بازیابی تنش برای سنگ گچ (در ناحیه‌ی تسلیم، حدود ۱۹٪) روی داده است.
- از سوی دیگر، کم‌ترین آن (۳٪) برای ناحیه اول برای سنگ گرانیت و پس از آن با مقدار خطای یکسان ۵٪ در ناحیه الاستیک بوده که برای سنگ زیولیت اتفاق افتاده است.
- ✓ برای نمونه‌ی S_{۶T-۳۴} برای مقدار تنش پیش بارگذاری در ناحیه الاستیک برای زمان تاخیر حدود ۶٫۵ ساعت، در نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط به آن نقطه انحنا مشاهده نشده است.
- ✓ برای تعدادی از نمونه‌ها تعداد بیش از یک نقطه انحنا در نمودار تنش-تفاضل کرنش مربوط به هر کدام از آنها مشاهده شده که نشان می‌دهند سنگ تنش‌های پیشین مختلفی که تجربه کرده‌اند را در حافظه خود ذخیره می‌کنند. بنابراین، اگرچه با دقت پایین‌تر اما می‌توان آنها را بازیابی نمود.
- ✓ نتایج نشان می‌دهند که در هر سنگ رفتارهای متفاوتی در هر یک از ناحیه‌های بسته شدن ترک، الاستیک و ناحیه تسلیم (برای سنگ گچ) اتفاق می‌افتد.
- ✓ همچنین برای سنگ‌های مختلف مقادیر تنش‌های پیش بارگذاری بازیابی شده در سطوح مختلف پیش بارگذاری و در هر ناحیه متفاوت بوده است.
- ✓ نتایج نشان می‌دهند که نقطه انحنا در نمودار تنش-تفاضل کرنش برای سنگ گرانیت نسبت به سنگ‌های زیولیت و ماسه‌سنگ دارای وضوح پایین‌تری بوده است.
- ✓ برای سنگ گچ پایین‌ترین وضوح نقطه انحنا برای نمودار حاصل از تنش پیش بارگذاری مربوط به ناحیه تسلیم بوده است که ضعیف‌ترین بازیابی تنش نیز در آن سطح پیش بارگذاری رخ داده است.
- ✓ برای سنگ زیولیت واضح‌ترین نقطه انحنا برای سطح بارگذاری سوم (ناحیه الاستیک) بوده است و بیش‌ترین مقدار تنش بازیابی شده در این مرحله و همچنین برای سطح پیش بارگذاری چهارم (ناحیه الاستیک) اتفاق افتاده است.

- ✓ برای ماسه‌سنگ در هر یک از سطوح بارگذاری اول (ناحیه بسته شدن ترک) و ناحیه سوم (الاستیک) بهترین وضوح نقطه انحنا برای نمودارهای تنش-تفاضل کرنش این سنگ رخ داده است اگرچه پایین‌ترین سطح بازیابی تنش پیش بارگذاری نیز برای این سنگ در این دو ناحیه بوده است.
- ✓ به‌طور کلی برای تنش‌های بازیابی شده در ناحیه اول (بسته شدن ترک) و ناحیه دوم (الاستیک)، بهترین بازیابی تنش پیش بارگذاری توسط روش DRA به ترتیب برای سنگ گرانیت و سنگ زیولیت روی داده است اگرچه خصوصیات ژئومکانیک آنها مثل چگالی، تخلخل و سرعت عبور موج p متفاوت است اما شباهت آنها در شکننده بودن آنهاست.
- ✓ کم‌ترین مقدار تنش بازیابی شده در ناحیه اول برای سنگ‌های گچ و ماسه‌سنگ و در ناحیه دوم برای سنگ گرانیت اتفاق افتاده است دو سنگی که به غیر سرعت عبور موج، پارامترهای ژئومکانیک آنها متفاوت است.
- ✓ به‌طور کلی برای هر یک از سنگ‌ها در هر سه ناحیه اول تا سوم، ضعیف‌ترین مقدار بازیابی تنش برای سنگ شکل‌پذیر گچ رخ داده است و در نقطه مقابل آن، به‌طور کلی بهترین بازیابی‌های تنش پیش بارگذاری برای سنگ‌های زیولیت و گرانیت که رفتار شکننده و الاستیکی دارند، بوده است.
- ✓ تقریباً برای همه سنگ‌ها در ناحیه الاستیک مقادیر بازیابی تنش پیشین بهتر صورت گرفته است.
- ✓ نتایج نشان می‌دهد که اگرچه چگالی، سرعت عبور موج p برای سنگ زیولیت کم‌ترین مقدار و همچنین دارای بیش‌ترین مقدار جذب آب بین سنگ‌های یادشده بوده است اما به‌طور کلی بهترین بازیابی تنش برای این سنگ رخ داده است.

