

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد با موضوع:

بررسی آزمایشگاهی توسعه ترک خوردگی در آزمایش شکست هیدرولیکی با استفاده از انتشار آکوستیک

نگارنده: علی اسماعیل زاده

استاد راهنما:

آقای دکتر مجید نیکخواه

استاد مشاور:

آقای دکتر حامد شیرازی

اسفند ۱۴۰۰

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

به پاس عاطفه سرشارشان که در این برهوت بدگمانی و شک چون چراغی می‌دخشد و روح را از تنهایی و نومیدی ربائی می‌دهد و

کرمای امید بخششان که در این سردترین روزگار ان، ناباوری را دور می‌کند.

تقدیم به نازنین خواهرم

که وجودش شادی، بخش و صفایش مایه آرامش من است.

علی اسماعیل زاده

تشکر و قدردانی

اکنون که به یاری پروردگار و یاری و راهنمایی اساتید بزرگ موفق به پایان این تحقیق شده‌ام وظیفه خود دانسته که نهایت سپاسگزاری را از تمامی عزیزانی که در این راه به من کمک کرده‌اند را به عمل آورم.

بر خود واجب می‌دانم در ابتدا از استاد فرزانه جناب آقای دکتر مجید نیکخواه که به عنوان استاد راهنما در مراحل مختلف این پایان‌نامه همواره با سعه صدر و گشاده رویی در کنار من بودند و در طول مدت تحصیل از راهنمایی‌های اخلاقی و علمی ایشان بهره جسته‌ام تشکر و قدردانی نمایم. از جناب آقای دکتر حامد شیرازی به عنوان استاد مشاور طرح که همواره تجربه علمی ایشان در تمامی مراحل پایان‌نامه کارگشا بود، نهایت تشکر و سپاس را دارم و توفیق ایشان را در عرصه علم و دانش از خداوند منان مسئلت می‌نمایم.

این نوشته فرصتی است تا از زحمات‌های اساتید بزرگوام در گروه مکانیک سنگ دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود که شاگردی محضرشان از بزرگترین افتخارات زندگی علمی‌ام می‌باشد، قدردانی نمایم.

در نهایت از مسئول محترم آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشکده معدن جناب آقای مهندس زیاری، مسئول محترم آزمایشگاه تحقیقاتی بتن و مهندسی سازه دانشکده عمران جناب آقای مهندس محمدی و مسئول محترم کارگاه ماشین ابزار دانشکده مکانیک جناب آقای مهندس اخیانی کمال تشکر و قدردانی را دارم. همچنین از همکاری‌ها و راهنمایی‌های دوست عزیزم جناب آقای مهندس عیدیوندی سپاسگزارم.

تعهدنامه

اینجانب علی اسماعیل زاده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی آزمایشگاهی توسعه ترک خوردگی در آزمایش شکست هیدرولیکی با استفاده از انتشار آکوستیک تحت راهنمایی جناب آقای 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 پژوهش های 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.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده اند 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:

امضاء:

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها 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 پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

شکست هیدرولیکی به عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌های تحریک مخازن نفت و گاز شناخته می‌شود. مطالعات گسترده‌ای بر روی پارامترهای تاثیرگذار آن از قبیل تاثیر تنش‌های جانبی و قائم، رژیم تنش‌ها، خواص مکانیکی سازند، شکستگی‌های طبیعی سازند انجام شده است. با این حال، نکات مبهم در ارتباط با شکست هیدرولیکی وجود دارد و به همین علت لزوم تحلیل و بررسی در این زمینه احساس می‌شود. در این تحقیق به منظور درک بهتر مکانیزم ایجاد و گسترش ترک‌ها در فرایند شکست هیدرولیکی و بررسی آزمایشگاهی توسعه ترک خوردگی، از انتشار آکوستیک (آوایی) استفاده شده است. آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های بلوکی بتنی به ابعاد ۳۰ سانتی‌متر مکعب با حفره مرکزی به قطر ۵۰ میلی‌متر تحت شرایط تنش سه محوره واقعی انجام شده و رفتارنگاری انتشار آکوستیک همزمان با تزریق سیال به درون نمونه صورت گرفته است. آزمایش‌ها تحت تنش‌های متفاوت اعمال شده بر روی نمونه‌ها انجام شده است تا بررسی تاثیر تنش‌های جانبی و قائم صورت پذیرد. به منظور بررسی رفتارهای انحراف ترک در فرایند شکست هیدرولیکی و تاثیر شکستگی‌های طبیعی سازند بر آن، از نمونه‌های شکافدار استفاده شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش تنش افقی حداقل، فشار شکست افزایش می‌یابد و با افزایش تنش قائم و تنش افقی حداکثر، فشار شکست یک روند افزایشی و کاهشی نشان می‌دهد. شکستگی ایجاد شده در ترکیبات تنش ناهمسانگرد، در راستای تنش افقی حداکثر و در ترکیبات تنش همسانگرد، به صورت تصادفی شعاعی ایجاد شده است. شکاف از پیش موجود در نمونه‌های شکافدار فشار شکست نمونه‌ها را کاهش داده و مقدار اختلاف تنش‌های افقی در طول آزمایش‌ها به وضوح مسیر گسترش ترک را در طول فرایند شکست هیدرولیکی تحت تاثیر قرار داده است. همچنین پارامترهای مختلف انتشار آکوستیک مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است، نتایج نشان دهنده ارتباط مناسب بین رفتار ترک خوردگی در آزمایش‌های شکست هیدرولیکی با پارامترهای انتشار آکوستیک وجود دارد.

کلمات کلیدی: شکست هیدرولیکی، انتشار آکوستیک، تنش سه محوره واقعی، مخازن هیدروکربنی، تنش

برجا

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

1- An Experimental Study of Acoustic Emission Monitoring on cement-based material under Compressive and Tensile Indirect Tests

۲- مطالعه آزمایشگاهی تاثیر شکاف از پیش موجود بر شکافت هیدرولیکی با استفاده از انتشار آکوستیک

۳- مطالعه آزمایشگاهی مقایسه رفتار انتشار آکوستیک در سنگ مصنوعی تحت بارگذاری فشاری و غیرمستقیم کششی

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: کلیات	۱
(۱-۱) مقدمه و تعریف مساله.....	۲
(۲-۱) ضرورت انجام تحقیق.....	۳
(۳-۱) روش تحقیق.....	۴
(۴-۱) ساختار تحقیق.....	۵
فصل دوم: مبانی نظری	۷
(۱-۲) مقدمه.....	۸
(۲-۲) شکست هیدرولیکی.....	۸
(۱-۲-۲) روش‌های عملیات شکست هیدرولیکی در صنعت نفت و گاز.....	۹
(۲-۲-۲) مراحل شکست هیدرولیکی و معیارهای فشار شکست.....	۱۱
(۳-۲) انتشار آکوستیک.....	۱۳
(۱-۳-۲) پارامترها و ویژگی‌های مهم انتشار آکوستیک.....	۱۴
(۲-۳-۲) طبقه بندی ترک‌ها.....	۱۶
(۴-۲) جمع بندی.....	۱۷
فصل سوم: مرور ادبیات فنی موضوع	۱۹
(۱-۳) مقدمه.....	۲۰
(۲-۳) مروری بر مطالعات انجام شده.....	۲۰
(۳-۳) جمع بندی.....	۳۴
فصل چهارم: آزمون‌های اولیه تعیین ویژگی‌های نمونه آزمایش	۳۷
(۱-۴) مقدمه.....	۳۸
(۲-۴) تهیه نمونه.....	۳۸
(۴-۲-۱) آماده‌سازی نمونه‌ها.....	۳۸
(۴-۲-۲) آزمایش دانه‌بندی و سرند.....	۳۹
(۳-۴) تجهیزات انتشار آکوستیک استفاده شده.....	۳۹
(۴-۴) خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها.....	۴۳
(۵-۴) آزمایش‌های فشاری تک محوره و برزیلی به همراه رفتارنگاری انتشار آکوستیک.....	۴۴
(۶-۴) تحلیل نتایج رفتارنگاری AE آزمایش‌های فشاری تک محوره و برزیلی.....	۴۵

۴۶	ویژگی‌های طیف فرکانس سیگنال AE
۴۸	پارامتر شمارش AE (کانت)
۵۱	پارامتر انرژی AE
۵۲	فرکانس متوسط (AF)
۵۴	زاویه خیز (RA)
۵۵	طبقه بندی نوع ترک‌ها
۵۶	تحلیل b-value
۵۹	تحلیل Ib-value
۶۲	مقایسه نتایج b-value و Ib-value
۶۴	توزیع دامنه AE بر حسب مدت زمان
۶۶	جمع بندی
۶۷	فصل پنجم: آزمایش‌های شکست هیدرولیکی به همراه رفتارنگاری انتشار آکوستیک
۶۸	۱-۵) مقدمه
۶۸	۲-۵) تهیه نمونه
۶۹	۳-۵) آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت ترکیبات تنش متفاوت به همراه رفتارنگاری AE
۷۰	۱-۳-۵) دستگاه آزمایش شکست هیدرولیکی سه محوره واقعی
۷۲	۲-۳-۵) تجهیزات آزمایش شکست هیدرولیکی
۷۳	۳-۳-۵) مراحل انجام آزمایش شکست هیدرولیکی
۷۶	۴-۳-۵) نتایج آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت بارگذاری سه محوره واقعی
۸۰	۱-۴-۳-۵) مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج مدل تحلیلی
۸۱	۲-۴-۳-۵) تاثیر ترکیبات تنش بارگذاری بر روی فشار شکست هیدرولیکی
۸۶	۵-۳-۵) تحلیل هندسه شکست هیدرولیکی
۸۹	۶-۳-۵) پارامتر شمارش AE (کانت)
۹۷	۷-۳-۵) پارامتر انرژی AE
۱۰۱	۸-۳-۵) پارامتر فرکانس متوسط (AF)
۱۰۴	۹-۳-۵) پارامتر زاویه خیز (RA)
۱۰۷	۱۰-۳-۵) طبقه بندی نوع ترک‌ها
۱۱۱	۱۱-۳-۵) تحلیل b-value
۱۱۳	۱۲-۳-۵) تحلیل Ib-value
۱۱۸	۴-۵) بررسی تاثیر شکاف از پیش موجود در جداره حفره
۱۲۲	۱-۴-۵) پارامتر شمارش (کانت) و انرژی AE

۱۲۸.....	۲-۴-۵) فرکانس متوسط، زاویه خیز و طبقه بندی نوع ترک‌ها
۱۳۳.....	۳-۴-۵) تحلیل b-value و Ib-value
۱۳۷.....	۵-۵) جمع بندی
۱۳۹.....	فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۱۴۰.....	۱-۶) نتیجه‌گیری
۱۴۰.....	۱-۱-۶) آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوره و کششی برزلی
۱۴۰.....	۲-۱-۶) آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت ترکیبات تنش متفاوت
۱۴۱.....	۳-۱-۶) آزمایش‌های شکست هیدرولیکی نمونه‌های دارای شکاف از پیش موجود
۱۴۲.....	۲-۶) پیشنهادها
۱۴۳.....	مراجع

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۳-۱) تحقیقات انجام شده در زمینه شکست هیدرولیکی و انتشار آکوستیک	۲۶
جدول ۴-۱) مشخصات فنی و تجهیزات جانبی سنسور AE	۴۲
جدول ۴-۲) خواص مکانیکی نمونه	۴۳
جدول ۴-۳) ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌ها	۴۴
جدول ۵-۱) نتایج بدست آمده از آزمایش‌های انجام شده بر اساس ترکیب تنش‌های مختلف	۷۷
جدول ۵-۲) تاثیر ترکیبات تنش بارگذاری متفاوت بر روی فشار شکست هیدرولیکی	۸۲
جدول ۵-۳) نتایج بدست آمده از آزمایش نمونه‌های شکافدار و بدون شکاف در ترکیبات تنش مشابه	۱۱۹

فهرست اشکال

صفحه	عنوان
شکل ۲-۱) ۱۰	شکست هیدرولیکی، الف) روش پروپانت گذاری شده ب) روش شکست آبی
شکل ۲-۲) ۱۱	نمای کلی مراحل شکست هیدرولیکی
شکل ۲-۳) ۱۴	نمونه‌ای از سیگنال انتشار آکوستیک حاصل از آزمایش گرانیات
شکل ۲-۴) ۱۵	منبع AE (a) و ویژگی مهم سیگنال‌های آزمون انتشار آکوستیک (b)
شکل ۲-۵) ۱۶	پایه و اساس عملکرد روش انتشار آکوستیک
شکل ۲-۶) ۱۷	روش طبقه بندی ترک‌ها (a) شکل موج (b) روش طبقه بندی ترک
شکل ۴-۱) ۳۸	الف) بتن‌ریزی نمونه‌های استوانه‌ای، ب) قرار دادن نمونه‌ها در حوضچه آب
شکل ۴-۲) ۳۹	نمودار دانه‌بندی مصالح دانه‌ای در تهیه نمونه
شکل ۴-۳) ۴۰	سیستم انتشار آکوستیک استفاده شده
شکل ۴-۴) ۴۰	الف) ASIP-2 (پردازشگر سیگنال آکوستیک) ب) بدنه دستگاه
شکل ۴-۵) ۴۱	پیش تقویت کننده‌های AEP5 و AEP5H
شکل ۴-۶) ۴۲	تصویری از سنسور AE و محدوده فرکانس کالیبراسیون سنسور
شکل ۴-۷) ۴۳	نحوه انجام آزمایش‌ها، الف) آزمایش برزیلی ب) آزمایش مقاومت فشاری تک محوره
شکل ۴-۸) ۴۵	دستگاه انجام آزمایش‌های فشاری تک محوره و برزیلی
شکل ۴-۹) ۴۵	تصویر نمونه‌های تک محوره و برزیلی شکسته شده بعد از آزمایش
شکل ۴-۱۰) ۴۷	شکل موج AE و طیف فرکانس سیگنال مربوط به آزمایش‌های فشاری تک محوره
شکل ۴-۱۱) ۴۳	شکل موج AE و طیف فرکانس سیگنال مربوط به آزمایش‌های برزیلی
شکل ۴-۱۲) ۴۸	نمودار تغییرات مقدار شمارش، شمارش تجمعی و تنش در آزمایش تک محوره و برزیلی
شکل ۴-۱۳) ۵۰	نمودار تغییرات مقدار شمارش تجمعی برای دو سنسور به صورت جداگانه و مقدار تنش در آزمایش‌های تک محوره و برزیلی
شکل ۴-۱۴) ۵۱	نمودار تغییرات مقدار انرژی، انرژی تجمعی و تنش در آزمایش‌های تک محوره و برزیلی
شکل ۴-۱۵) ۵۳	نمودار تغییرات فرکانس متوسط و تنش بارگذاری در آزمایش‌های تک محوره و برزیلی
شکل ۴-۱۶) ۵۴	نمودار تغییرات زاویه خیز و تنش بارگذاری در آزمایش‌های تک محوره و برزیلی
شکل ۴-۱۷) ۵۶	طبقه بندی نوع ترک‌ها در آزمایش‌های تک محوره و برزیلی
شکل ۴-۱۸) ۵۸	مقادیر b-value برای نمونه‌ها در آزمایش‌های تک محوره و برزیلی
شکل ۴-۱۹) ۶۱	نمودار تغییرات Ib-value و تنش بارگذاری برای نمونه‌ها در آزمایش‌های تک محوره و برزیلی
شکل ۴-۲۰) ۶۴	نمودار تغییرات b-value و Ib-value و تنش بارگذاری برای نمونه‌ها در آزمایش‌های تک محوره و برزیلی
شکل ۴-۲۱) ۶۵	توزیع دامنه AE برحسب مدت زمان در آزمایش‌های تک محوره و برزیلی

- شکل ۱-۵) تصویر قالب‌های فلزی ساخته شده ۶۹
- شکل ۲-۵) الف) بتن‌ریزی نمونه‌های مکعبی ب) قرار دادن در حوضچه آب ۶۹
- شکل ۳-۵) تجهیزات دستگاه سه محوره واقعی ۷۱
- شکل ۴-۵) دستگاه شکست هیدرولیکی سه محوره واقعی استفاده شده ۷۱
- شکل ۵-۵) آب‌بندی انتهای حفره موجود در نمونه‌های مکعبی ۷۲
- شکل ۶-۵) الف) صفحه فلزی ماشین‌کاری شده، ب) محفظه قرارگیری سنسور AE ۷۳
- شکل ۷-۵) نمودار بارگذاری شرایط تنش سه محوره واقعی ۷۵
- شکل ۸-۵) مراحل انجام آزمایش شکست هیدرولیکی ۷۶
- شکل ۹-۵) فشار تزریق سیال در لحظه شکست نمونه‌ها در ترکیبات تنش متفاوت ۷۹
- شکل ۱۰-۵) مقایسه فشار شکست بدست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی با مدل تحلیلی ۸۱
- شکل ۱۱-۵) تاثیر تغییرات تنش قائم و تنش افقی حداکثر بر روی فشار شکست نمونه‌ها تحت آزمایش شکست هیدرولیکی ۸۴
- شکل ۱۲-۵) تاثیر تغییرات تنش افقی حداقل و تنش تفاضلی بر روی فشار شکست نمونه‌ها تحت آزمایش شکست هیدرولیکی ۸۶
- شکل ۱۳-۵) هندسه شکست نمونه‌ها در آزمایش شکست هیدرولیکی سه محوره واقعی تحت ترکیبات تنش متفاوت ۸۸
- شکل ۱۴-۵) نمودار تغییرات مقدار شمارش تجمعی برای چهار سنسور و فشار تزریق سیال در آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت ترکیبات تنش متفاوت ۸۶
- شکل ۱۵-۵) نمودار تغییرات مقدار شمارش، شمارش تجمعی و فشار تزریق سیال در آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت ترکیبات تنش متفاوت ۹۵
- شکل ۱۶-۵) نمودار تغییرات مقدار انرژی، انرژی تجمعی و فشار تزریق سیال در آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت ترکیبات تنش متفاوت ۹۹
- شکل ۱۷-۵) نمودار تغییرات مقدار فرکانس متوسط و فشار تزریق سیال در آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت ترکیبات تنش متفاوت ۱۰۳
- شکل ۱۸-۵) نمودار تغییرات مقدار زاویه خیز و فشار تزریق سیال در آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت ترکیبات تنش متفاوت ۱۰۶
- شکل ۱۹-۵) طبقه بندی نوع ترک‌ها در آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت ترکیبات تنش متفاوت ۱۰۸
- شکل ۲۰-۵) مقادیر b-value برای نمونه‌ها در آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت ترکیبات تنش متفاوت ۱۱۲
- شکل ۲۱-۵) نمودار تغییرات مقدار Ib-value و فشار تزریق سیال برای نمونه‌ها در آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت ترکیبات تنش متفاوت ۱۱۶
- شکل ۲۲-۵) تهیه نمونه شکافدار، الف) شکاف از پیش موجود ب) روند ایجاد آن ۱۱۸
- شکل ۲۳-۵) نحوه قرارگیری نمونه شکافدار در داخل دستگاه سه محوره واقعی ۱۱۹