✓ نتایج آزمایش‌های DRA برای سنگ‌های مختلف که در سطوح تنش متفاوت پیش بارگذاری شده‌اند، نشان می‌دهند که ارتباط منطقی و روشنی بین خواص فیزیکی و نتایج بازیابی کرنش وجود ندارد.

✓ با توجه به وضوح متفاوت نقاط انحنا در سنگ‌های گرانیت، گچ، زیولیت و ماسه‌سنگ و همچنین براساس نسبت مناسب‌های بدست آمده برای آنها، می‌توان گفت که بازیابی تنش در نمونه سنگ‌های با رفتارها و خواص متفاوت توسط روش تحلیل نرخ تغییرشکل امکان‌پذیر است.

۳-۵ پیشنهادها

❖ با توجه به این که آزمایش DRA بر روی تعداد محدودی از سنگ‌ها انجام شده است پیشنهاد می‌شود که برای اطمینان بیشتر نتایج این آزمایش بر روی تعداد بیشتر و متنوع‌تری از سنگ‌ها انجام شود.

❖ همچنین بهتر است که نتیجه این آزمایش‌ها با سایر روش‌های اندازه‌گیری یا تخمین تنش بویژه روش انتشار آوایی به‌طور مقایسه‌ای انجام گیرد.

❖ برای دستیابی به نتایج قابل اطمینان‌تر پیشنهاد می‌شود که تعداد بیش از یک عدد کرنش‌سنج در هر نمونه مغزه جهت آزمایش استفاده گردد.

❖ به دلیل این که یکی از پارامترهای مهم و تاثیر گذار در نتیجه آزمایش در شرایط واقعی (محیط‌های برج)، زمان تاخیر است پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های بعدی آزمایش DRA با در نظر گرفتن زمان تاخیر و برای سنگ‌های مختلف صورت گیرد.

❖ برای درک بیشتر و بهتر اثر مدت زمان پیش بارگذاری پیشنهاد می‌شود که این موضوع نیز بررسی گردد.

❖ با توجه با این که سنگ‌ها در شرایط واقعی تحت تنش‌های سه محوره قرار دارند برای این که شرایط آزمایش و نتایج آن به واقعیت نزدیک‌تر باشد، بهتر است که نمونه‌ها تحت تنش پیش بارگذاری سه محوره بجای تک محوره قرار بگیرند و سپس برای تخمین تنش توسط روش DRA استفاده شوند.

منابع و مراجع

- [1] Hudson JA, Harrison JP. **“Engineering rock mechanics: an introduction to the principles”**. Elsevier; 2000 Jun 12.
- [2] Hudson JA, Cornet FH, Christiansson R. **“ISRM Suggested Methods for rock stress estimation—Part 1: Strategy for rock stress estimation”**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2003 Dec 31;40(7):991-8.
- [3] Cai M, Peng H. **“Advance of in-situ stress measurement in China”**. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2011 Dec 25;3(4):373-84.
- [4] Seto M, Nag DK, Vutukuri VS. **“In-situ rock stress measurement from rock cores using the acoustic emission method and deformation rate analysis”**. Geotechnical and Geological Engineering. 1999 Sep 1;17(3):241-66.
- [5] Villaescusa E, Li J, Seto M. **“Stress measurements from oriented core in Australia”**. InProc. 5th International Workshop on the Application of Geophysics in Rock Engineering, Toronto, Canada 2002 Nov.
- [6] Louchnikov V. **“A numerical investigation into the stress memory effect in rocks”** (Doctoral dissertation). 2004.
- [7] Hunt SP, Meyers AG, Louchnikov V. **“Modelling the Kaiser effect and deformation rate analysis in sandstone using the discrete element method”**. Computers and Geotechnics. 2003 Oct 1;30(7):611-21.
- [8] Attar I, Ahmadi M, Nikkhah M, Attar A. **“Investigating the capability of deformation rate analysis method in stress estimation: a case study of water conveyance tunnel of Gotvand Dam”**. Arabian Journal of Geosciences. 2014 Apr 1;7(4):1479-89.
- [9] Amadei B, Stephansson O. **“Rock stress and its measurement”**. Springer Science & Business Media; 1997 Mar 31.