شکل ۲۴-۵) تاثیر شکاف از پیش موجود بر فشار تزریق سیال در لحظه شکست نمونه‌ها..... ۱۲۰

شکل ۲۵-۵) هندسه شکست هیدرولیکی، الف) نمونه‌های شکافدار ب) نمونه‌های بدون شکاف در ترکیبات تنش مشابه..... ۱۲۱

شکل ۲۶-۵) نمودار تغییرات مقدار شمارش تجمعی برای چهار سنسور و فشار تزریق سیال برای آزمایش شکست هیدرولیکی نمونه‌های شکافدار..... ۱۲۳

شکل ۲۷-۵) نمودار تغییرات مقدار شمارش، شمارش تجمعی و فشار تزریق سیال برای آزمایش شکست هیدرولیکی، الف) نمونه‌های شکافدار ب) نمونه‌های بدون شکاف..... ۱۲۵

شکل ۲۸-۵) نمودار تغییرات مقدار انرژی، انرژی تجمعی و فشار تزریق سیال برای آزمایش شکست هیدرولیکی، الف) نمونه‌های شکافدار ب) نمونه‌های بدون شکاف..... ۱۲۶

شکل ۲۹-۵) نمودار تغییرات مقدار فرکانس متوسط و فشار تزریق سیال برای آزمایش شکست هیدرولیکی، الف) نمونه‌های شکافدار ب) نمونه‌های بدون شکاف..... ۱۱۹

شکل ۳۰-۵) نمودار تغییرات مقدار زاویه خیز و فشار تزریق سیال برای آزمایش شکست هیدرولیکی، الف) نمونه‌های شکافدار ب) نمونه‌های بدون شکاف..... ۱۳۰

شکل ۳۱-۵) طبقه بندی نوع ترک‌ها برای آزمایش شکست هیدرولیکی، الف) نمونه‌های شکافدار ب) نمونه‌های بدون شکاف..... ۱۳۲

شکل ۳۲-۵) مقادیر b-value برای آزمایش شکست هیدرولیکی، الف) نمونه‌های شکافدار ب) نمونه‌های بدون شکاف..... ۱۳۴

شکل ۳۳-۵) نمودار تغییرات مقدار Ib-value و فشار تزریق سیال برای آزمایش شکست هیدرولیکی، الف) نمونه‌های شکافدار ب) نمونه‌های بدون شکاف..... ۱۳۵

فصل اول

کلیات

۱-۱) مقدمه و تعریف مساله

با گذشت بیش از ۱۰۰ سال از فرآیند استخراج نفت و گاز از منابع انرژی کشور، در حال حاضر بسیاری از این مخازن به ویژه آن‌ها که دارای نفوذپذیری بالایی بوده‌اند، به تدریج رو به اتمام هستند. بنابراین گرایش به سمت مخازن با نفوذپذیری پایین بیشتر شده است، همچنین پس از استخراج طولانی مدت محصولات هیدروکربنی، فشار طبیعی مخزن کاهش می‌یابد، ترک‌های اولیه مسدود می‌شوند و تولید مخزن پایین می‌آید. از این رو برای بهره‌برداری بهینه و احیاء این مخازن، لازم است عملیات اضافی روی آن‌ها صورت گیرد، یکی از این روش‌ها بکارگیری شکست هیدرولیکی^۱ است. در این عملیات سیال با نرخ تزریقی نسبتاً بالا روی چاه پمپ می‌شود. عملیات پمپ کردن سیال تا جایی ادامه می‌یابد که با فشار بالا باعث ایجاد و باز شدن شکاف، گسترش شکاف و انتقال دادن پروپانت^۲ یا همان مواد ریز دانه با مقاومت بالا به درون شکاف شود. بر طبق مطالعات پیشین پارامترهایی مانند فشار جانبی، نوع سیال تزریق و هندسه مقطع تزریق، پارامترهای مقاومتی سنگ بکر، ناپیوستگی‌های بزرگ موجود در سنگ و تنش زمین بیشترین تاثیر را بر روی فشار شکست داشته‌اند. بنابراین برای ارزیابی عملیات شکست هیدرولیکی بررسی تاثیر این پارامترها به طور همزمان و نیز به صورت مجزا گام موثری خواهد بود [1].

شکست هیدرولیکی برای تولید هیدروکربن از ذخایر نفت و گاز غیر متعارف با نفوذپذیری بسیار کم برای ایجاد سطح وسیع در تماس با ذخایر بسیار مهم است. شکست هیدرولیکی به طور معمول مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما فرایندهای شکستگی که هنگام شکست هیدرولیکی سنگ‌ها اتفاق می‌افتد، اغلب کاملاً شناخته نشده‌اند و نیاز به بررسی بیشتر دارند. بسیاری از محققان شکست هیدرولیکی سنگ‌ها و مواد شبیه سنگ را در آزمایشگاه بررسی کرده‌اند. بعضی از آن‌ها برای درک بهتر مکانیزم‌های ایجاد و انتشار ترک‌ها در سنگ‌ها از انتشار آکوستیک^۳ استفاده کرده‌اند، که از دهه ۱۹۵۰ موضوع تحقیق در مورد ناپایداری سنگ بوده است. انتشار آکوستیک (AE) سیگنال‌های ناگهانی میکرو لرزه‌ای الاستیک با فرکانس بالا می‌باشد که

¹ Hydraulic fracturing

² proppant

³ Acoustic emission

در اثر بارگذاری جسم ایجاد و از آن ساطع می‌شود. انتشار آکوستیک به طور گسترده در رفتارنگاری شکست هیدرولیکی در آزمایشگاه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. رویدادهای AE با شروع و انتشار ترک‌های هیدرولیکی همراه است. در سطح جهانی، محققان و مهندسان در تلاش هستند تا مکانیزم ذاتی شکستگی توده‌سنگ را از ویژگی‌های AE درک کنند. همچنین این ویژگی‌های AE را در هنگام شکست هیدرولیکی در سنگ‌هایی با خواص فیزیکی مختلف یا در شرایط تنش مختلف تشخیص دهند، که امواج AE را با مشخصات مختلف در طول فرایند آسیب تولید می‌کنند. به علاوه، مشخصات AE در مراحل مختلف شکست هیدرولیکی متفاوت است. بنابراین، با مطالعه ویژگی‌های AE می‌توان فرایند شکست هیدرولیکی را با بررسی کافی مشخصات AE در آزمایشگاه به طور غیرمستقیم آشکار کرد، که انتظار می‌رود به رفتارنگاری میکرو لرزه‌ای در شکست هیدرولیکی طی کاربردهای میدانی بهبود بخشد.

۲-۱) ضرورت انجام تحقیق

عملیات شکست هیدرولیکی با دو هدف اصلی تعیین تنش‌های برجا در اعماق زمین و تحریک چاه‌های نفتی برای تولید بیشتر نفت و گاز اجرا می‌شود. بیش از چند دهه از عمر روش شکست هیدرولیکی می‌گذرد و در این سال‌ها مطالعات، آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی متعددی بر روی این روش انجام شده است. حتی با توجه به گذشت بیش از چند دهه از عمر روش مذکور همچنان نکاتی مبهم در ارتباط با آن وجود دارد و به همین علت لزوم تحلیل و بررسی در این زمینه احساس می‌شود. بنابراین در تحقیق حاضر از روش انتشار آکوستیک که از روش‌هایی است که کاربرد بسیار گسترده در مطالعات رفتارنگاری مکانیک شکست و نقص‌ها و آسیب‌های درونی ماده و سازه تحت تنش دارد، برای مطالعه آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی استفاده شده است.

از اهداف عمده تحقیق بررسی ارتباط بین رفتار ترک خوردگی در آزمایش شکست هیدرولیکی با رفتارنگاری انتشار آکوستیک از طریق تنشی که در آزمایش شکست هیدرولیکی به نمونه مصنوعی سنگ اعمال می‌شود و تحت تنش‌های اعمالی متفاوت است. لازم به ذکر است این بررسی و مطالعه بر روی نمونه-

های مصنوعی بلوکی بتنی انجام شده است. همچنین برای بررسی بیشتر در خصوص روند گسترش ترک در فرایند شکست هیدرولیکی، شکاف از پیش موجود و تاثیر آن در روند گسترش ترک و فشار تزریق سیال نیز بررسی شده است.

۱-۳) روش تحقیق

در مرحله نخست آماده سازی و ساخت نمونه های مصنوعی بتنی دارای رفتار نزدیک به سنگ انجام می شود. آزمایش ها با توجه به اهداف تعیین شده یعنی بررسی توسعه ترک خوردگی و ایجاد شکستگی ناشی از تزریق سیال با استفاده از دستگاه آزمایش سه محوره واقعی انجام شده است. نمونه های آزمایش به صورت بلوکی در حالت سه محوره واقعی قرار داده شده و یک ماده سیال را از حفره مورد نظر تزریق کرده تا شکستگی ایجاد شود و همزمان سنسورهای انتشار آکوستیک نصب شده بر نمونه ها و توسط دستگاه انتشار آکوستیک که دستگاه جداگانه ای است همزمان داده های انتشار آکوستیک اندازه گیری و ثبت می شوند. آزمایش ها تحت تنش های متفاوت اعمال شده بر روی نمونه ها انجام گرفته است تا بررسی تاثیر تنش های جانبی و قائم صورت پذیرد. انجام آزمایش های تعیین مقاومت فشاری و کششی سنگ به همراه رفتارنگاری انتشار آکوستیک انجام شده است. همچنین در تعدادی از نمونه ها دو شکاف از پیش موجود در دیواره حفره مرکزی، مقابل هم و موازی با تنش افقی حداکثر ایجاد شده و مقایسه ای بین نمونه های بدون شکاف و شکافدار در ترکیبات تنش مشابه انجام شده است.

پس از انجام آزمایش ها و ثبت داده های اندازه گیری مقدار فشار تزریق و داده های انتشار آکوستیک، تحلیل داده ها و برقراری ارتباط بین آن ها انجام می شود. در مرحله آخر با استفاده از نتایج آزمون های آزمایشگاهی داده های حاصل از این تحقیق، بررسی ها و تحلیل های کمی و کیفی انجام گرفته می شود. پس از آن منحنی های فشار تزریق و یا بارگذاری تنش بر اساس پارامترهای انتشار آکوستیک ترسیم شده و از تفسیر منحنی ها، ارتباط پارامترهای مختلف انتشار آکوستیک با روند ترک خوردگی و شکست نمونه ها تحت آزمایش شکست هیدرولیکی بیان شده اند.

۴-۱) ساختار تحقیق

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی توسعه ترک خوردگی در آزمایش شکست هیدرولیکی با استفاده از انتشار آکوستیک در شش فصل پرداخته شده است. در فصل اول به مقدمه‌ای از تحقیق، تعریف مسئله، ضرورت انجام آن و روش تحقیق پرداخته شده است. فصل دوم، مبانی نظری و روش مورد استفاده در این تحقیق را توصیف می‌کند. به منظور دستیابی به بینشی دقیق‌تر و درکی روشن‌تر نسبت به مسئله و اهداف تحقیق نیاز به تئوری‌های تحقیق و مروری بر کارهای انجام شده قبلی است که در فصل سوم ارائه می‌شوند. تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها و آزمون‌های اولیه تعیین ویژگی‌های نمونه آزمایش در فصل چهارم شرح داده می‌شود. تحلیل و تفسیر نتایج آزمایش‌های شکست هیدرولیکی در ترکیبات تنش متفاوت و همچنین آزمایش‌های شکست هیدرولیکی جهت بررسی پارامتر شکاف از پیش موجود در فصل پنجم شرح داده می‌شود. نهایتاً در فصل ششم جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای کارهای آتی بیان می‌گردد.

فصل دوم

مبانی نظری

۲-۱) مقدمه

در این فصل، به مبانی نظری تحقیق پرداخته شده است. از جمله مباحث مطرح شده، شکست هیدرولیکی در اندازه‌گیری تنش‌های برجا، شکست هیدرولیکی در صنعت نفت و گاز و روش‌های انجام آن، مراحل شکست هیدرولیکی و معیارهای فشار شکست می‌باشد. همچنین، انتشار آکوستیک به همراه پارامترها و ویژگی‌های مهم آن ارائه شده است.

۲-۲) شکست هیدرولیکی (Hydraulic fracturing)

شکست هیدرولیکی در مباحث و زمینه‌های کاربردی مکانیک سنگ به منظور اندازه‌گیری تنش‌های برجا و در صنعت نفت و گاز برای افزایش توان تولید چاه‌ها با ایجاد و توسعه‌ی درزه‌ها و شکستگی‌های سنگ مخزن استفاده می‌شود. روش شکست هیدرولیکی برای اندازه‌گیری تنش‌های برجا، گمانه‌ای تا عمق مورد نظر حفر شده و بخشی از آن با استفاده از دو پکر^۱ متورم شونده که تحت فشار هستند آب‌بندی می‌شود. سپس با یک نرخ ثابت سیال به فضای میان دو پکر پمپ شده و فشار بر روی دیواره گمانه تا ایجاد شکست در سنگ افزایش می‌یابد. فشار حداکثر که در لحظه شکست دیواره گمانه ثبت می‌شود، فشار شکست^۲ نام دارد. زمانی که دبی سیال تزریق شده کاهش می‌یابد، شکستگی بسته می‌شود. فشاری که در آن شکستگی ایجاد شده، به طور کامل بسته می‌شود، فشار انسداد^۳ و فشاری که شکاف دوباره باز می‌شود، فشار بازگشایی مجدد^۴ نام دارد [2].

روش شکست هیدرولیکی برای اندازه‌گیری تنش‌های برجا، روند مشابهی با روش تحریک چاه‌های نفت و گاز دارد. ولی ترکیب سیال به کار رفته برای اندازه‌گیری تنش‌های برجا نسبت به سیال مورد استفاده در تحریک چاه‌های نفت و گاز به روش شکست هیدرولیکی، می‌تواند متفاوت باشد [3]. شکست هیدرولیکی در صنعت نفت و گاز شامل تزریق فشار بالا سیال شکست در چاه به منظور ایجاد ترک‌هایی در سنگ‌ها

¹ Packer

² Breakout Pressure

³ Shut-in Pressure

⁴ Reopening Pressure

است، که از طریق آن گاز طبیعی و نفت خام آزادانه‌تر جریان می‌یابند. وقتی فشار هیدرولیکی از چاه برداشته شود، مصالح پروپانت شکست هیدرولیکی، شکستگی‌ها را باز نگه می‌دارند. به منظور طراحی ایمن و بهینه‌ی این فرایند، ضروری است که پارامترهای موثر بر گسترش شکست هیدرولیکی قبل از اجرای آن بر سنگ مخزن مورد ارزیابی قرار گیرد [4].

تعیین راستای گسترش شکست و هندسه شبکه شکست ایجاد شده توسط فرایند شکست هیدرولیکی در افزایش نفوذپذیری مخزن نقش مهمی دارد. محیط مخزن حاوی شکستگی‌های طبیعی است و اندرکنش شکست هیدرولیکی با این شکستگی‌ها در تعیین هندسه شبکه شکستگی‌های ایجاد شده اهمیت زیادی دارد. توقف، عبور و بازشدگی، شرایط ممکن در برخورد شکست هیدرولیکی با شکستگی‌های طبیعی است. شکست هیدرولیکی به عوامل گوناگونی مانند ویژگی‌های محیطی که شکستگی در آن رشد می‌کند، بستگی دارد. ناپیوستگی‌های قرار گرفته در مسیر ترک و ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها از مهم‌ترین پارامترهای موثر بر روند پیشروی شکست هیدرولیکی و هندسه آن شناخته می‌شوند [5].

۲-۲-۱) روش‌های عملیات شکست هیدرولیکی در صنعت نفت و گاز

هدف اصلی از انجام فرایند شکست هیدرولیکی در پروژه‌های نفت و گاز شامل، افزایش نرخ جریان نفت یا گاز خروجی از مخازن دارای نفوذپذیری کم، افزایش نرخ جریان نفت یا گاز چاه‌های آسیب دیده، ارتباط دادن شکستگی‌های طبیعی موجود در سازند با چاه، کاهش افت فشار در اطراف چاه، افزایش ناحیه‌ی زهکشی شده یا مقدار تحت تاثیر سازند مرتبط با چاه و همچنین مرتبط ساختن بخش قائم مخزن به چاه مایل یا افقی است [6]. در صنعت نفت و گاز سه نوع شکست هیدرولیکی متفاوت وجود دارد، که بسته به نوع ساختار سنگ و ویژگی‌های سیال شکست، مورد استفاده قرار می‌گیرند، این سه نوع عبارتند از:

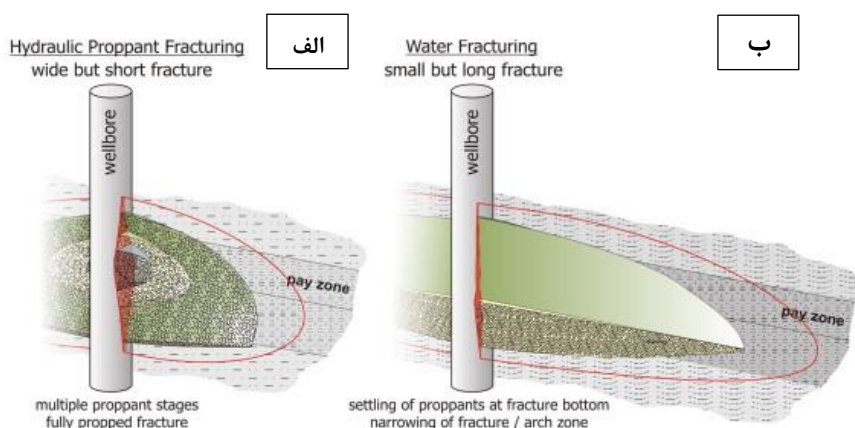
شکست هیدرولیکی پروپانت‌گذاری شده^۱ (HPF): پس از عملیات شکست هیدرولیکی، ترک‌های به-وجود آمده ممکن است به سرعت بسته شوند و یا ترمیم شوند. بنابراین سطح مورد نیاز برای تولید جریان نفت و گاز کم می‌شود. برای جلوگیری، یک عامل پروپانته معمولاً از جنس ماسه به سیال تزریق شده و در

¹ Hydraulic Propanant Fracturing

داخل شکست ایجاد شده قرار می‌گیرد. در این روش از سیالی با ویسکوزیته بالا و دارای چگالی بالاتر نسبت به پروپانت، به منظور افزایش هدایت‌پذیری شکست استفاده می‌شود. در این روش عرض شکستگی‌های ایجاد شده زیاد است ولی طول آن‌ها کم می‌باشد و معمولاً برای مخازن با نفوذپذیری متوسط تا زیاد انجام شده است. شکل ۱-۲-الف عملیات شکست هیدرولیکی با چند مرحله پروپانت‌گذاری را نشان می‌دهد [7].

شکست آبی^۱ (WF): در این روش از آب که حاوی مقدار کمی ماسه الک شده می‌باشد، به عنوان سیال شکست استفاده می‌شود. شکست‌های ایجاد شده در این روش دارای قطر کم و طول زیاد هستند و به دلیل طول زیاد شکست‌های ایجاد شده، در مخازنی که فاصله زیادی نسبت به چاه دارند این روش مناسب است. شکل ۱-۲-ب شکست آبی در یک مخزن را نشان می‌دهد [7].

شکست ترکیبی^۲ (HF): در این روش سیال شکست از نوعی ترکیب پلیمری، ژلاتین و آب تشکیل شده است. روش HF شامل مزیت‌های روش WF و HPF است. استفاده از ترکیب پلیمری باعث انتقال پروپانت‌ها به انتهای شکست می‌شود. شکست‌های ابتدایی توسط آب بوجود می‌آیند، همچنین هندسه این روش با دو روش دیگر متفاوت است. برتری این روش نسبت به روش HPF در طول زیاد شکست‌ها و نسبت به روش WF در طول موثر بیشتر منطقه پروپانت‌گذاری شده است [7].



شکل ۱-۲) شکست هیدرولیکی، الف) روش پروپانت‌گذاری شده ب) روش شکست آبی [7]

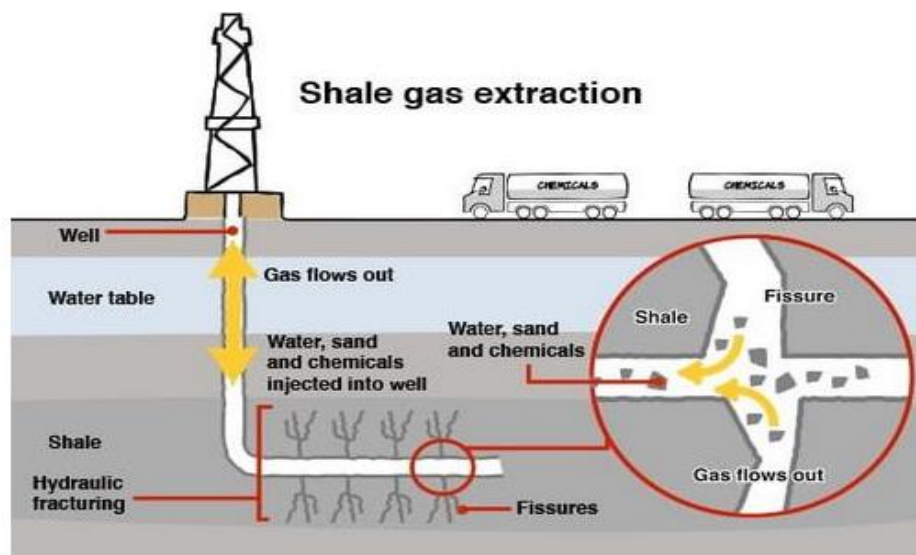
¹ Water Fracturing

² Hybrid Fracturing

۲-۲-۲) مراحل شکست هیدرولیکی و معیارهای فشار شکست

شکست هیدرولیکی ۴ مرحله دارد: ۱- عملیات مشبک‌کاری، در این مرحله در داخل چاه، انفجارهای کنترل شده‌ای صورت می‌گیرد. این انفجارها باعث می‌شوند در بدنه چاه ترک‌های کوچکی به وجود بیایند. این انفجارها به وسیله ابزاری صورت می‌گیرد که به آن تفنگ مشبک‌کننده می‌گویند. ۲- پمپاژ سیال به درون چاه و ایجاد شکاف اولیه، ۳- ادامه پمپاژ سیال و شروع پمپاژ پروپانت، ۴- توقف پمپاژ و خارج نمودن سیال شکاف از درون چاه [8]

سیالاتی که برای عملیات شکست هیدرولیکی استفاده می‌شوند، می‌توانند آب، ماسه و یا مواد شیمیایی باشند. در واقع با اصابت این مواد تحت فشار از طریق چاه‌های حفر شده به سطح سنگ‌ها، به سنگ فشار وارد می‌کنند تا جایی که فشار به مقدار فشار شکست برسد، سپس تزریق را آن قدر ادامه می‌دهند تا شکست هیدرولیکی رخ دهد. هنگامی که شکست رخ داد، سیال تزریق شده را از چاه خارج می‌کنند. برای جلوگیری از ایجاد گرفتگی در شکاف‌ها، همراه سیال فشار قوی، ماده‌ای به نام پروپانت نیز به داخل سنگ تزریق می‌کنند. در شکل ۲-۲ نمای کلی مراحل شکست هیدرولیکی آورده شده است [9].



شکل ۲-۲) نمای کلی مراحل شکست هیدرولیکی [9]

برای تعیین فشار شکست از معیارهای مختلف می‌توان استفاده شود. الف) در این معیار که توسط هابرت و ویلیس^۱ (۱۹۵۷) ارائه شده، فرض می‌شود که سنگ نفوذناپذیر، همسان، الاستیک و همگن است. همچنین فرض شده است که یکی از تنش‌های اصلی موازی با محور گمانه قائم، و برابر با وزن روباره می‌باشد. مطابق با معیار هابرت و ویلیس برای سنگ الاستیک و نفوذناپذیر، فشار شکست برابر است با

$$P_b = 3\sigma_h - \sigma_H - P_0 - T_0 \quad (3-1)$$

که P_b فشار شکست، یا مقدار فشار بحرانی سیال برای شروع شکست در دیواره‌ی گمانه می‌باشد، σ_h تنش افقی حداقل که عمود بر صفحه شکست است، σ_H تنش افقی حداکثر در امتداد شکست، P_0 فشار منفذی ساختار سنگی پیرامون شکست، و T_0 مقاومت کششی سنگ است [10]

ب) معیار هایمن و فیرهورست^۲ (۱۹۶۷) با فرض آن است که سنگ الاستیک و نفوذپذیر باشد:

$$P_b = \frac{3\sigma_h - \sigma_H - 2\eta P_0 + T_0}{2(1-\eta)} \quad (3-2)$$

در این رابطه P_b فشار شکست، P_0 فشار منفذی محیط، η ضریب پوروالاستیک (بین ۰ و ۱) در حالت خاص $\eta=0$ این معیار به صورت زیر ساده می‌شود [11].

$$P_b = \frac{3\sigma_h - \sigma_H + T_0}{2} \quad (3-3)$$

ج) معیار پین^۳ و همکاران (۱۹۸۳) این معیار برای محیط غیرمتخلخل و به صورت زیر پیشنهاد شده است [12].

$$P_b = 3\sigma_h - \sigma_H + T_0 \quad (3-4)$$

اگر چه از سه رابطه بالا برای یافتن ارتباط بین فشار شکست و تنش‌های برجا استفاده می‌شود، اما این روابط همه‌ی پارامترهای موثر بر شکست را در نظر نمی‌گیرند.

¹ Hubbert & Willis

² Haimson & Fairhurst

³ Pine

۲-۳) انتشار آکوستیک (Acoustic Emission)

انتشار آکوستیک سیگنال‌های ناگهانی میکرو لرزه‌ای الاستیک با فرکانس بالا می‌باشد که در اثر بارگذاری جسم ایجاد و از آن ساطع می‌شود. انتشار آکوستیک پدیده‌ای است که در آن امواج الاستیک زودگذر از طریق رهاسازی سریع انرژی در منابع محلی موجود در ماده ایجاد می‌شوند. آزمون انتشار امواج آکوستیک یکی از روش‌های آزمون‌های غیر مخرب^۱ است. وقتی که ماده‌ای جامد تحت تنش می‌باشد، عیوب موجود در آن باعث ایجاد امواج آکوستیک با فرکانس بالا می‌گردند. این امواج در ماده منتشر شده و می‌توان توسط سنسورهای خاصی آن‌ها را دریافت کرد و با تجزیه و تحلیل این امواج می‌توان نوع عیب، مکان و شدت آن را تعیین نمود [13].

در آزمون انتشار آکوستیک روی ماده سنسورهایی نصب می‌شوند پس از آن یک نیروی خارجی موضعی مانند یک بار ناگهانی مکانیکی و یا تغییر سریع درجه حرارت یا تغییر فشار به ماده در حال آزمایش اعمال می‌شود. امواج منتشر شده ناشی از بار خارجی تنش کوچکی را در ناپیوستگی‌ها به وجود می‌آورد و جابجایی‌های کوچک الاستیک یا پلاستیک در مواد، موجی با فرکانس بالا بازتاب می‌کند و به سطح ماده باز می‌گردد که توسط سنسورهایی دریافت شده و پردازش می‌شود و محل ناپیوستگی را مشخص می‌کند. هر چه تعداد سنسورها بیشتر باشد طبیعتاً محل ناپیوستگی بهتر و دقیق‌تر قابل تشخیص خواهد بود [14].

به طور کلی انتشار آکوستیک در سنگ‌ها می‌تواند به وسیله انسداد میکروترک‌ها و منافذ، جابجایی بین سطوح ریزترک‌ها، شروع و توسعه میکروترک‌ها، جابجایی بین دانه‌ای و ایجاد گسیختگی ایجاد شود. میزان میرایی امواج AE به خصوصیات مواد بستگی دارد. در مواد متخلخل و مواد ویسکوالاستیک این میرایی بیش از فلزات است. در مهندسی سنگ این روش برای رفتارنگاری پایداری سازه‌های زیرزمینی و شیروانی‌ها، مغارهای گاز و نفت، چاه‌های نفت و گاز و تاریخچه تنش استفاده شده است [14].

انتشار آکوستیک کاربردهای زیادی دارد که تعدادی از آن‌ها عبارتند از: ۱. تعیین مراحل مختلف آسیب سنگ و نوع شکست ۲. در تعیین محل وقوع زون آسیب حفاری‌های زیرزمینی^۲ (EDZ) کارایی دارد.

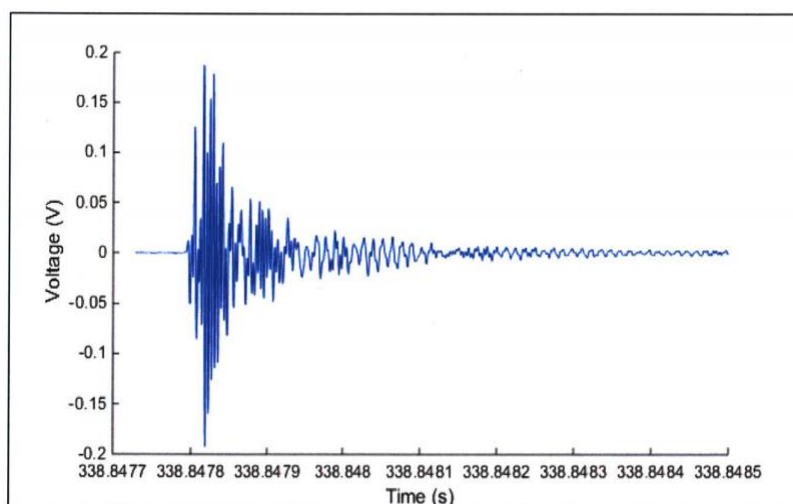
¹ Nondestructive testing – NDT

² Excavation Damage Zone

۳. به وسیله آن می‌توان تخمین مناسبی از تنش برجا و شرایط آن بدست آورد. ۴. می‌توان پایداری حفاری‌ها و سطوح شیب‌دار و پیش‌بینی ناپایداری‌های موجود را تحلیل و مورد بررسی قرار داد. ۵. تعیین b-value که بر اساس این پارامتر می‌توان وقوع زلزله را پیش‌بینی کرد [15].

۲-۳-۱) پارامترها و ویژگی‌های مهم انتشار آکوستیک

انتشار آکوستیک (AE): موجی الاستیک است که از انتشار سریع انرژی در داخل ماده ایجاد می‌شود. زمین لرزه در واقع یک انتشار آکوستیک بزرگ است. مثالی در شکل ۲-۳ آورده شده است [16].



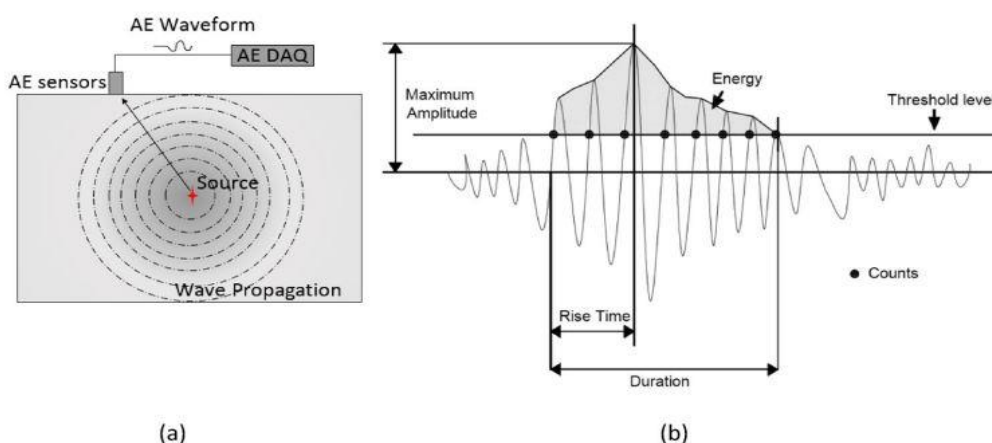
شکل ۲-۳) نمونه‌ای از سیگنال انتشار آکوستیک حاصل از آزمایش گرانیات [16]

سیستم انتشار آکوستیک: سیستمی که ضبط انتشار آکوستیک را راحت می‌کند. به طور معمول از سنسورها، پیش‌تقویت‌کننده‌ها و یک سیستم برداشت داده تشکیل شده است [14].

سنسور (حسگر):^۱ یک مبدل پیزوالکتریک است که موج ولتاژ الکتریکی تولید می‌کند. اغلب از چندین سنسور در یک سنسور استفاده می‌شود. هر سنسور، پیش‌تقویت‌کننده و پردازشگر سیگنال آکوستیک به عنوان یک کانال شناخته می‌شوند [14].

¹ Sensor

پیش تقویت کننده‌ها^۱: تقویت کننده سیگنال که ولتاژهای سنسور را به صورت الکتریکی افزایش می‌دهد. پیش تقویت کننده‌ها اغلب نزدیک سنسور قرار دارند تا کابل اتصال کوتاه باشد تا نویز الکترونیکی به حداقل برسد [14]. پس از آماده‌سازی تجهیزات، فرایند آزمون غیر مخرب انتشار آکوستیک آغاز می‌گردد. در این آزمون، سنسور به وسیله چسب یا با استفاده از روش‌های دیگر به سطح مورد نظر متصل می‌شود. مهم‌ترین ویژگی‌های سیگنال‌ها که مورد مطالعه قرار می‌گیرند عبارتند از:



شکل ۴-۲ (a) منبع AE (b) ویژگی مهم سیگنال‌های آزمون انتشار آکوستیک [17]

دامنه^۲: بالاترین دامنه‌ای که توسط AE بدست می‌آید. واحد اندازه‌گیری دامنه دسی‌بل می‌باشد.

رخداد^۳: تعداد تحریکات AE که توسط سنسور دریافت شده است.

حد آستانه^۴: سطح ولتاژی که پالس‌های بالاتر برای یافتن تحریکات AE در نظر گرفته می‌شوند.

مدت زمان (دوام)^۵: پارامتری که نمایان‌گر مدت زمانی است که انرژی در نمونه آزاد می‌شود.

زمان خیز^۶: به مدت زمان بین اولین باری که سیگنال بیشتر از آستانه تحریک می‌شود و زمانی که به حداکثر مقدار خود می‌رسد، زمان خیز گفته می‌شود [18].

¹ Pre-amplifiers

² Amplitude

³ Event

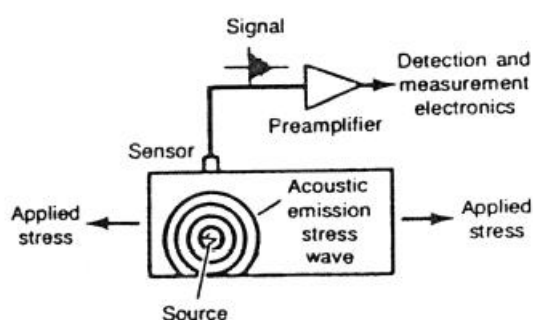
⁴ Threshold

⁵ Duration

⁶ Rise time

انرژی^۱: معمولاً مساحت زیر پوش سیگنال ایجاد شده است. اما در بعضی موارد مقدار مربع دامنه در نظر گرفته می‌شود.

شمارش (کانت)^۲: تعداد پالس‌های عبوری از حد آستانه که توسط پردازشگر سیگنال AE دریافت می‌شود [18]. در شکل ۵-۲ شماتیکی از پایه و اساس عملکرد روش انتشار آکوستیک ملاحظه می‌شود. در شکل مشاهده می‌شود به محض رشد ریزترک‌های جدید نمونه از خود امواج آکوستیک ساطع می‌کند. سنسورهای دستگاه این امواج آکوستیک را دریافت، و به دستگاه می‌فرستند و این رویدادها قابل مشاهده در سیستم است.



شکل ۵-۲) پایه و اساس عملکرد روش انتشار آکوستیک [19]

۲-۳-۲) طبقه بندی ترک‌ها

با استفاده از انتشار آکوستیک تولید شده، می‌توان نوع ترک خوردگی (کششی یا برشی) را بررسی کرد. حالت‌های مختلف ترک انواع مختلفی از شکل موج‌های AE را منتشر می‌کنند، طبقه بندی نوع ترک را با استفاده از پارامترهای AE می‌توان مورد مطالعه قرار داد. یکی از اولین مطالعات انجام شده برای طبقه بندی نوع ترک در سازه‌های بتنی با استفاده از آزمایش AE توسط JCMS (استانداردهای مصالح ساختمانی ژاپن^۳) انجام شده است. فرهیدزاده و همکاران نیز روش طبقه بندی ترک را بررسی کرده و با استفاده از روش مدل‌سازی مخلوط گاوسی^۴ (GMM)، داده‌های AE مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان

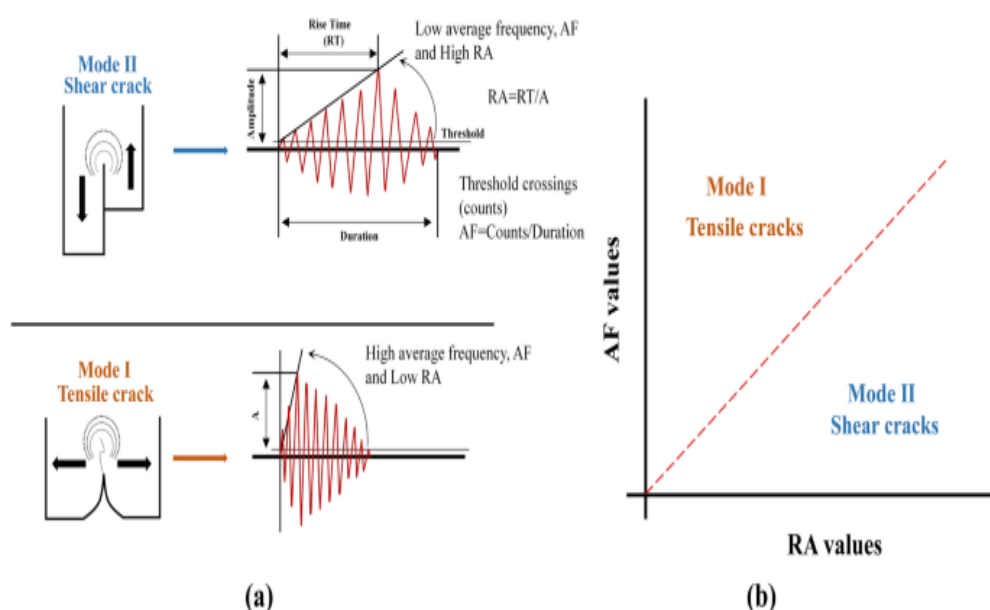
¹ Energy

² Count

³ Japanese construction materials standards

⁴ Gaussian mix modeling

داد این روش قادر به شناسایی سه مرحله فرایند بارگذاری، یعنی مرحله تولید ترک کششی، مرحله تغییر نوع ترک و مرحله تولید ترک برشی است [20]. ترک‌های کششی موجود در مقایسه با ترک‌های برشی امواجی با زاویه‌ی خیز پایین و فرکانس متوسط بالا تولید می‌کنند. تشخیص امواج آکوستیک را وقتی شکست کششی و برشی رخ می‌دهد و محدوده فرکانس متوسط و زاویه خیز برای ترک‌های کششی و برشی در شکل ۶-۲ مشاهده می‌شود [21].