[۱۰] عطّار، ایمان. (۱۳۸۷). "بررسی روشهای تخمین تنش برجا از روی مغزه های حفاری شده". پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.

- [11] Tuncay E, Ulusay R. **“Relation between Kaiser effect levels and pre-stresses applied in the laboratory”**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2008 Jun 30;45(4):524-37.
- [12] Daido, M; Aydan, ; Kuwae, H; Sakoda, S. **“An experimental study on the validity of Kaiser effect for in-situ stress measurements by Acoustic Emission Method (AEM) in rocks subjected to cyclic loads”**. Journal of The School of Marine Science and Technology. 2003;1(1):17-22.
- [13] Villaescusa E, Seto M, Baird G. **“Stress measurements from oriented core”**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2002 Jul 31;39(5):603-15.
- [14] Yamamoto K, Kuwahara Y, Kato N, Hirasawa T. **“Deformation rate analysis: A new method for in situ stress estimation from inelastic deformation of rock samples under uni-axial compressions”**. Tohoku Geophys J. 1990 Oct;33:127-47.
- [15] Yamamoto K. **“A theory of rock core-based methods for in-situ stress measurement”**. Earth, planets and space. 2009 Oct 1;61(10):1143-61.
- [16] Utagawa M, Seto M, Katsuyama K. **“Estimation of initial stress by deformation rate analysis (DRA)”**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1997 Apr 1;34(3-4):317-e1.
- [17] Seto M, Utagawa M, Katsuyama K, Kiyama T. **“In situ stress determination using AE and DRA techniques”**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1998 Jun 1;35(4-5):458-9.
- [18] Dight P. M. **“Determination of in-situ stress from oriented core”**. In-situ rock stress. 2006.
- [19] Lin HM. **“Evaluating the pre-stress of Mu-Shan sandstone using acoustic emission and deformation rate analysis”**. Vitrification in Assisted Reproduction. 2015 Oct 12:215.
- [20] Ren XH, Wang HJ, Zhang JX. **“Numerical study of AE and DRA methods in sandstone and granite in orthogonal loading directions”**. Water Science and Engineering. 2012 Mar 1;5(1):93-104.
- [21] Wang HJ, Dyskin AV, Hsieh A, Dight P. **“The mechanism of the deformation memory effect and the deformation rate analysis in layered rock in the low stress region”**. Computers and Geotechnics. 2012 Jun 30;44:83-92.

[22] Dight P, Hsieh A, Kemppainen K, Johansson E, Hudson JA. **“A Test Case of the Deformation Rate Analysis (DRA) Stress Measurement Method”**. Posiva Oy; 2012 Jan.

[23] Hsieh A, Dyskin AV, Dight P. **“The influence of sample bending on deformation rate analysis stress reconstruction”**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2013(64):90-5.

[24] Hsieh A, Dight P. **“The Desirable and Undesirable Effects on Stress Reconstruction Using the Deformation Rate Analysis (DRA)”**. InISRM International Symposium on In-Situ Rock Stress 2016 Jan 1. International Society for Rock Mechanics.

[25] Ljunggren C, Chang Y, Janson T, Christiansson R. **“An overview of rock stress measurement methods”**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2003 Dec 31;40(7):89-975.

[۲۶] ترابی، رحمان. (۱۳۹۰). **“مقدمه‌ای بر مکانیک سنگ”**. چاپ چهارم، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.

[27] Lu M, Li CC, Kjørholt H, Dahle H. **“In-situ Rock Stress, Measurement, Interpretation and Application”**. InProceedings of the International Symposium on In-Situ Rock Stress, Trondheim, Norway 2006 Jun (pp. 19-21).

[۲۸] آریزفر، علی. (۱۳۹۰). **“مقایسه روش DRA و AE در اندازه‌گیری تنش برجا مطالعه موردی ساختگاه سد بتنی بختیاری”**. پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.

[29] Hsieh CM. **“In Situ Stress Reconstruction Using Rock Memory”** (Doctoral dissertation, University of Western Australia). 2013.

[30] Fairhurst C. **“Stress estimation in rock: a brief history and review”**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2003 Dec 31;40(7):957-73.

[31] Wang HJ, Dyskin AV, Hsieh A, Dight P. **“The mechanism of the deformation memory effect and the deformation rate analysis in layered rock in the low stress region”**. Computers and Geotechnics. 2012 Jun 30;44:83-92.

[32] Rong Y. **“Acoustic Emission Evaluation and Mechanical Property Characterization of Stainless Steel Specimens Manufactured by Powder Based 3-D Printer”** (Doctoral dissertation, University of Pittsburgh). 2015.

[33] Lehtonen A, Cosgrove JW, Hudson JA, Johansson E. **“An examination of in situ rock stress estimation using the Kaiser effect”**. Engineering Geology. 2012 Jan 4;124:24-37.

[34] Lehtonen A, Sarkka P. **“Evaluation of rock stress estimation by the Kaiser effect”**. 2005.

[35] Lavrov A. **“The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques”**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2003 Feb 28;40(2):151-71.

[36] Holt RM, Brignoli M, Kenter CJ. **“Core quality: quantification of coring-induced rock alteration”**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2000 Sep 1;37(6):889-907.

[37] Sakaguchi K, Iino W, Matsuki K. **“Damage in a rock core caused by induced tensile stress and its relation to differential strain curve analysis”**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2002 Apr 30;39(3):367-80.

[38] Momayez M, Hassani FP, Hardy HR. **“Maximum curvature method: a technique to estimate Kaiser-effect load from acoustic emission data. Journal of acoustic emission”**. 1991; Journal of Acoustic Emission Vol 10(¼) 10:61-.

[39] Yamshchikov VS, Shkuratnik VL, Lavrov AV. **“Memory effects in rocks”**. Journal of Mining Science. 1994 Sep 1;30(5):463-73.

[۴۰] سمندری، بهروز. (۱۳۸۴). بررسی امکان تخمین تنش برجا با استفاده از مغزه حفاری شده.

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.

[41] Seto M, Villaescusa E. **“In situ stress determination by acoustic emission techniques from McArthur River Mine cores”**. In Proceedings 1st Australia New Zealand Conference on Geomechanics: Consolidating Knowledge 1999 (p. 929). Australian Geomechanics Society.

- [42] Kuwahara Y, Yamamoto K, Hirasawa T. **“An experimental and theoretical study of inelastic deformation of brittle rocks under cyclic uniaxial loading”**. Tohoku geophysical journal. 1990;33(1):1-21.
- [43] Tamaki, K., Yamamoto, K., Furuta, T., & Yamamoto, H. 35. **An experiment of in-situ stress estimation on basaltic rock core samples from hole 758 A**, Ninetyeast Ridge, Indian Ocean¹. 1991.
- [44] Tamaki K, Suyehiro K, Allan J, McWilliams M. 67. **Estimation in-situ stress field from basaltic rock core samples of hole 794 C**, Yamato Basin, JAPAN SEA¹. In Proceedings of the Ocean Drilling Program: Scientific results, 1989. (Vol. 127, p. 1047). The Program.
- [45] Yamamoto K, Yabe Y. **“Stresses at sites close to the Nojima Fault measured from core samples”**. Island Arc. 2001 Sep 1;10(3- 4):266-81.
- [46] Holcomb DJ. **“General theory of the Kaiser effect”**. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1993 Dec 1 (Vol. 30, No. 7, pp. 929-935). Pergamon.
- [47] Martin CD, Chandler NA. **“The progressive fracture of Lac du Bonnet granite”**. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 1994 Dec 1 (Vol. 31, No. 6, pp. 643-659). Pergamon.
- [48] Stuart CE, Meredith PG, Murrell SA, Van Munster JG. **“Anisotropic crack damage and stress-memory effects in rocks under triaxial loading”**. In International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts 1993 Dec 1 (Vol. 30, No. 7, pp. 937-941). Pergamon.
- [49] Chen ZH, Tham LG, Xie H. **“Experimental and numerical study of the directional dependency of the Kaiser effect in granite”**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2007 Oct 31;44(7):1053-61.
- [50] Holcomb DJ, Costin LS. **“Detecting damage surfaces in brittle materials using acoustic emissions”**. J. Appl. mech. 1986 Sep 1;53:536-44.
- [51] Lavrov A, Vervoort A, Wevers M, Napier JA. **“Experimental and numerical study of the Kaiser effect in cyclic Brazilian tests with disk rotation”**. International journal of rock mechanics and mining sciences. 2002 Apr 30;39(3):287-302.
- [52] Fujii Y, Kondo K. **“Influence of Stress Larger than Preload but Acted for Shorter Duration in Tangent Modulus Method: A New Method to Measure In-situ**