شکل ۶-۲) روش طبقه بندی ترک‌ها (a) شکل موج (b) روش طبقه بندی ترک [21]

۴-۲) جمع بندی

رفتارنگاری انتشار آکوستیک در مقیاس آزمایشگاهی قادر به بررسی شکست با دامنه کم می‌باشد و به بررسی مناسب‌تر روند شکست هیدرولیکی در مقیاس میدانی کمک می‌کند. این مورد مزیت قبل توجهی را به دلیل عدم توانایی رفتارنگاری AE در مقیاس میدانی، برای مشاهده شکست‌های کششی با دامنه کم در عمق مخزن فراهم می‌کند. ترکیبی از فشار شکست و هندسه شکست در آزمایش‌های شکست هیدرولیکی و روش‌های رفتارنگاری AE می‌تواند شروع، گسترش و اتصال شکستگی‌های هیدرولیکی را تحت فشار هیدرولیکی تجزیه و تحلیل کند. رفتارنگاری AE یک گزینه موثر برای بررسی شکست و مکانیزم ناپایداری در نزدیکی چاه و نمونه آزمایشگاهی در معرض شکست هیدرولیکی می‌باشد.

فصل سوم

مرور ادبیات فنی موضوع

۳-۱) مقدمه

در چند دهه‌ای که از عمر روش شکست هیدرولیکی می‌گذرد، مطالعات گسترده‌ای بر روی نحوه اجرای روش و مولفه‌های تاثیرگذار بر روی نتایج حاصل از آن، توسط محققین و دانشمندان مختلف انجام شده است. در این فصل، به سابقه تحقیق‌های صورت گرفته در زمینه کاربرد انتشار آکوستیک در مطالعات آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی پرداخته شده است. همچنین، با توجه به اهداف تحقیق، تعدادی از مهمترین تحقیقات انجام شده در زمینه شکست هیدرولیکی و انتشار آکوستیک معرفی شده است.

۳-۲) مروری بر مطالعات انجام شده

شکست هیدرولیکی برای اولین بار در صنعت نفت و گاز برای ازدیاد برداشت در طی دهه ۱۹۳۰ مورد استفاده قرار گرفت که شرکت شیمیایی داو^۱ دریافت که با اعمال فشار سیال به اندازه کافی بزرگ، می‌توان سنگ‌های اطراف گمانه را شکافت تا اثر رفتارهای تحریک اسید را بهبود ببخشد. این روش توسط کلارک^۲ ابداع شد و سپس مطالعه روی شروع و گسترش شکست توسط هیمسون و فیرهارست^۳ توسعه یافت. هوبرت و ویلیس^۴ مطالعات کاملی را در زمینه مکانیزم شکست هیدرولیکی، تعیین جهت و حالت تنش‌های اصلی با استفاده از فرایند شکست هیدرولیکی انجام دادند [22].

اولین رفتار شکست هیدرولیکی غیراسیدی برای تحریک چاه در شهر کانزاس^۵ آمریکا در سال ۱۹۴۷ در یک چاه گاز در میدان هوگوتون^۶ انجام شد. از زمان معرفی این فناوری در سال ۱۹۴۹ بیش از ۲/۵ میلیون عملیات شکست هیدرولیکی انجام شده است. این عملیات در حال حاضر در حدود ۶۰ درصد در تمام چاه‌های حفاری شده انجام می‌شود. بر خلاف فناوری حفاری که در چند دهه گذشته بسیار توسعه

¹ Dow

² Clarck

³ Haimson & Fairhurst

⁴ Hubert & Willis

⁵ Kansas

⁶ Hugoton

یافته است، بیشترین توسعه فناوری شکست هیدرولیکی در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ صورت گرفته است [23].

استانچیتس^۱ و همکاران (۲۰۱۲) انتشار آکوستیک از آغاز شکست هیدرولیکی و رشد در نمونه‌های سنگی را مورد بررسی قرار داده‌اند. تجزیه و تحلیل نتایج AE، افزایش فعالیت AE و ضریب همبستگی مکانی را نشان می‌دهد، که به طور قابل توجهی نشانگر روند ادغام ریزترک‌ها در هنگام شکست هیدرولیکی است. مرحله اولیه شکستگی با شروع تغییر شکل حجمی سنگ ارتباط زیادی دارد [24].

همپتون^۲ در سال ۲۰۱۲ به خصوصیات شکست هیدرولیکی آزمایشگاهی با استفاده از انتشار آکوستیک پرداخت. رفتارنگاری AE در آزمایش‌های شکست هیدرولیکی، پدیده‌های متعددی از جمله رشد شکستگی از یک گمانه، ارتباط چاه‌های میانی، تغییر مجدد جهت شکستگی، شکست پوشش گمانه و بسیاری موارد دیگر را نشان داده است [13].

گوا^۳ و همکاران (۲۰۱۴) به مطالعه تجربی شکست هیدرولیکی برای شیل توسط حجم مخزن تحریک شده پرداخته‌اند. در این پژوهش آن‌ها آزمایش‌های شبیه‌سازی شکست هیدرولیکی رخنمون‌های شیل را انجام دادند، مورفولوژی شکست توسط سی تی اسکن با انرژی بالا مشاهده شده است. همچنین تصاویر سی تی اسکن با عکس شکستگی داخلی برای تجزیه و تحلیل ترکیب شده و شکست هیدرولیکی چاه افقی برای نمونه‌های شیل شبیه‌سازی شده است [25].

علاباد^۴ در سال ۲۰۱۴ به بررسی تجربی جنبه‌های ژئومکانیکی سازندهای غیر متعارف شکست هیدرولیکی پرداخته است. تعدادی آزمایش شکست هیدرولیکی بر روی نمونه‌های مصنوعی گچ انجام شده است. هدف از آزمایش‌ها بررسی دقیق تقاطع شکست هیدرولیکی با شکستگی‌های قبلی با ارزیابی برخی از عوامل حاکم بر نتایج آن است. علاوه بر این، انتشار همزمان چند شکستگی مورد بررسی قرار گرفته است [26].

¹ Stanchits

² Hampton

³ Guo

⁴ Alabbad

استوکرت^۱ و همکاران (۲۰۱۵) به انتشار شکستگی در ماسه سنگ، انتشار آکوستیک و مکانیک شکست پرداخته‌اند. آن‌ها یک سری آزمایش‌های شکستگی کششی تحت بارگذاری تک محوره و سه محوره انجام داده‌اند. نمونه‌های مکعبی سنگ با طول ۱۵۰ میلی‌متر و یک گمانه مرکزی با قطر ۱۳ میلی‌متر تهیه شده و داخل گمانه، لوله پلیمری برای ایجاد شکستگی‌های کششی ناشی از گمانه تحت فشار قرار گرفته است [27].

استانچیتس^۲ و همکاران (۲۰۱۵) به آزمایش شکست هیدرولیکی که توسط انتشار آکوستیک بررسی می‌شود، پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که شروع شکستگی و رفتار شکستگی با مایعات با ویسکوزیته بالا منجر به انتشار شکست پایدار قبل از شکست می‌شود، در حالی که شکستگی با مایعات با ویسکوزیته پایین منجر به انتشار شکستگی ناپایدار شده که تقریباً همزمان با شکست آغاز شده است. نظارت بر مکان-یابی‌های انتشار آکوستیک، نشان‌دهنده منطقه شکستگی ایجاد شده از جمله تقاطع با شکاف‌های از پیش موجود، انتشار مایع در طول شکاف‌ها، عبور از شکاف‌ها و نزدیک شدن به مرزهای بلوک است [28].

ژائو^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۶ مطالعه آزمایشگاهی اثرات بین لایه‌ها در انتشار شکست هیدرولیکی در سازند شیل را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که فشار شکست با افزایش ضخامت و مقاومت بین لایه‌ای تحت میدان تنش و نرخ تزریق افزایش می‌یابد. برای بلوک‌های با ضخامت و مقاومت بالا، شکست هیدرولیکی در عبور از آن‌ها مشکل دارد و مستعد انحراف در امتداد صفحات لایه زیرین است و اثر شکستگی خوب نیست. با این حال، برای بلوک‌های با لایه‌های نازک و کم، ترک‌های شاخه‌ای بلند بیشتری در امتداد شکستگی ایجاد می‌شوند که برای تشکیل شبکه شکستگی مفید است [29].

شیرازی و همکاران (۱۳۹۶) بر روی تاثیر ویسکوزیته سیال و قطر چال بر شکست هیدرولیکی به کمک دستگاه سه محوره واقعی مطالعه کردند. آزمایش‌ها به کمک این دستگاه بر روی نمونه‌های بتنی با ابعاد ۳۰ سانتی‌متر مکعب انجام شده که در مرکز آن‌ها سوراخ با قطرهای ۳۰، ۵۰ و ۸۰ میلی‌متر ایجاد شده

¹ Stoeckhert

² Stanchits

³ Zhao

است. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان داده که با افزایش قطر گمانه، فشار شکست سنگ کاهش می‌یابد. ۳ نوع روغن هیدرولیک با ویسکوزیته‌های متفاوت در این مطالعه استفاده شده است و نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ویسکوزیته سیال، فشار شکست کاهش می‌یابد [3].

مائو^۱ و همکاران (۲۰۱۷) به آزمایش شکست هیدرولیکی روی نمونه‌های گرانیت پیش ترک خورده در مقیاس بزرگ پرداخته‌اند. مسیر انتشار ترک معمولاً در یک جهت ثابت نیست و به تدریج به سمت جهت حداکثر تنش افقی منحرف می‌شود. انتشار آکوستیک در کل فرایند شکستگی توسط یک سیستم اندازه-گیری انتشار آکوستیک ثبت شده است. مقدار اختلاف تنش افقی در طول آزمایش‌ها به وضوح مسیر انتشار ترک را در طول فرایند شکستگی تحت تاثیر قرار داده است [30].

لی^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۷ تحلیل تجربی رشد شکست هیدرولیکی و پاسخ انتشار آکوستیک در یک سازه لایه‌ای را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج تجربی نشان داده است که هندسه‌های مختلف شکست هیدرولیکی را می‌توان بر اساس منحنی فشار تزریق و پاسخ‌های انتشار آکوستیک مشخص کرد. اغلب شکست برشی در نمونه‌های شیل وجود دارد، شکست برشی و کششی در مناطق شکست هیدرولیکی ایجاد شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که نرخ تزریق متغیر موثر بوده و باعث افزایش طول شکستگی می‌شود [31].

فانگ^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۷ یک تفسیر هندسی گسترش شکست هیدرولیکی و انتشار آکوستیک را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که توزیع رخداد های AE هندسه شکستگی داخلی نمونه‌های سنگ را به خوبی نشان می‌دهد. AE در مکانی که هندسه شکست هیدرولیکی (HF) پیچیده‌تر و متراکم‌تر می‌باشد وجود دارد [32].

¹ Mao

² Li

³ Fang

لیانگ^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۷ ویژگی‌های پاسخ زغال سنگ در معرض شکست هیدرولیکی، بررسی زمان واقعی فشار گمانه و انتشار آکوستیک را مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد می‌توان از پاسخ انتشار آکوستیک برای شناسایی جهت شکستگی در حین شکست هیدرولیکی استفاده کرد. استفاده از این روش گزینه‌ای موثر برای شفاف‌سازی شکستگی و مکانیزم ناپایداری در نزدیکی گمانه در معرض شکست هیدرولیکی است [33].

لی و همکاران (۲۰۱۸) پاسخ انتشار آکوستیک آزمایش شکست هیدرولیکی در شیل لایه‌ای را بررسی کرده‌اند. در این مطالعه، شکست هیدرولیکی آزمایشگاهی روی نمونه‌های شیل حاوی سطح لایه‌بندی مختلف^۲ (BPs) همراه با رفتارنگاری انتشار آکوستیک (AE) انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد امواج برشی در اطراف دیواره چاه قبل از شروع شکست، شناسایی شده‌اند و فشار تزریق پایدار و چند رویداد AE با دامنه کم در طول BP ممکن است نشان‌دهنده مرحله نشت سیال باشد که رویدادهای AE برشی و کششی و تغییرات شدید فشار در طول تولید یک شبکه شکستگی و فعال‌سازی چندین BP را شامل می‌شود [34].

ناوی^۳ و همکاران (۲۰۱۸) رابطه بین وقایع لرزه‌ای و شکستگی ناشی از شکست هیدرولیکی را در آزمایش‌های آزمایشگاهی تحت شرایط بارگذاری تک محوره با استفاده از بلوک‌های گرانیات و شیل با رفتارنگاری انتشار آکوستیک (AE) را بررسی کرده‌اند. همچنین از رزین آکریلیک^۴ حرارتی مخلوط شده با یک ترکیب فلورسنت به عنوان سیال شکست استفاده کرده‌اند و بلافاصله پس از شکستگی با گرم شدن آن، درون بلوک‌ها را می‌توان مشاهده کرد. کانون‌های AE به دست آمده و مناطق نفوذ رزین پس از شکستگی در هر دو طرف در امتداد محور بارگذاری از حفره شکستگی برای همه نمونه‌ها مشاهده شده است، اگرچه AE فقط در یک طرف برای بعضی از نمونه‌ها متمرکز بوده است [35].

¹ Liang

² Bedding planes

³ Naoi

⁴ Acrylic

جیانگ^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۹ به شکست هیدرولیکی چرخشی مغزه‌های گرانیث پوچئون^۲ و تاثیر آن بر فشار شکست، دامنه‌های انتشار آکوستیک و نرخ تزریق پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد تزریق چرخشی آب فشار شکست را تقریباً تا ۲۰ درصد کاهش می‌دهد و حداکثر دامنه انتشار آکوستیک به طور متوسط ۱۴ دسی‌بل کاهش می‌یابد. شکست هیدرولیکی چرخشی شکستگی‌های پیچیده‌ای با شاخه‌های بیشتر و روزنه‌های کوچک‌تر در مقایسه با تزریق مداوم ایجاد می‌کند. میانگین تزریق نمونه‌های شکسته شده توسط تزریق چرخشی کمتر از میزان نرخ تزریق در نمونه‌های شکسته شده توسط تزریق مداوم است [36].

وانگ^۳ و همکاران (۲۰۲۰) بررسی تجربی شکست هیدرولیکی در سازند شیل لایه‌ای را انجام داده‌اند. نتایج نشان داد که شکست هیدرولیکی از لایه‌های تحت اختلاف تنش بالا عبور می‌کند، در حالی که همراه با لایه‌های تحت اختلاف تنش کم گسترش می‌یابد [9].

جیانگ^۴ و همکاران (۲۰۲۰) به ویژگی‌های انتشار آکوستیک در شکست هیدرولیکی بر اساس یک مطالعه آزمایشگاهی پرداخته‌اند. شمارش AE، انرژی، فرکانس حداکثر، طبقه‌بندی ترک برای چهار نمونه سنگ تحت شرایط تنش سه محوره بررسی شده است. پاسخ چند فرکانس AE برای نشان دادن لحظه تشکیل ماکروترک شکست هیدرولیکی پیشنهاد شده است. ترک کششی در تمام آزمایش‌های شکست هیدرولیکی بیشتر است. [37].

به طور کلی روند شکست هیدرولیکی را می‌توان از روی رفتار مکانیکی نمونه‌ها و توزیع مکانی-زمانی AE تخمین زد. بنابراین، در شرایط تنش که در آن فشار شکست ناشی از تزریق سیال با چندین نقطه شروع ترک است، انتشار آکوستیک مشاهده شده تصویری کاملاً منطقی از شکست هیدرولیکی ارائه می‌دهد و برای پیش‌بینی الگوی ترک نهایی و نقاط شروع ترک استفاده می‌شود و از پتانسیل خوبی نسبت به بقیه روش‌های موجود برخوردار است. لازم به ذکر است که علاوه بر موارد اشاره شده، تحقیقات دیگری برای درک بهتر شکست هیدرولیکی و انتشار آکوستیک انجام شده‌اند که در جدول ۱-۳ به آن‌ها اشاره شده است.