Rock Stress". ISRM International Symposium 2010 and 6th Asian Rock Mechanics Symposium - Advances in Rock Engineering, 23-27 October, 2010, New Delhi, India.

[53] Filimonov YU, Lavrov AL, Shafarenko YE, Shkuratnik VL. **"Observation of post-failure Kaiser effect in a plastic rock. pure and applied geophysics"**. 2002 May 1;159(6):1321-31.

[54] Dunning, J. D., Leaird, J. D., & Miller, M. E. **"The kaiser effect and frictional deformation"**. 1985. In IVth Conf. AE/MS Geol. Str. & Mat (pp. 3-13).

پیوست الف

برنامه توسعه یافته متلب

برنامه زیر به صورتی نوشته شده است که اطلاعات مربوط به بارگذاری در هر چرخه بارگذاری که به صورت تنش و کرنش ثبت می‌شود و به صورت فایل اکسل است، را پردازش می‌کند. به این صورت که با پیدا کردن کرنش‌های متناظر در هر سطح تنش مساوی و اعمال رابطه (۲-۳) برای هر دو چرخه و در نهایت رسم نمودار تفاضل کرنش این دو چرخه نسبت به تنش عمل می‌کند. در ضمن این برنامه برای ۴ چرخه بارگذاری-باربرداری نوشته شده است. این کد بصورت دو ستون که از سمت چپ شروع می‌شود در زیر آورده شده است.

```

clc
clear all
format long
M۱=xlsread('Z۶-۱۵-۴.xlsx',۱,'A:B');
M۲=xlsread('Z۶-۱۵-۴.xlsx',۱,'C:D');
M۳=xlsread('Z۶-۱۵-۴.xlsx',۱,'E:F');
M۴=xlsread('Z۶-۱۵-۴.xlsx',۱,'G:H');
n۱=length(M۱);
n۲=length(M۲);
n۳=length(M۳);
n۴=length(M۴);
s۱=۱;s۲=۱;s۱۱=۱;s۲۲=۱;s۱۱۱=۱;s۲۲۲
۲=۱;s۱۱۱۱=۱;s۲۲۲۲=۱;
for i=۱:n۱
    yp=M۱(i,۲);
    if (yp<M۲(۱,۲))
        y۰=M۱(i,۲);
        y۱=M۲(۱,۲);
        for j=۲:n۲
            if((M۲(j,۲)<y۱)&(M۲(j,۲)>y۰))
                y۱=M۲(j,۲);
                s۱=j;
            end
        end
        for j=۱:n۲
            if(M۲(j,۲)<y۰)
                y۲=M۲(j,۲);
                s۲=j;
            end
        end
        for s=s۲:n۲
            if((M۲(s,۲)>y۲)&(M۲(s,۲)<y۰))
                y۲=M۲(s,۲);
            end
        end
    end
end

```

```

        sᳵ=s;
    end
end
y(i)=Mᳵ(sᳵ,1)-((Mᳵ(sᳵ,1)-
Mᳵ(sᳵ,1))/((yᳵ-yᳵ)/(yᳵ-yᳵ)));
    end
end
for i=1:nᳵ
    ypp=Mᳵ(i,ᳵ);
    if (ypp<Mᳵ(1,ᳵ))
        yᳵᳵ=Mᳵ(i,ᳵ);
        yᳵᳵ=Mᳵ(1,ᳵ);
        for j=ᳵ:nᳵ
            if (yᳵᳵ<yᳵᳵ)
                if((Mᳵ(j,ᳵ)<yᳵᳵ)&(Mᳵ(j,ᳵ)>yᳵᳵ))
                    yᳵᳵ=Mᳵ(j,ᳵ);
                    sᳵᳵ=j;
                end
            end
        end
    end
for j=1:nᳵ
    if(Mᳵ(j,ᳵ)<yᳵᳵ)
        yᳵᳵ=Mᳵ(j,ᳵ);
        sᳵᳵ=j;
        break
    end
end

```

```

    end
    for ss=sᳵᳵ:nᳵ
        if((Mᳵ(ss,ᳵ)>yᳵᳵ)&(Mᳵ(ss,ᳵ)<yᳵᳵ))
            yᳵᳵ=Mᳵ(ss,ᳵ);
            sᳵᳵ=ss;
        end
    end
end
z(i)=Mᳵ(sᳵᳵ,1)-((Mᳵ(sᳵᳵ,1)-
Mᳵ(sᳵᳵ,1))/((yᳵᳵ-yᳵᳵ)/(yᳵᳵ-yᳵᳵ)));
    end
end
for i=1:nᳵ
    yppp=Mᳵ(i,ᳵ);
    if (yppp<Mᳵ(1,ᳵ))
        yᳵᳵᳵ=Mᳵ(i,ᳵ);
        yᳵᳵᳵ=Mᳵ(1,ᳵ);
        for j=ᳵ:nᳵ
            if (yᳵᳵᳵ<yᳵᳵᳵ)
                if((Mᳵ(j,ᳵ)<yᳵᳵᳵ)&(Mᳵ(j,ᳵ)>yᳵᳵᳵ))
                    yᳵᳵᳵ=Mᳵ(j,ᳵ);
                    sᳵᳵᳵ=j;
                end
            end
        end
    end
for j=1:nᳵ
    if(Mᳵ(j,ᳵ)<yᳵᳵᳵ)
        yᳵᳵᳵ=Mᳵ(j,ᳵ);
        sᳵᳵᳵ=j;
        break
    end
end

```

```

if(Mf(j,r)<y···)
    yrr=Mf(j,r);
    srr=j;
    break
end
end
for ss=srr:nf
    if((Mf(ss,r)>yrr)&(Mf(ss,r)<y···))
        yrr=Mf(ss,r);
        srr=ss;
    end
end
w(i)=Mf(srr,1)-((Mf(srr,1)-
Mf(s11,1))/(yrr-y11)/(yrr-
y···));
end
end
% y;z;w;

for u=1:n
    e1(u)=y(u)-M1(u,1);
    e3(u)=z(u)-M1(u,1);
    e4(u)=w(u)-M1(u,1);
    e2(u)=z(u)-y(u);
    e5(u)=w(u)-y(u);
    e6(u)=w(u)-z(u);

```

Abstract

Stress is a fundamental concept in the principles of rock mechanics and applied applications in rock engineering. Understanding the stress in building design Most engineering projects that are related to drilling in stone are very important. The best methods for measuring (estimating) stress are direct measurement methods, but these methods are proven to be very expensive and cost-effective, and these methods are ineffective in many depths and regions of out of access. Hence, today, indirect methods (based on rock core samples) are expanding to estimate past stresses. One of these methods is the methods based on the phenomenon of memory stresses of acoustic emission rock and the deformation rate analysis. In this research, the deformation rate analysis method was used for conducting experiments. The stress-strain behavior curves of a rock to the failure stage include crack closure, linear elasticity and Plastic areas, and, accordingly, pre-loading stresses have been designed. In order to investigate the rock behavior in stress recovery in each of the above three areas and at different preload levels for different rocks, especially granite, zeolite, sandstone and gypsum, DRA experiments were conducted. The results show that in each rock, different behaviors occur in each of the above three areas. It is also shown that for different rocks the values of recovered preload stresses by DRA vary in each region, and in general, the best recovery of stress for zeolite and granite rocks and the weakest one for gypsum rock has occurred.

Keywords: indirect method, rock memory, preload loading stress, DRA method, stress recovery.



Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

Mining Engineering, Rock Mechanics

**Investigating the type of rock behavior in the
estimation of stress by Deformation Rate Analysis Method**

Master's thesis

Abdollah Aghill

Supervisor:

Dr. Majid Nikkhah

Advisor:

Dr. Shorollah Zare

September 2017