¹ Zhuang

² pocheon

³ Wang

⁴ Jiang

جدول ۱-۳) تحقیقات انجام شده در زمینه شکست هیدرولیکی و انتشار آکوستیک

ردیف	محقق	موضوع	شرح
۱	امی و همکاران (۲۰۰۰) [4]	مطالعات تجربی رفتار شکست سنگ در رابطه با شکست هیدرولیکی	با افزایش طول ترک مقاومت نسبت به شکست افزایش می‌یابد، با این فرض که بین سطوح ترک (همبستگی و اصطکاک) وجود دارد. مسیر ترک مشاهده شده تصادفی است.
۲	ایشیدا (۲۰۰۱) [38]	نظارت انتشار آکوستیک بر شکست هیدرولیکی در شرایط آزمایشگاهی و میدانی	شکست برشی در نمونه‌های با دانه‌های بزرگ‌تر بیشتر و شکست کششی در نمونه‌های با دانه‌های کوچک‌تر بیشتر است. نرخ شمارش AE با بسته شدن و بازگشایی ترک‌های ناشی از شکست هیدرولیکی افزایش یافته است.
۳	کینگ و همکاران (۲۰۰۱) [39]	مطالعات خواص فیزیکی ماسه سنگ‌ها تحت شرایط تنش سه محوره واقعی	سیستم سه محوری واقعی در ابتدا برای تعیین انتشار آکوستیک، سرعت اولتراسونیک، نفوذپذیری سیال و خواص ارتجاعی بر روی نمونه‌های سنگ مکعبی طراحی شد که در آن مجموعه‌ای از شکستگی‌ها و ریزترک‌های جهت‌دار معرفی شده‌اند.
۴	لومه و همکاران (۲۰۰۲) [40]	آزمایش‌های شکست هیدرولیکی در مقیاس آزمایشگاهی	تغییرات فشار ثبت شده در لحظه شکست به جریان سیال و نرخ پمپ بستگی دارد.
۵	اوناند (۲۰۰۲) [41]	اندازه‌گیری انتشار آکوستیک در مکانیک سنگ مرتبط با نفت	یک مطالعه کلی از فعالیت انتشار آکوستیک در سنگ‌های رسوبی، در درجه اول در ماسه سنگ ارائه شده است. گچ، سنگ آهک و شیل نیز مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، اما به میزان بسیار کمتری زیرا فعالیت AE در این مواد کم است.
۶	رائو و همکاران (۲۰۰۵) [42]	تجزیه و تحلیل b-value و Ib-value بهبود یافته انتشارات آکوستیک همراه با شکستگی سنگ	AE تولید شده در طول شکست فشاری یک سنگ شکننده با استفاده از یک نرم افزار برای محاسبه b-value و همچنین Ib-value بهبود یافته مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج با هر دو روش برای ارزیابی شکستگی به دست آمده است.
۷	گروس (۲۰۰۸) [14]	آزمایش انتشار آکوستیک	انتشار آکوستیک در مقایسه با سایر روش‌های آزمایش غیر مخرب، می‌تواند تغییرات رفتار مواد را در مدت زمان طولانی و بدون جابجایی یکی از اجزای خود یعنی سنسورها نظارت کند. این روش به دلیل توانایی تشخیص انتشار ترک که نه تنها در سطح بلکه در اعماق مواد، بسیار کارآمد است.
۸	کارپینتری و همکاران (۲۰۰۸) [43]	انتشار آکوستیک و پدیده‌های بحرانی	روش انتشار آکوستیک از مبدل‌هایی برای تشخیص رویدادهای AE ناشی از رشد ترک در سازه تحت بارگذاری خارجی استفاده می‌کند. این تکنیک مشابه روشی است که در کنترل زلزله به کار می‌رود.
۹	چنگ و همکاران (۲۰۱۲) [44]	بررسی آزمایش شکست هیدرولیکی برای کاربرد	هدف بررسی تاثیر نرخ جریان تزریق بر پارامترهای منحنی فشار است که عبارتند از فشار شروع، زمان انتشار، فشار شکست، فشار

		استخراج انرژی زمین گرمایی	پس از شکست، هندسه شکست و نفوذپذیری شکست است.
۱۰	فرهیدزاده و همکاران (۲۰۱۳) [45]	نظارت انتشار آکوستیک دیواره برشی بتن مسلح با تجزیه و تحلیل مبتنی بر مقدار b-value	دیوارهای برشی بتن مسلح اجزای سازه‌ای حیاتی در سیستم‌های مقاوم در برابر نیروی گرانشی و جانبی هستند. هدف از این کار طراحی و اعتبارسنجی یک سیستم نظارتی است که قادر به ارزیابی سریع و خودکار آسیب دیوارهای برشی بتن مسلح باشد.
۱۱	چیتالا و همکاران (۲۰۱۳) [46]	انتشار شکست هیدرولیکی تحت تنش‌های مختلف اعمال شده با استفاده از انتشار آکوستیک	مکان‌های لرزه AE و محتوای فرکانس رویداد تجزیه و تحلیل و مکانیزم‌های کانونی محاسبه شده است.
۱۲	لیچون و همکاران (۲۰۱۳) [47]	مطالعه تجربی انتشار شکست هیدرولیکی در سنگ‌های آتشفشانی با استفاده از فناوری CT صنعتی	شکستگی‌ها در امتداد حداکثر جهت تنش افقی منتشر می‌شوند و خواص مکانیکی سنگ در نزدیکی گمانه عوامل کلیدی کنترل شروع و انتشار شکستگی‌های هیدرولیکی هستند.
۱۳	کارپینتری و همکاران (۲۰۱۳) [48]	تاثیر آسیب در پارامترهای انتشار آکوستیک	آزمایش‌های شکستگی در اندازه‌های مختلف نمونه از مواد سیمانی و سنگی انجام می‌شود در حالی که مکان سنسور نسبت به منطقه ترک تغییر می‌کند.
۱۴	چن و همکاران (۲۰۱۴) [49]	بررسی گسترش شکست هیدرولیکی با انتشار آکوستیک	سیستم نظارت انتشار آکوستیک تغییر شکل محیطی و مکان رشد ترک یا تعداد رشد ترک را در طول آزمون ثبت می‌کند.
۱۵	دهقان و همکاران (۱۳۹۳) [50]	مکانیزم شروع و گسترش شکست با استفاده از یک سیستم آزمایش شکافت هیدرولیکی سه محوره بر روی نمونه‌هایی از بلوک سیمانی	تمرکز تنش در اطراف چاه به میزان مشخص، فشار شکست در سنگ را افزایش می‌دهد، به گونه‌ای که وجود شکافت طبیعی در دیواره چاه این تمرکز تنش را از بین برده و منجر به کاهش فشار شروع شکست به حدود دو سوم فشار در نمونه‌های بدون شکافت طبیعی شده است.
۱۶	لی و همکاران (۲۰۱۵) [51]	کنترل فشار بر شکست هیدرولیکی در شیل‌ها توسط نظارت بر انتشار آکوستیک	فشار محصورکننده تاثیر زیادی در پیچیدگی صفحات شکستگی و انتشار آکوستیک دارد، فشار محصورکننده بالا باعث افزایش مقاومت و تغییر شکل شیل در طی فرایند فشردگی می‌شود.
۱۷	لی (۲۰۱۵) [16]	انتشار آکوستیک در شکافت هیدرولیکی گرانیات باره	انتشار آکوستیک را می‌توان به روش‌های مختلفی تجزیه و تحلیل کرد، به صورت گروهی در رویدادهایی که تعدادی از انتشارات به هم می‌رسند و یا به صورت انتشارهای فردی بر اساس دامنه، انرژی یا محتوای فرکانس، در حالی که مکان‌یابی منبع از رخدادها استنباط می‌شود.
۱۸	خزایی و همکاران (۲۰۱۵) [52]	تعیین کمیت آسیب سنگ با استفاده از انرژی انتشار آکوستیک ثبت شده در طول آزمایش فشاری تک محوره	انرژی‌های انتشار آکوستیک (AE) ثبت شده در طی ۷۳ آزمایش فشردگی تک محوری بر روی نمونه‌های سنگ ضعیف تا بسیار قوی، با بررسی تغییرات در مقادیر b-value، کل انرژی ثبت شده و حداکثر انرژی ثبت شده برای هر آزمایش تحلیل شده‌اند.

۱۹	پائول و همکاران (۲۰۱۵) [53]	انتشار آکوستیک برای توصیف انتشار ترک در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با فشار مبتنی بر کشش (SHCC)	کاربرد AE در SHCC می‌تواند گزینه مناسبی برای تجزیه و تحلیل رشد ترک در نمونه‌ها تحت بار افزایشی، مکان ترک‌ها و مهم‌تر از همه شناسایی ترک خوردگی نمونه و شکست یا لغزش الیاف باشد.
۲۰	استکهرت و همکاران (۲۰۱۵) [54]	انتشار شکست در ماسه سنگ و تخته سنگ و آزمایش‌های آزمایشگاهی، انتشارات آکوستیک و مکانیک شکست	بررسی فرآیندهای شروع و انتشار شکستگی در یک سنگ بسیار ناهمسانگرد و انجام یک سری آزمایش‌های شکست کششی تحت بارگذاری تک محوره و سه محوره
۲۱	ساگار (۲۰۱۵) [20]	یک مدل از انتشار آکوستیک تولید شده در طول آزمایش فشرده‌سازی مواد سیمانی برای طبقه بندی نوع ترک	با افزایش اندازه سنگدانه درشت در بتن، رویدادهای AE ایجاد شده مربوط به ترک برشی کاهش یافته است و مقدار b-value در نقطه حداکثر بارگذاری به حداقل رسیده است. در زمان شکست، AE مربوط به ترک برشی به شدت افزایش یافته است.
۲۲	بهنیا و همکاران (۲۰۱۵) [55]	تشخیص آسیب تیرهای بتنی SFRC تحت پیچش خالص با ادغام انتشار آکوستیک و عملکرد آسیب وایبول	b-value برای تحلیل بیشتر آسیب و فرآیند شکست ارائه شده است. خواص شکست پیچشی با پارامترهای AE در ارتباط بود، و نشان داده شد که بزرگی پارامترهای AE به طور قابل توجهی تحت تاثیر خواص مکانیکی نمونه‌ها قرار دارد.
۲۳	زکی و همکاران (۲۰۱۵) [56]	ارزیابی غیر مخرب برای نظارت بر ترک خوردگی در بتن: بررسی قابلیت روش انتشار آکوستیک	انتشار آکوستیک به طور موثر ترک خوردگی سازه‌های بتنی را در مراحل اولیه تشخیص می‌دهد. توانایی روش AE برای تشخیص ترک خوردگی در زمان واقعی، آن را به یک گزینه بهتر نسبت به بقیه روش‌ها تبدیل کرده است.
۲۴	ساگار و همکاران (۲۰۱۵) [57]	مشاهده اثر کایزر در سازه‌های بتن مسلح و استفاده از آن برای ارزیابی آسیب	تلاش شده است تا اثر کایزر به عنوان معیاری برای آسیب در تیرهای RC مورد مطالعه قرار گیرد. مشاهده شده که تیرهای RC ساخته شده با بتن با مقاومت بالا تحت بارگذاری چرخه‌ای افزایشی، قبل از نقطه شکست، اثر کایزر آشکاری را نشان داده‌اند.
۲۵	سلیبا و همکاران (۲۰۱۵) [58]	تجزیه و تحلیل تجربی رشد ترک در بتن با روش انتشار آکوستیک	تعداد رویدادهای AE با کاهش عمق شکاف افزایش می‌یابد و یک اتلاف انرژی AE در شروع ترک در تیرهای بدون شکاف مشاهده می‌شود. علاوه بر این، عمق شکاف بر ویژگی‌های AE، فرآیند انتشار ترک و شکنندگی بتن تاثیر دارد.
۲۶	خدایار (۱۳۹۵) [59]	بررسی تاثیر ریزترک‌های القایی بر مکانیزم شکست نمونه‌های سنگی	با افزایش ریزترک‌های القایی از میزان شکنندگی نمونه‌های سنگی کاسته شده است. با توجه به روش انتشار آکوستیک با افزایش ریزترک‌های القایی ناشی از حرارت، نسبت ریزترک‌های برشی به کششی در حین بارگذاری افزایش یافته است.
۲۷	ناظری و همکاران (۱۳۹۵) [60]	بررسی تاثیر نانو ذرات سیلیس بر مقاومت و مکانیزم شکست مواد پایه سیمانی با استفاده از سیستم انتشار آوایی	نتایج بیانگر رابطه خطی بین مقاومت و چقرمگی شکست مد برش و کشش نمونه‌ها بوده است، با افزایش و یا کاهش مقدار نانو ذرات سیلیس، مقاومت و چقرمگی شکست در هر دو مد شکست کاهش می‌یابد.
۲۸	مپلاسکاس و	نظارت انتشار آکوستیک	AE می‌تواند تفاوت بین حالت‌های شکست را با استفاده از

	همکاران [61] (۲۰۱۶)	گرانیت تحت بارگذاری خمشی و برشی	تحلیل ویژگی‌های ساده بر اساس فعالیت بارگذاری اولیه مشخص کند.
۲۹	رودریگز (۲۰۱۶) [62]	کاربردهای انتشار آکوستیک برای ارزیابی یکپارچگی ساختاری سنگ‌ها	فرآیند ترک خوردگی در مونزوگرانیت شکننده، انفجاری و موضعی است و شامل آزادسازی بالای انرژی AE است. در مقابل، سنگ مرمر ترک خوردگی مداوم، تدریجی و پراکنده‌ای را نشان می‌دهد که در مقایسه با مونزوگرانیت، سطوح پایین انرژی AE را آزاد می‌کند.
۳۰	ژائو و همکاران [63] (۲۰۱۶)	مطالعات آزمایشگاهی تاثیر میان لایه‌ها بر روی انتشار شکست هیدرولیکی در سازند شیل	فشار شکست با افزایش ضخامت میان لایه‌ها و مقاومت بین بافت‌ها افزایش می‌یابد.
۳۱	نگی و همکاران [64] (۲۰۱۶)	نظارت بر انتشار آکوستیک در کوارتزیت دهلی تحت بارگذاری فشاری	روند شکست یک سنگ شکننده به طور قابل توجهی به شروع و انتشار ترک بستگی دارد. نمونه تا زمانی که ترک‌های جدید شروع به گسترش نکرده‌اند، خاصیت ارتجاعی نشان داده است. کل انرژی کرنشی ذخیره شده توسط نمونه به صورت ناگهانی آزاد شده است.
۳۲	دهقان و همکاران [65] (۱۳۹۶)	مطالعه آزمایشگاهی تاثیر شکاف از پیش موجود بر گسترش شکافت هیدرولیکی تحت تنش‌های سه محوره واقعی	نتایج آزمایشگاهی دو رفتار اساسی از گسترش شکافت هیدرولیکی در نقطه برخورد و بر هم کنش با شکاف از پیش موجود را نشان می‌دهد؛ قطع شدگی و عدم قطع شدگی. این رفتارها می‌توانند با استفاده از روابط میان زوایای شیب و امتداد و تنش‌های برجا تعیین شوند.
۳۳	ایشیدا و همکاران [66] (۲۰۱۷)	روش پیشنهادی ISRM برای نظارت انتشار آکوستیک آزمایشگاهی	هدف از این روش پیشنهادی، توصیف تنظیمات آزمایشی و دستگاه‌های مورد استفاده برای نظارت AE در آزمایش‌های آزمایشگاهی سنگ است.
۳۴	یان و همکاران [67] (۲۰۱۷)	ویژگی‌های مکانیکی و ویژگی- های انتشار آکوستیک سنگ‌ها با مقیاس‌های عرضی مختلف	۱. با افزایش مقیاس عرضی، مقاومت فشاری تک محوره سنگ‌ها در ابتدا کاهش می‌یابد و سپس افزایش می‌یابد. ۲. مقیاس عرضی بر حداکثر مقدار رویدادها و دامنه انتشار آکوستیک تاثیر می‌گذارد و با افزایش آن میزان آسیب سنگ‌ها در ابتدا کاهش می‌یابد و سپس افزایش می‌یابد.
۳۵	ژانگ و همکاران [68] (۲۰۱۷)	ویژگی‌های انتشار آکوستیک و مکانیزم شکست سنگ تحت نرخ‌های بارگذاری مختلف	۱. روند کلی تغییرات تنش و کرنش تحت تاثیر نرخ بارگذاری قرار نمی‌گیرد. ۲. با افزایش نرخ بارگذاری، رویدادهای AE و نرخ انرژی کرنش در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. ۳. ذرات درون نمونه به طور مداوم تحت فشار جابجا می‌شوند. این فرآیند با اتلاف انرژی از طریق تولید ترک‌های کششی و برشی همراه است.
۳۶	ویو و همکاران [69] (۲۰۱۷)	اثر اندازه نمونه‌های بتنی بر ویژگی‌های انتشار آکوستیک در شرایط فشرده‌سازی تک	با افزایش اندازه مصالح، مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های بتنی به تدریج کاهش یافته است. رابطه غیرخطی بین AE و سطح تنش مشاهده شده و مقدار تجمعی AE در تنش حداکثر

		محوره	رشد غیرخطی با افزایش اندازه ذرات بتن نشان داده است.
۳۷	چن و همکاران (۲۰۱۷) [70]	تجزیه و تحلیل شکست و ویژگی‌های سیگنال انتشار آکوستیک یک نمونه گچ تحت بارگذاری تک محوره	با استفاده از سه شاخص باند فرکانسی حداکثر انرژی، حداکثر درصد انرژی و حداکثر انرژی لحظه‌ای می‌توان گسیختگی نمونه و انفجار سنگ در معادن گچ را پیش‌بینی کرد و از آن برای بهبود دقت و کارایی سیستم‌های هشدار استفاده کرد.
۳۸	کومودلی (۲۰۱۷) [71]	انتشار آکوستیک و تغییر رسانایی AC در نمونه‌های ماسه سنگ متخلخل تحت بارگذاری تک محوره	تخلخل بالای نمونه‌ها اجازه می‌دهد تا تاثیر غلظت آب بر تغییرات رسانای الکتریکی و فعالیت AE در طول فشرده‌سازی بررسی شود. این مشاهدات در بررسی شکست مواد و وقوع سیگنال‌های الکتریکی پیش لرزه‌ای اهمیت زیادی دارند.
۳۹	ژو و همکاران (۲۰۱۷) [72]	مطالعه تجربی مکان یک منبع انتشار آکوستیک با در نظر گرفتن شکست در محیط‌های مختلف	در روش‌های مکان‌یابی منبع انتشار آکوستیک، فرض می‌شود که امواج آکوستیک در امتداد خطوط مستقیم انتشار می‌یابند و مکان منبع با سرعت موج متوسط تعیین می‌شود. به دلیل ناهمگونی مواد، نتایج مکان‌یابی اغلب با الزامات لازم مطابقت ندارند. به همین دلیل، یک روش مکان‌یابی منبع AE با در نظر گرفتن شکست در محیط‌های مختلف پیشنهاد شده است.
۴۰	لاسیدونیا و همکاران (۲۰۱۷) [73]	انتشار آکوستیک و تغییرات فرکانس در نمونه‌های بتنی تحت خمش چهار نقطه‌ای	حالت شکست شناسایی شد و همبستگی بین انرژی‌های پراکنده و ساطع شده مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، تغییرات در فرکانس خمش طبیعی تولید شده توسط گسترش ترک تحت بارگذاری، شناسایی و در ارتباط با انرژی AE تجمعی قرار گرفت.
۴۱	پرم و همکاران (۲۰۱۷) [74]	نظارت انتشار آکوستیک بر تیرهای بتن مسلح تحت خمش چهار نقطه‌ای	با افزایش سطح آسیب، مقادیر پارامترهای AE مانند شمارش، ضربه‌ها، زمان افزایش، انرژی و مدت زمان به جز فرکانس متوسط افزایش یافت. این نتایج با نتایج مشاهدات بصری با توجه به حالت ترک‌ها همزمان بوده است.
۴۲	لکی روحانی و همکاران (۱۳۹۷) [75]	پارامترهای موثر بر فشار شکست در آزمون شکست هیدرولیکی، مدلسازی به روش تفاضل محدود	تغییرات شعاع گمانه در حالت تنش‌های برجای همسان، تاثیری بر فشار شکست ندارد، اما در حالت تنش‌های ناهمسان، افزایش شعاع گمانه موجب کاهش فشار شکست می‌شود و با افزایش اختلاف بین تنش‌های برجا، نرخ کاهش فشار شکست نیز افزایش می‌یابد.
۴۳	مونوز و همکاران (۲۰۱۸) [76]	فرآیندهای انتشار آکوستیک در طول فشرده‌سازی شن و ماسه با فشار بالا	در تنش کم، جریان دانه (لغزشی یا غلتاندن) با کمترین فرکانس مرکزی و حداکثر مشخص می‌شود، در حالی که در تنش‌های بیشتر، اصطکاک بین دانه‌ای و تکه تکه شدن دانه مقادیر بالاتری دارند. داده‌های انتشار آکوستیک رفتار بسیار پیچیده‌تری نسبت به آنچه که توسط روابط تنش-کرنش پیشنهاد می‌شود، نشان می‌دهد.
۴۴	دامنی و همکاران (۲۰۱۸) [77]	بررسی تجربی اثر تنش برجا و سیال تزریقی بر مکانیزم شکست هیدرولیکی با استفاده	توزیع رخداد‌های انتشار آکوستیک شبکه شکستگی پیچیده‌تری در سنگ خشک و شکست نوع کششی در سنگ اشباع شده از آب نمک را نشان می‌دهد.

		از انتشار آکوستیک	
۴۵	دکسینگ و همکاران (۲۰۱۸) [78]	خصوصیات مقطعی انتشار امواج آکوستیک از زغال سنگ تحت فشار چند مرحله‌ای سه محوره واقعی	در مرحله بارگذاری اولیه، AE ها بسیار فعال هستند. در بخش اولیه مرحله توقف بارگذاری، تعداد AE به تدریج کاهش می‌یابد تا زمانی که تقریباً در آن مرحله متوقف شود. مقادیر شمارش AE در طول شکست برای همه مراحل بارگذاری، ویژگی‌های مقطعی را نشان می‌دهند و یک الگوی کلی ثابت را نشان می‌دهند.
۴۶	همپتون و همکاران (۲۰۱۸) [79]	مشخصه‌های انتشار آکوستیک ریزترک در آزمایش‌های شکست هیدرولیکی در مقیاس آزمایشگاهی	تجزیه و تحلیل AE ریزترک کاهش انرژی قابل توجهی را نشان داده که از بازه تزریق ناشی می‌شود. سیگنال‌های AE ثبت شده اطلاعات کافی برای تعمیم آسیب در فاصله دور از چاه تزریق ارائه می‌دهند.
۴۷	ژانگ (۲۰۱۸) [80]	بررسی رابطه مقیاس شکست و پارامترهای زمان-فرکانس انتشار آکوستیک در سنگ‌ها	مقیاس شکستگی سنگ با انرژی AE متناسب است و با فرکانس AE نسبت معکوس دارد. سیگنال‌هایی با فرکانس پایین و انرژی بالا معمولاً ترک‌های بزرگ مقیاس را نشان می‌دهند و اگر فرکانس بالا مقدار انرژی پایینی داشته باشد، نشان‌دهنده یک ترک در مقیاس کوچک است.
۴۸	داربر و همکاران (۱۳۹۸) [81]	بررسی آزمایشگاهی تاثیر مشبک‌کاری بر شکست هیدرولیکی، تحت شرایط تنش سه محوره با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی	با افزایش زاویه مشبک نسبت به تنش افقی حداکثر در چاه قائم، کاهش زاویه مشبک نسبت به تنش افقی حداکثر در چاه افقی و همچنین، افزایش تنش افقی حداقل، فشار شکست افزایش می‌یابد.
۴۹	لی و همکاران (۲۰۱۹) [82]	شکست هیدرولیکی آزمایشگاهی گرانیات بر اساس مشاهدات و تفسیر انتشار آکوستیک	AE تقریباً در ۸۰ درصد فشار حداکثر رخ می‌دهد، تجزیه و تحلیل مکانی و زمانی نشان داد که در آن زمان به هم آمیختگی ریزترک‌ها توسط AE شناسایی شده است.
۵۰	جیا و وونگ و همکاران (۲۰۱۹) [83]	نظارت انتشار آکوستیک یک آزمایش شکست هیدرولیکی آزمایشگاهی بر روی شیل	شکست هیدرولیکی عمود بر حداقل تنش اصلی ایجاد شده است. مکان‌یابی کانون‌های AE در مقایسه با مواد گرانیاتی به دلیل نسبت کم سیگنال به نویز، شکل موج‌های منتشر شده از شیل در طی فرایند شکست هیدرولیکی، بسیار چالش برانگیز است.
۵۱	زینگ و همکاران (۲۰۱۹) [84]	شکست هیدرولیکی در گرانیات با دمای بالا، همراه با انتشار آکوستیک	برای دماهای مختلف گرانیات، هندسه شکست تقریباً بدون تغییر است. در حالی که منحنی‌های فشار تزریق، انرژی AE و مکانیزم‌های مبتنی بر AE به طور قابل توجهی تغییر کرده‌اند.
۵۲	شو و همکاران (۲۰۱۹) [85]	یک روش پیش‌بینی جهت شروع ترک جدید در حین شکست هیدرولیکی پیش ترک‌ها	هندسه شکست سنگ و جهت شروع ترک از نوک شکاف از قبل موجود تحت تاثیر حالت تنش برجا اولیه و خواص مکانیکی سنگ است. نتایج مدل‌سازی عددی بر اساس روش المان محدود تطابق خوبی با نتایج پیش‌بینی نظری نشان می‌دهد.

۵۳	لی (۲۰۱۹) [86]	تکامل مقدار b-value و ابعاد مقطعی رویدادهای انتشار آکوستیک در طول گسیختگی برشی یک گسل رشد نیافته در گرانیات	افزایش سریع نرخ رویداد AE و کاهش تدریجی b-value نشان‌دهنده فعال شده مجدد ترک است، و افزایش تدریجی نرخ رویداد AE و افت سریع مقدار b-value نشان‌دهنده گسیختگی قطعه‌های بزرگ است.
۵۴	نیو و همکاران (۲۰۱۹) [87]	پیش‌بینی شکست در ماسه سنگ قرمز شکافدار تحت فشار تک محوره: تجزیه و تحلیل مقدار b-value انتشار آکوستیک	ترک خوردگی ماکرو منجر به کاهش سریع در سه نوع مقدار b-value می‌شود. هنگامی که نمونه‌های شکافدار به شکست نهایی می‌رسند، هر سه نوع مقدار b-value به حداقل می‌رسند.
۵۵	ها و همکاران (۲۰۲۰) [88]	بررسی تجربی فشار شکست هیدرولیکی و انتشار آکوستیک	حجم قابل توجهی از سیال نفوذی و فشار منفذی بالا در طول دوره تاخیر، عامل اصلی کاهش فشار شکست و AE است.
۵۶	ژایی و همکاران (۲۰۲۰) [89]	تجزیه و تحلیل رویدادهای انتشار آکوستیک ناشی از شکست هیدرولیکی شیل	حوادث AE عمدتاً از اتساع یا فشرده‌سازی شکستگی‌ها و لغزش برشی شیل در امتداد صفحه شکستگی ناشی می‌شوند.
۵۷	دیو و همکاران (۲۰۲۰) [90]	مطالعه تجربی بر روی ویژگی انتشار آکوستیک و طبقه بندی ترک در حین شکست سنگ در چندین آزمایش آزمایشگاهی	ویژگی‌های AE ارتباط نزدیکی با انواع ریزترک‌های تولید شده در فرایند شکست سنگ دارند. انرژی کرنش الاستیک آزاد شده توسط ترک برشی بیشتر از انرژی آزاد شده توسط ترک کششی است. خطوط تقسیم برای تشخیص ترک‌های کششی و ترک‌های برشی در نمودارهای پراکندگی AF-RA برای سنگ‌های مختلف تعریف شدند.
۵۸	دادی گیوشاد و همکاران (۲۰۲۰) [91]	مطالعه ناحیه آسیب دیده اطراف دهانه دایره‌ای با استفاده از روش انتشار آکوستیک	میزان پارامترهای آکوستیک تجمعی در نمونه‌های ملات سیمان - گچ بیشتر از بقیه است. در واقع هر چه دانه‌ها ریزتر باشد، انرژی و شمارش AE بیشتری تولید می‌شود و همچنین با افزایش فشار جانبی و سرعت بارگذاری، مقدار انرژی تجمعی و شمارش AE کاهش می‌یابد.
۵۹	وی و همکاران (۲۰۲۰) [92]	یک مطالعه تجربی شکستگی مرحله‌ای چند سوراخه در شروع و انتشار شکست هیدرولیکی	فشار شکست در نمونه‌های همگن بسیار بیشتر از نمونه‌های ناهمگن در هنگام شکست هیدرولیکی است. علاوه بر این، زمان شروع اولین شکستگی دارای روندی است، که هر چه زمان شروع کوتاه‌تر باشد، فشار شکست بالاتر است.
۶۰	گوئو و همکاران (۲۰۲۰) [93]	ارزیابی تجربی و عددی شکست هیدرولیکی تحت دمای بالا و شکستگی‌های ایجاد شده در نمونه‌های بتنی بزرگ	فشار شکست و فشار گسترش با افزایش تراکم شکست تعبیه شده کاهش می‌یابد. برای شکست هیدرولیکی در یک مخزن با دمای بالا، یک ناحیه پلاستیکی در نزدیکی گمانه ایجاد شد و این ناحیه با افزایش فشار تزریق تا زمانی که دیواره چاه شکست خورد، افزایش یافت.
۶۱	وی و همکاران (۲۰۲۰) [94]	انتشار شکستگی مواد سنگی با یک شکاف از پیش موجود با نفوذ سیال تحت فشار تک	افزایش فشار سیال، انتشار ترک را سریع می‌کند، ترک‌های ثانویه را مهار می‌کند و باعث می‌شود که نمونه دچار شکست کششی شود. در مقایسه با نمونه بدون فشار سیال در شکاف،

		محوره	فشار سیال در شکاف باعث شروع و انتشار ترک می‌شود و باعث می‌شود که فشار شروع شکست و مقاومت نمونه‌ها به تدریج کاهش یابد.
۶۲	ژو و همکاران (۲۰۲۰) [95]	خواص مکانیکی و ویژگی‌های انتشار آکوستیک تحت بارگذاری سه محوره چرخه‌ای	با افزایش فشار محصورکننده اعمال شده، حداکثر فشار تفاضلی و مدت خستگی نمونه افزایش می‌یابد در حالی که زاویه شکست برشی کاهش می‌یابد.
۶۳	ژانگ و همکاران (۲۰۲۰) [96]	ویژگی‌های AE انفجار سنگ برای گرانیت تحت تاثیر آب و تحت بارگذاری تک محوره	گرانیت خشک انرژی بیشتری را در طول کل فرآیند بارگذاری ذخیره و آزاد می‌کند و نسبت رویدادهای AE با انرژی بالاتر در مراحل بعدی بارگذاری بیشتر است. کاهش مقادیر b-value گرانیت خشک بیشتر از گرانیت آب اشباع است.
۶۴	تیرومالیسلی و همکاران (۲۰۲۰) [17]	مطالعات انتشار ترک در بتن سخت شده با استفاده از انتشار آکوستیک	محتوای فرکانس شکل موج AE، تجزیه و تحلیل مکان‌یابی شکست با استفاده از رویدادهای AE ثبت شده، روش b-value، شدت سیگنال AE و طبقه‌بندی ترک با استفاده از مقادیر AF و RA، برای توصیف و تحلیل حالت‌های ترک و مکانیزم‌های آسیب به کار گرفته شده‌اند.
۶۵	چن و همکاران (۲۰۲۰) [97]	تشخیص رفتار ترک خوردگی در گرانیت با باز کردن ترک‌های از پیش برش خورده با استفاده از تحلیل طیف فرکانس انتشار آکوستیک	مقادیر حداکثر نرخ شمارش AE و دامنه حداکثر به خوبی با نقاط تنش حداکثر مطابقت دارد، در حالی که دامنه حداکثر در آشکار کردن رفتارهای ترک‌خوردگی موثرتر بود. پنج نوع سیگنال شکل موج AE با توجه به مقدار دامنه حداکثر و محدوده فرکانس حداکثر شناسایی شدند.
۶۶	بیان و همکاران (۲۰۲۰) [98]	ارزیابی شرایط ساختاری از پل‌های تقویت‌شده با بتن، مبتنی بر اندازه‌گیری انتشار آکوستیک و اندازه‌گیری کرنش	تنوع سیگنال‌های انتشار آکوستیک با توجه به اندازه‌گیری‌های کرنش و دما ارزیابی می‌شود. مطالعه پارامتری، آزمایش شکست مداد، تجزیه و تحلیل آماری، طبقه‌بندی ترک و تجزیه و تحلیل b-value برای ارزیابی وضعیت سازه انجام شده است.
۶۷	یونگ و همکاران (۲۰۲۰) [99]	استفاده از مقادیر b-value و Ib-value انتشار آکوستیک برای تعیین کمیت آسیب در کامپوزیت‌ها	در ناحیه تنش کم در طول آزمایش مقادیر b-value به طور مداوم کاهش می‌یابند و اطلاعاتی در مورد میزان آسیب ارائه داده‌اند. در ناحیه تنش زیاد به دلیل رویدادهای AE با دامنه کم ناشی از ترک خوردگی و هندسه پیچیده شکست مقدار b-value افزایش می‌یابد. در مقابل Ib-value نیز روند کاهشی را در همه مناطق نشان داده است.
۶۸	ژانگ و همکاران (۲۰۲۰) [100]	بررسی انتشار آکوستیک بر روی حالت انتشار ترک ماسه سنگ در طی فرآیند شکافت برزلی	دامنه سیگنال‌های AE همراه با تنش بارگذاری افزایش می‌یابد. بیش از ۹۹ درصد از کل سیگنال‌های ترک به عنوان حالت کششی طبقه‌بندی می‌شوند و تعداد کمی ترک برشی وجود دارد که در طول آزمایش برزلی رخ داده است. فرکانس مرکزی وقوع ترک کششی ۱۳۸/۵۸ کیلوهرتز است.
۶۹	لو و همکاران (۲۰۲۱) [101]	خواص مکانیکی و حالت شکست نمونه ماسه سنگ با گمانه پیش ساخته تحت	جهت گمانه و محور تنش اصلی و همچنین عمق و اندازه گمانه بر مقاومت و هندسه شکست نمونه‌های سنگ تاثیرگذار است. مقاومت نمونه‌ها با محور گمانه موازی با تنش‌های اصلی مختلف،

		شرایط تنش سه محوره واقعی	ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. بیشترین مقاومت سنگ زمانی ظاهر شد که گمانه موازی با σ_1 بوده و کمترین مقاومت زمانی رخ داد که گمانه موازی با σ_2 یا σ_3 بوده است.
۷۰	دوو و همکاران (۲۰۲۱) [102]	ویژگی‌های مکانیکی و انتشار آکوستیک سنگ‌ها تحت محصورات دو محوره	با افزایش تنش اصلی میانی (σ_2)، مقاومت فشاری دو محوره سنگ در ابتدا افزایش می‌یابد و سپس کاهش می‌یابد. توزیع AF-RA سیگنال‌های AE نشان می‌دهد که افزایش σ_2 باعث ایجاد ترک کششی بیشتر در سنگ می‌شود.
۷۱	امپلاسکاس و همکاران (۲۰۲۱) [103]	انتشار آکوستیک برای ارزیابی اثر بخشی تقویت کننده در بتن مسلح با الیاف فولادی	رفتار AE در سطوح بارگذاری پایین نشان دهنده میزان تقویت و خواص مکانیکی نهایی است. دلیل آن این است که فاز تقویت کننده از طریق تنش‌های برشی در فاز میانی خود فعال می‌شود.
۷۲	تان و همکاران (۲۰۲۱) [104]	مشاهده هندسه شکست هیدرولیکی برای آزمایش‌ها با روش‌های چندگانه	ترکیبی از نظارت AE و سی تی اسکن می‌تواند به طور موثر رفتار انتشار شکستگی پیچیده را شناسایی کند.
۷۳	ژانگ و همکاران (۲۰۲۱) [21]	ویژگی‌های انتشار آکوستیک سنگ‌های شکننده مختلف و کاربرد آن در ارزیابی شکنندگی	با افزایش شکنندگی سنگ، انرژی AE در طول بارگذاری به شدت افزایش می‌یابد. در طول شکست سنگ، نسبت سیگنال‌های AE با RA کمتر و AF بالاتر با افزایش شکنندگی سنگ افزایش یافته است. پارامتر Ib-value برای ارزیابی وضعیت انتشار ترک در سنگ‌ها بررسی شده است.
۷۴	رن و همکاران (۲۰۲۱) [105]	مطالعه شبیه‌سازی تجربی و عددی انتشار شکست هیدرولیکی در طول توسعه متان بستر زغال سنگ	حداکثر و حداقل تنش افقی برجا و اختلاف تنش بر جهت انتشار ترک تاثیر می‌گذارند. مدول الاستیسیته زغال سنگ، خواص مکانیکی شکستگی‌های طبیعی و نرخ تزریق می‌توانند بر طول شکست، عرض شکست و مقدار سیال تزریق تاثیر بگذارند.
۷۵	لی و همکاران (۲۰۲۱) [106]	عوامل موثر بر جهت‌گیری مجدد شکست هیدرولیکی در حین شکست با سوراخ‌های جهت‌دار در مخازن گاز شیل	ویسکوزیته سیال تاثیر کمی بر فشار شروع شکست هیدرولیکی در طول عملیات شکست دارد و فشار شروع عمدتاً تحت تاثیر آزمایشات چال، نرخ تزریق و اختلاف تنش می‌باشد. همچنین آزمایشات چال و تفاوت بین دو تنش اصلی افقی، دو عامل موثر در جهت‌گیری مجدد شکست می‌باشند.
۷۶	ژای و همکاران (۲۰۲۱) [107]	بررسی مکانیزم انتشار شکست هیدرولیکی و کنترل هندسه شکست در گلویتیت‌های ناهمگن	رویدادهای کششی در مرحله شروع رشد شکست هیدرولیکی ظاهر می‌شوند، در حالی که رویدادهای برشی و فشاری در مرحله گسترش شکست ظاهر می‌شوند. مکانیزم‌های برشی و فشاری باعث افزایش پیچیدگی شکست هیدرولیکی می‌شوند.

۳-۳ جمع بندی

در این بخش مطالعات و تحقیقات انجام شده مرتبط با آزمون‌های شکست هیدرولیکی و کاربرد انتشار

آکوستیک در مطالعات آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی بررسی شده است تا از تجربیات و یافته‌های آن‌ها

استفاده شود. نقاط قوت و محدودیت‌های موجود در هر یک از این تحقیقات بررسی، و شناخت کافی از آن‌ها پیدا شده است. همان طور که اشاره شده، شکست هیدرولیکی به طور گسترده به عنوان یک روش کارآمد در توسعه مخازن نفت و گاز غیر متعارف شناخته شده است. رفتارنگاری AE بر فرایند شکست هیدرولیکی بسیار مفید بوده است. همچنین، انتشار آکوستیک به عنوان سیگنال‌های ناگهانی میکرو لرزه‌ای الاستیک با فرکانس بالا، می‌تواند رفتارنگاری مناسب در مورد روند گسترش شکست هیدرولیکی فراهم کند.

فصل چهارم

آزمون‌های اولیه تعیین ویژگی‌های نمونه آزمایش

۴-۱) مقدمه

شکست نمونه‌ها، فرایندی است که ترک‌های اولیه بسته شده‌اند و ترک‌ها به تدریج تولید، گسترش و نفوذ می‌کنند. انتشار آکوستیک می‌تواند فرایند شکست را در طول زمان رفتارنگاری کند و به طور گسترده در مطالعه فرایند شکست استفاده شده است. در این فصل، روند تهیه و آماده‌سازی نمونه‌های بتنی جهت انجام آزمایش‌های فشاری تک محوره و برزیلی به همراه رفتارنگاری انتشار آکوستیک (AE) بیان شده است. نمودار پارامترهای انتشار آکوستیک نسبت به تنش اعمالی بر روی نمونه‌ها در طول زمان بارگذاری رسم و تحلیل شده است. رفتارنگاری انتشار آکوستیک نقش اساسی در توصیف شکستگی دارد و در آزمایشگاه به منظور افزایش اثر بخشی رفتارنگاری AE، خواص مکانیکی و فیزیکی نمونه‌ها بررسی شده است.

۴-۲) تهیه نمونه

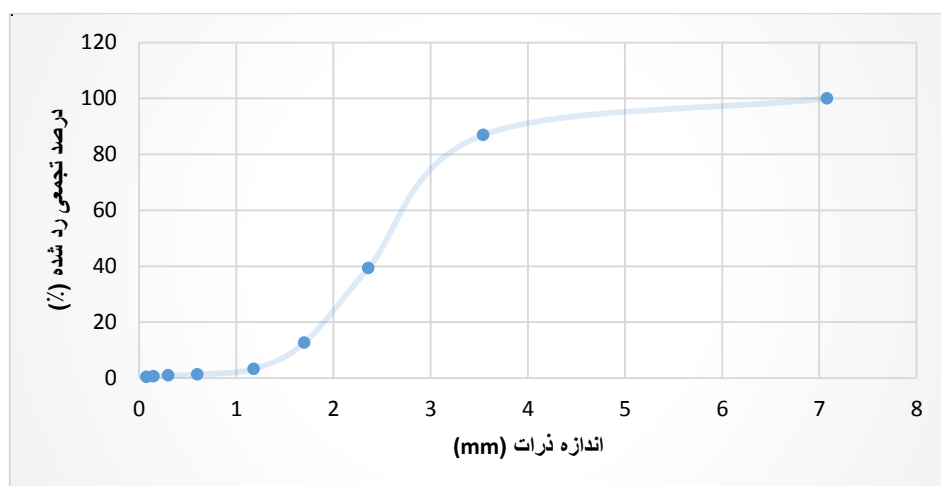
۴-۲-۱) آماده‌سازی نمونه‌ها: طرح اختلاط برای تهیه نمونه مصنوعی بتن شامل، ترکیب ماسه، سیمان، آهک و آب بوده است. نسبت اختلاط مواد به صورت وزنی بوده است که نسبت ماسه به سیمان ۳ به ۱ و نسبت ماسه به آهک ۳ به ۰/۲۵ در نظر گرفته شده است. همچنین مقدار آب اضافه شده به این ترکیب نیز ۰/۲۵ واحد نسبت به ماسه و ۰/۷۵ واحد نسبت به سیمان است. ۶ نمونه استوانه‌ای با قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر برای تعیین خصوصیات مکانیکی نمونه‌های آزمایش آماده شده‌اند. بتن‌ریزی نمونه‌های استوانه‌ای و قرار دادن آن‌ها در حوضچه آب در شکل ۴-۱ آورده شده است.



شکل ۴-۱ الف) بتن‌ریزی نمونه‌های استوانه‌ای، ب) قرار دادن نمونه‌ها در حوضچه آب

۴-۲-۲) آزمایش دانه‌بندی و سرند: آزمایش دانه‌بندی برای بدست آوردن منحنی دانه‌بندی ماسه

استفاده شده در ترکیب انجام شده است، به طوری که وزن کل مصالح ۱/۵ کیلوگرم، زمان لرزش و سرند کردن دستگاه ۱۰ دقیقه بوده و مدول نرمی برای این نوع ماسه ۶/۵ بدست آمده است. مدول نرمی ماسه بین ۲ و ۳/۸ است که با توجه به مقدار به دست آمده نوع مصالح بیشتر در اندازه شن ارزیابی می‌شود، منحنی دانه‌بندی بدست آمده در آزمایش سرند در شکل ۴-۲ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲) نمودار دانه‌بندی مصالح دانه‌ای در تهیه نمونه

۴-۳) تجهیزات انتشار آکوستیک استفاده شده

در این تحقیق از دستگاه انتشار آکوستیک AMSY-6 مدل MB2 ساخت شرکت Vallen کشور آلمان استفاده شده است (شکل ۴-۳). سیستم AMSY-6 یک سیستم اندازه‌گیری انتشار آکوستیک ۴ کاناله (AE) است که از آن می‌توان برای شناسایی، اندازه‌گیری و مکان‌یابی منابع AE مانند شکست مواد در سطح میکروسکوپی، خوردگی، نشتی، تخلیه جزئی، اصطکاک و سایش و غیره استفاده کرد. یک کانال اندازه‌گیری متشکل از یک سنسور، یک پیش تقویت کننده و یک کانال ASIP-2 (پردازشگر سیگنال آکوستیک) است. هر کانال ترکیبی از یک بخش اندازه‌گیری آنالوگ و یک واحد پردازش سیگنال دیجیتال است. ویژگی‌های AE، مانند زمان عبور از اولین آستانه، زمان خیر، مدت زمان، دامنه، انرژی و شمارش توسط ASIP-2

استخراج می‌شوند. ASIP-2 در یک بدنه نصب شده است که از طریق رابط USB به یک رایانه متصل می‌شود و بدنه دستگاه نیز دارای بخش‌های مختلفی است [108].



شکل ۳-۴) سیستم انتشار آکوستیک استفاده شده

۱. بدنه دستگاه^۱: پردازنده‌های سیگنال آکوستیک (ASIP-2)، کانال‌های پارامتریک، صفحه کنترل و رابط‌های مختلف را در خود جای می‌دهد. ابعاد آن $۱۰/۵ \times ۱۵ \times ۴۰/۵$ سانتی‌متر و وزن آن حدوداً $۲/۹$ کیلوگرم است. (شکل ۴-۴)

۲. ASIP-2 (پردازشگر سیگنال آکوستیک): یک پردازنده سیگنال AE دو کاناله است که در بدنه دستگاه نصب می‌شود. هر صفحه ASIP-2 و هر کانال در برد^۲ در حال پردازش داده‌های مستقل از یکدیگر هستند، دو نسخه از آن وجود دارد که از هر دو نسخه می‌توان همزمان استفاده کرد. ابعاد آن ۱۰۰×۲۸۰ میلی‌متر و وزن آن $۰/۳۲$ کیلوگرم است. (شکل ۴-۴)



شکل ۴-۴) الف) ASIP-2 (پردازشگر سیگنال آکوستیک) [108]، ب) بدنه دستگاه

¹ Chassis

² board

۳. سرعت عملکرد^۱: سرعت انتقال داده‌ها، داده‌های ویژگی AE و داده‌های TR، ۶۰ مگابایت بر ثانیه است. تا زمان پر شدن دیسک سخت این میزان به ترتیب با جریان حداکثر ۳ یا ۴ کانال AE با نرخ نمونه^۲ ۱۰ مگاهرتز یا ۵ مگاهرتز مطابقت دارد.

۴. پیش تقویت کننده^۳: سیستم Vallen تعدادی پیش تقویت کننده قوی را برای استفاده با سیستم AMSY-6 ارائه می‌دهد. پهنای باند و عملکرد آن را می‌توان متناسب با شرایط آزمون انتخاب کرد. AEP5 و همچنین AEP5H یک تقویت کننده عمومی است که از سنسورهای تک سر پشتیبانی می‌کند. شکل ۴-۵ نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵) پیش تقویت کننده‌های AEP5 و AEP5H [108]

میزان برداشت داده را می‌توان روی ۳۴ دسی‌بل یا ۴۰ دسی‌بل تنظیم کرد. AEP5 و AEP5H می‌توانند پالس ولتاژ^۴ (حداکثر ۴۵۰ ولت) را به سنسور AE وارد کنند. تنها تفاوت بین AEP5 و AEP5H پهنای باند فرکانس مختلف آن‌ها است. ابعاد آن‌ها ۳۰×۵۵×۹۰ میلی‌متر و وزن ۱۶۰ گرم را دارند و از جنس آلومینیوم هستند.

۵. سنسور: VS900-M یک سنسور پیزوالکتریک^۵ AE است که پاسخ فرکانسی گسترده‌ای دارد. از مزایای VS900-M می‌توان به حساسیت زیاد در محدوده وسیع فرکانس با سازگاری در مورد یکنواخت بودن پاسخ اشاره کرد. شکل ۴-۶ نشان دهنده سنسور و محدوده فرکانس کالیبراسیون سنسور است. در جدول ۴-۱ مشخصات فنی و تجهیزات جانبی سنسورهای AE آورده شده است.

¹ Speed Performance

² Sample rate

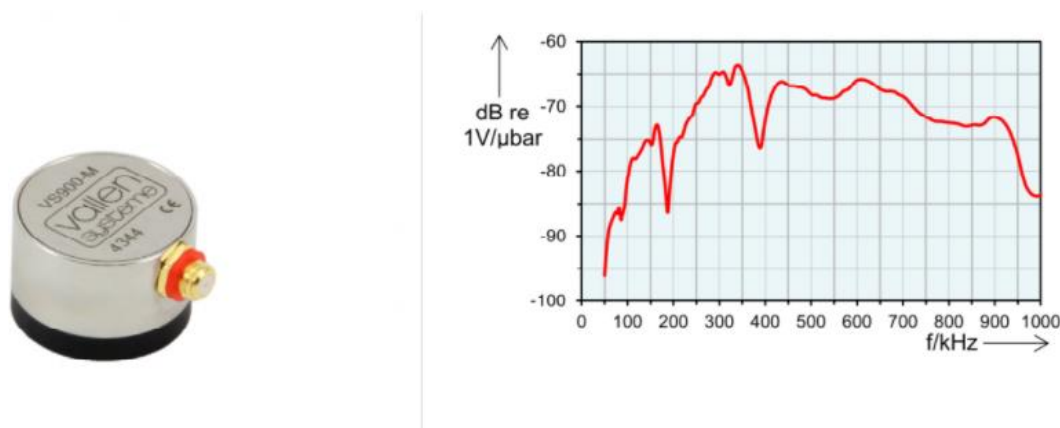
³ Pre-amplifiers

⁴ Voltage pulse

⁵ Piezoelectric

۶. رایانه شخصی و سیستم عامل: این سیستم لوازم جانبی دیگری مانند کابل، نگهدارنده آهنربا و غیره دارد. رایانه شخصی سخت افزار اندازه گیری را کنترل می کند و سیستم عامل، سیستم را اجرا کرده و داده های اندازه گیری را ذخیره می کند.

۷. نرم افزار: شرکت Vallen نرم افزار Vallen AE-Suite را برای دستیابی به داده ها و پردازش داده های اندازه گیری AE ارائه داده است. Visual AE، Visual TR و Visual Class ابزار تجزیه و تحلیل داده های نرم افزار هستند. همچنین شامل ابزاری برای کارهای تایید سخت افزار و تجزیه و تحلیل دامنه فرکانس است [108].



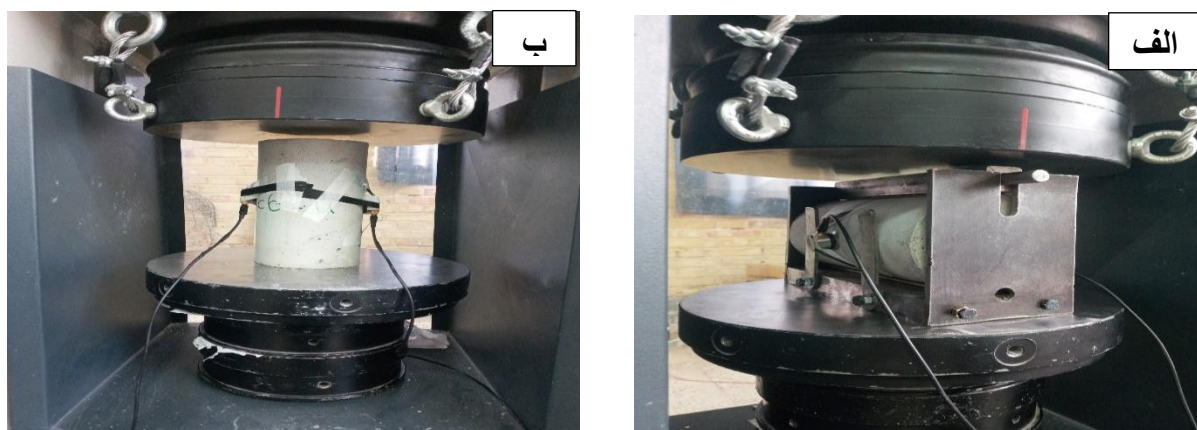
شکل ۴-۶) تصویری از سنسور AE و محدوده فرکانس کالیبراسیون سنسور [108]

جدول ۴-۱) مشخصات فنی و تجهیزات جانبی سنسور AE [108]

محدوده فرکانس (فرکانس حداکثر) (kHz)	۱۰۰ تا ۹۰۰ (۳۵۰)
دمای عملیاتی (°C)	-۵۰ تا +۱۰۰
ظرفیت (pF)	۵۴۰
اندازه قطر × ارتفاع (mm)	۱۴/۳ × ۲۰/۳
وزن (g)	۲۲
جنس سنسور	فولاد ضد زنگ
پوشش صفحه	سرامیک
کابل سنسور	CBL-1-1M2-V5

۴-۴) خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها

در مجموع ۶ نمونه استوانه‌ای برای بدست آوردن خواص مکانیکی طرح اختلاط استفاده شده در نمونه‌های مکعبی تهیه شده است. آزمایش مقاومت فشاری تک محوره و آزمایش کشش غیر مستقیم برزلی بر روی آن‌ها صورت گرفته است. همچنین آزمایش بارگذاری یکنواخت فشاری و برزلی روی ۴ نمونه استوانه‌ای همراه با رفتارنگاری انتشار آکوستیک (AE) صورت گرفته است که در ادامه هر کدام از آزمایش‌های انجام شده این قسمت به صورت مجزا شرح داده می‌شود. شکل ۴-۷ آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوره و برزلی را نشان می‌دهد. ۴ نمونه برای مقاومت فشاری تک محوره و دو نمونه برای مقاومت کششی برزلی آزمایش شده و مدول الاستیسیته^۱ آن‌ها نیز بدست آمده است که در جدول ۴-۲ آورده شده است.



شکل ۴-۷) نحوه انجام آزمایش‌ها، الف) آزمایش برزلی ب) آزمایش مقاومت فشاری تک محوره

جدول ۴-۲) خواص مکانیکی نمونه

شماره آزمایش	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی برزلی (MPa)	مقاومت فشاری تک محوره (MPa)	کد نمونه
۱	۲۱/۹۴	---	۲۱/۸۰	Pc1-u
۲	۲۳/۷۱	---	۲۵/۴۷	Pc2-u
۳	۲۴/۱۸	---	۲۶/۴۸	Pc3-u
۴	---	۳/۰۱	---	Pc4-b

^۱ بر اساس آیین نامه ACI-318-14 (آیین نامه آمریکا)

Pc5-b	---	۳/۳۹	---	۵
Pc6-u	۲۶/۰۱	---	۲۳/۹۷	۶
میانگین	۲۴/۹۴	۳/۲۰	۲۳/۴۵	---

برای بدست آوردن سرعت موج طولی و مدول الاستیسیته دینامیکی در نمونه‌های بتنی از دستگاه اندازه‌گیری سرعت موج التراسونیک^۱ ساخت شرکت‌های Matest ایتالیا و Proceq سوئیس استفاده شده است، این آزمایش در اندازه‌گیری سرعت عبور امواج طولی و اندازه‌گیری مدول الاستیسیته برای تعیین ضریب پواسون غیر مخرب کاربرد دارد [109]. مدول الاستیسیته دینامیکی بدست آمده برابر ۲۶/۵۳ گیگاپاسکال می‌باشد. خصوصیات فیزیکی نمونه‌ها در جدول ۳-۴ آورده شده است.

جدول ۳-۴ ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌ها

پارامتر	وزن مخصوص (gr/cm ³)	تخلخل (%)	وزن مخصوص اشباع (gr/cm ³)	وزن مخصوص خشک (gr/cm ³)	سرعت موج طولی (m/s)
مقدار	۲/۱۱	۱/۲۹	۲/۲۳	۲/۱۴	۳۵۴۶

۴-۵) آزمایش‌های فشاری تک محوره و برزیلی به همراه رفتارنگاری انتشار

آکوستیک

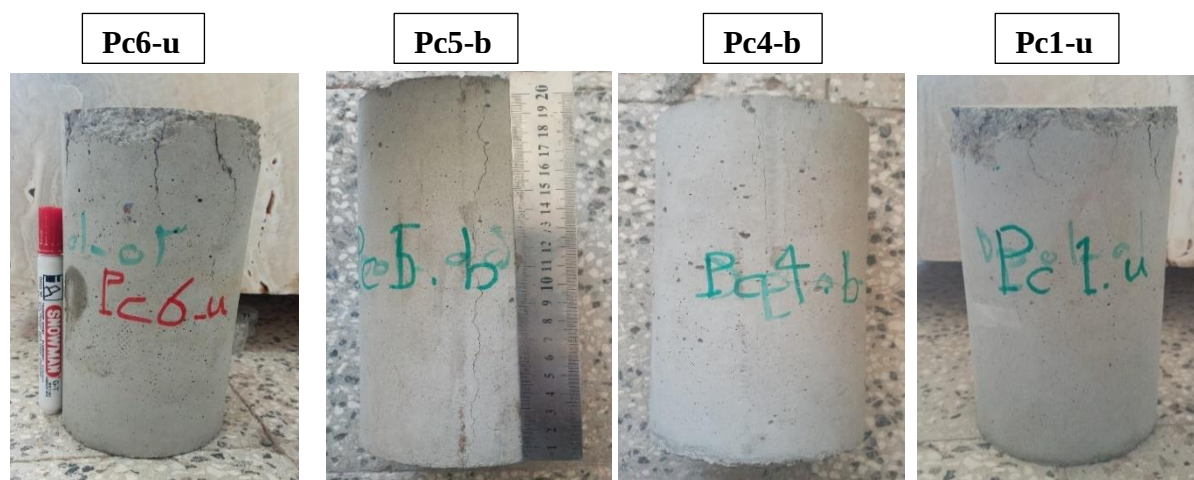
برای انجام آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های استوانه‌ای از دستگاه آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه صنعتی شاهرود استفاده شده است. این دستگاه ساخت شرکت Controls ایتالیا بوده و دارای جک فشاری هیدرولیکی با قابلیت اعمال بار ۳۰۰۰ کیلونیوتون و اندازه‌گیری و ثبت نتایج به صورت خودکار بوسیله دیتالاگر ۸ کاناله می‌باشد [110]. شکل ۸-۴ تصویر دستگاه انجام آزمایش‌های فشاری تک محوره و برزیلی را نشان می‌دهد.

¹ Ultrasonic



شکل ۸-۴) دستگاه انجام آزمایش‌های فشاری تک محوره و برزیلی

۲ نمونه استوانه‌ای تحت آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره و ۲ نمونه استوانه‌ای تحت آزمایش مقاومت کششی برزیلی به روش دو نیمه کردن^۱ قرار گرفت^۲. دو سنسور AE برای ثبت امواج آکوستیک ساطع شده از نمونه‌ها و رفتارنگاری انتشار آکوستیک به نمونه‌ها متصل شده‌اند. تصویر نمونه‌های شکسته شده بعد از آزمایش در شکل ۹-۴ آورده شده است.



شکل ۹-۴) تصویر نمونه‌های تک محوره و برزیلی شکسته شده بعد از آزمایش

۴-۶) تحلیل نتایج رفتارنگاری AE آزمایش‌های فشاری تک محوره و برزیلی

دو روش تجزیه و تحلیل انتشار آکوستیک وجود دارد، روش اول تحلیل پارامتری که بر اساس شکل موج ثبت شده دامنه زمان سیگنال انتشار آکوستیک است. سپس چندین داده آماری مرتبط برداشت شده

^۱ splitting tensile strength

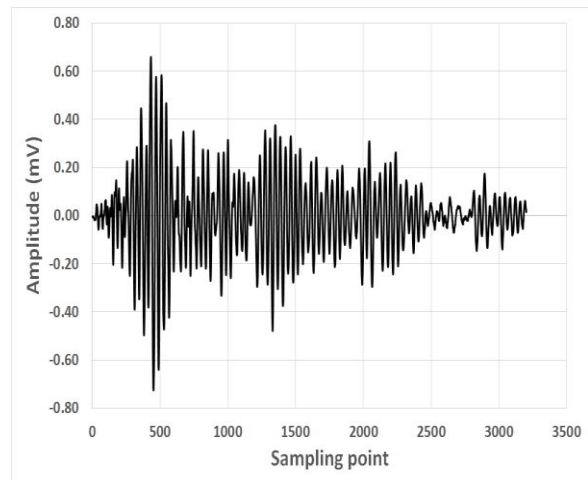
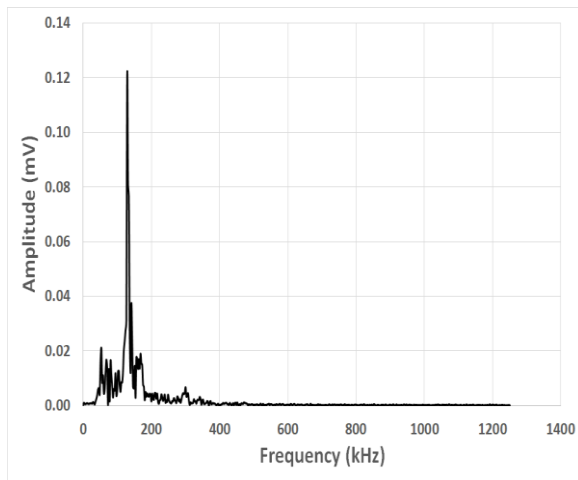
^۲ بر اساس استاندارد ملی ایران ۶۰۴۷ و دود ۶۰۶ و ASTM C496 و BS 1881-4

تا پارامترهای شکل موج را برای نشان دادن ویژگی‌های سیگنال آکوستیک ساده‌سازی کنند. روش دوم تحلیل شکل موج که بر اساس تجزیه و تحلیل شکل موج دامنه زمان انتشار آکوستیک و روش تحلیل طیف سیگنال برای بدست آوردن اطلاعات طیف شکل موج سیگنال آکوستیک است. شکل موج آکوستیک تمام اطلاعاتی مانند وضعیت تنش، ساختار خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه را در بر می‌گیرد. بر روی نمونه‌های بتنی آزمایش‌های برزیلی و تک محوره صورت گرفته است که با رفتارنگاری انتشار آکوستیک همراه بوده و نمودارهای شمارش، انرژی و مقادیر تجمعی آن‌ها و همچنین مقادیر دامنه، مدت زمان، فرکانس متوسط، زاویه خیز، مقدار b-value و مقدار بهینه شده آن نسبت به تنش اعمالی بر روی نمونه‌ها در طول زمان بارگذاری رسم و تحلیل شده‌اند.

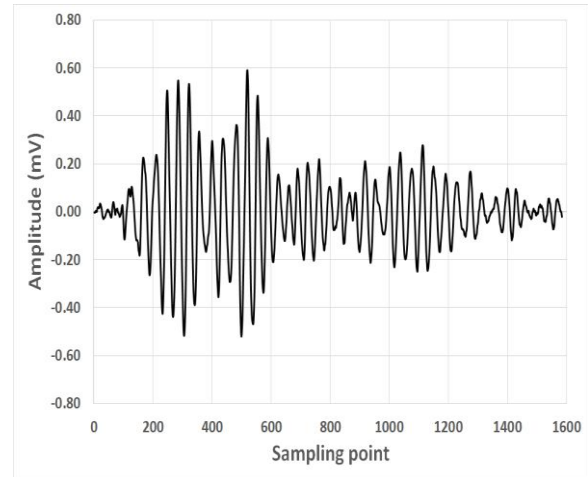
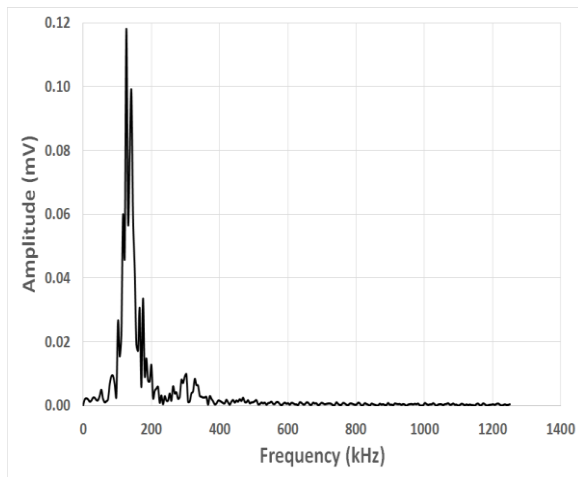
۴-۶-۱) ویژگی‌های طیف فرکانس سیگنال AE

تبدیل فوریه سریع^۱ (FFT) یک روش تحلیل طیفی برای تحلیل سیگنال‌های غیر ثابت است و با انجام FFT سیگنال‌های شکل موج AE، می‌توان اطلاعات حوزه فرکانس سیگنال‌های شکل موج را به دست آورد. ویژگی‌های طیفی سیگنال انتشار آکوستیک تولید شده می‌تواند وضعیت و ساختار نمونه‌ها و خواص مکانیکی آن‌ها را مشخص کند. با تغییر شکل موج AE از حوزه زمان به حوزه فرکانس، مشخصه توزیع فرکانس را می‌توان به دست آورد و فرکانس غالب به عنوان فرکانس مربوط به حداکثر دامنه در طیف تعریف می‌شود [80]. با مشاهده طیف شکل موج، می‌توان مشاهده کرد که فرکانس غالب سیگنال شکل موج انتشار آکوستیک برای آزمایش‌های فشاری تک محوره ۱۲۹/۳۹ کیلوهرتز و برای آزمایش‌های برزیلی ۱۲۶/۹۵ کیلوهرتز است. در آزمایش‌های صورت گرفته دستگاه انتشار آکوستیک هزاران سیگنال شکل موج AE را دریافت کرده است. سیگنال‌های دریافت شده عمدتاً از نوع سیگنال کششی و سیگنال اصطکاک می‌باشند، همان طور که در شکل ۴-۱۰ و ۴-۱۱ نشان داده شده است.

¹ Fast Fourier transform



شکل ۱۰-۴) شکل موج AE و طیف فرکانس سیگنال مربوط به آزمایش‌های فشاری تک محوره



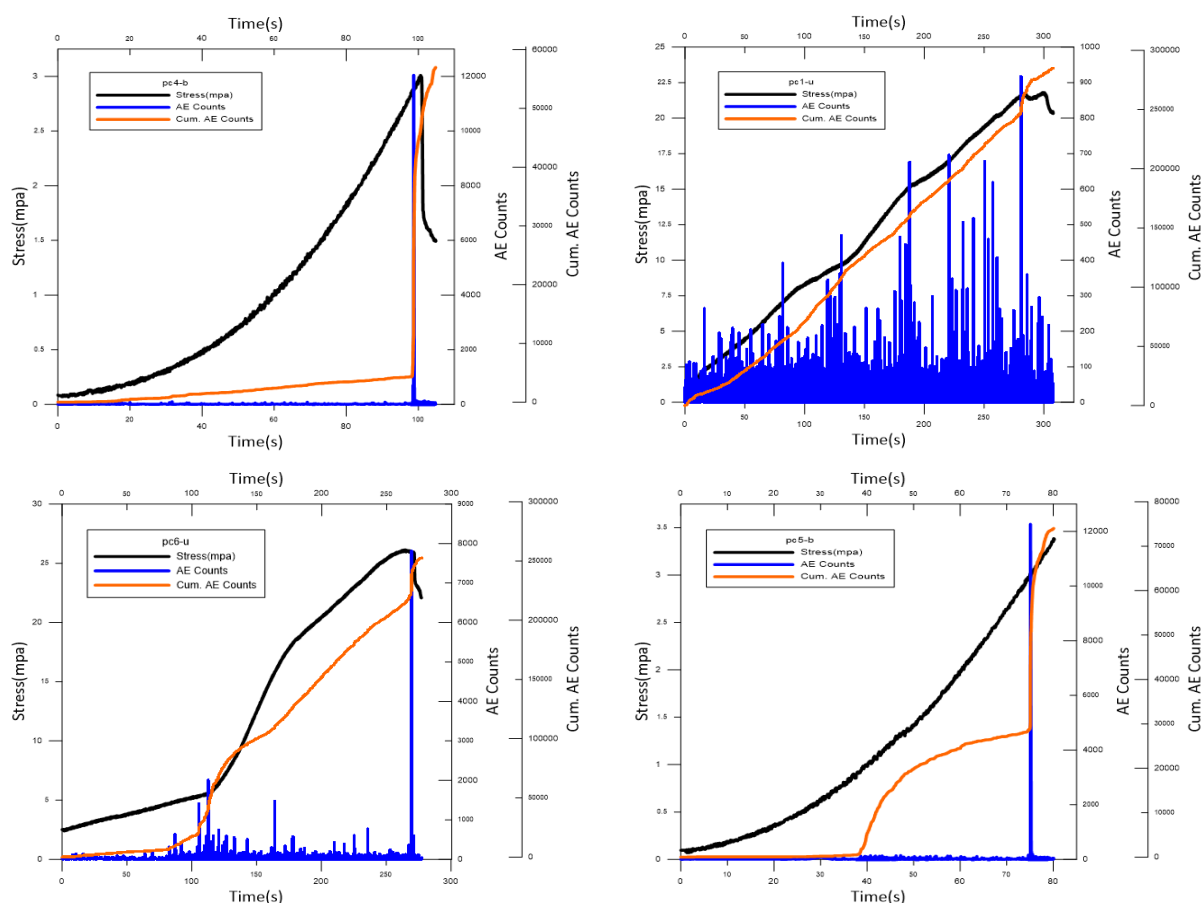
شکل ۱۱-۴) شکل موج AE و طیف فرکانس سیگنال مربوط به آزمایش‌های برزیلی

سیگنال کششی از نوع سیگنال ناگهانی است که با فرکانس بالا و دامنه کم مشخص می‌شود، معمولاً در مرحله اولیه آزمایش رخ می‌دهد که نشان دهنده شروع تولید ترک است. سیگنال اصطکاک دارای ویژگی‌های فرکانس پایین هستند و به سه نوع دامنه تقسیم می‌شوند، دامنه کم، دامنه متوسط و دامنه بالا، سیگنال اصطکاک نشان دهنده اصطکاک بین ترک‌ها و سطح تماس مشترک است. سیگنال‌های با دامنه کم، فرکانس پایین و سیگنال‌های با دامنه متوسط و فرکانس پایین، بیشتر در طول آزمایش برزیلی، همراه با چند صدای اصطکاک خفیف تولید می‌شوند. سیگنال‌های با دامنه بالا و فرکانس پایین معمولاً در لحظه

پایانی آزمایش رخ می‌دهند که با صدای شدید همراه است و دامنه سیگنال، هزاران یا صدها برابر سیگنال با دامنه پایین است.

۴-۶-۲) پارامتر شمارش AE (کانت)

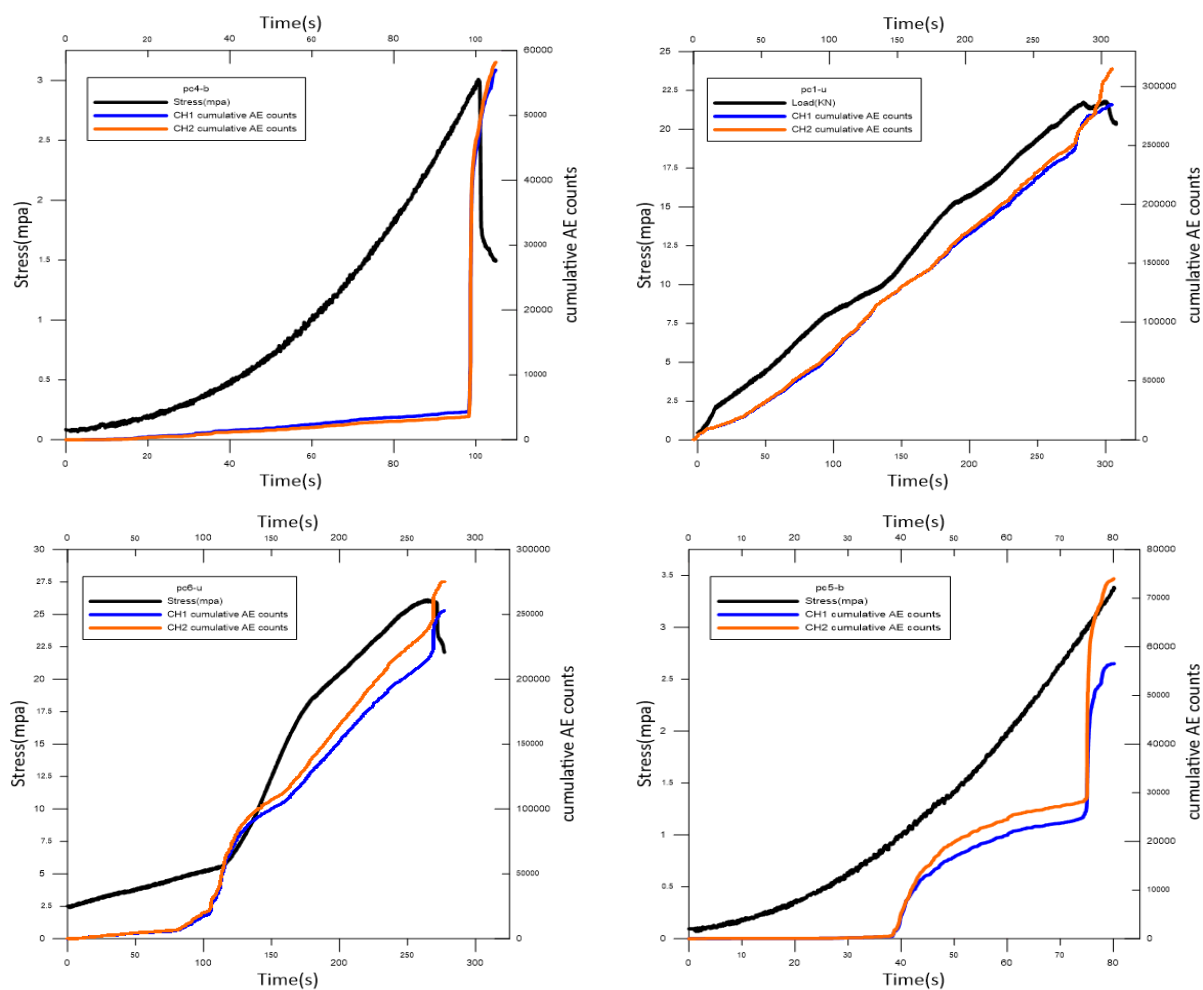
یکی از پارامترهای مهم انتشار آکوستیک، بررسی تغییرات تعداد شمارش و مقدار تجمعی شمارش است. شکل ۴-۱۲ نمودار تغییرات شمارش و مقدار تجمعی شمارش به همراه نمودار تنش و زمان را برای آزمایش‌های فشاری تک محوره و برزیلین نشان می‌دهد. این نمودارها مشخصه پارامترهای AE اصلی و همچنین عملکرد زمان بین رویدادها را در کنار تنش مربوطه برای نمونه‌های تحت آزمایش‌های فشاری تک محوره و برزیلین قرار می‌دهد.



شکل ۴-۱۲) نمودار تغییرات مقدار شمارش، شمارش تجمعی و تنش در آزمایش تک محوره (pc6-u و pc1-u) و برزیلی (pc5-b و pc4-b)

از این نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که قبل از حداکثر تنش، میزان شمارش AE پایین است که این مورد در آزمایش برزیلی بسیار کمتر از آزمایش تک محوره است، همچنین تعداد تجمعی شمارش AE نیز به تدریج افزایش می‌یابد. در آزمایش تک محوره مشاهده می‌شود که شروع و افزایش شمارش‌ها برخلاف آزمایش برزیلی، قبل از وقوع نقطه حداکثر نیز وجود دارد که به دلیل ایجاد ریز ترک‌ها در نمونه است که منافذ و ترک‌های اولیه درون نمونه بتنی تحت فشرده‌سازی تک محوره فشرده می‌شود و تعداد زیادی شمارش AE در مرحله اولیه بارگذاری وجود دارد و یک پدیده رایج است که نقص‌ها و ترک‌های ریز موجود در نمونه‌ها به مکان مناسبی برای ایجاد ترک‌های جدید تحت بارگذاری تبدیل شوند. هنگامی که تنش تا مقاومت نهایی نمونه افزایش می‌یابد، شکست نمونه به طور ناگهانی رخ می‌دهد و در زمان بسیار کوتاه پدیدار می‌گردد. یعنی رویدادها در مقیاس بزرگ رخ می‌دهند، که نرخ شمارش AE به طور ناگهانی افزایش می‌یابد و منحنی تجمعی شمارش نیز تا مقدار حداکثر افزایش می‌یابد.

رخداد‌های انتشار آکوستیک در مراحل ابتدایی بارگذاری تنش کم هستند ولی با ادامه بارگذاری و افزایش تنش روی نمونه در نزدیکی نقطه حداکثر به صورت چشم‌گیری افزایش یافته و این به معنای ایجاد ترک‌های ناپایدار و شکست نمونه در نقطه حداکثر است، اما برای آزمایش برزیلی قبل از نقطه حداکثر، رخداد‌های انتشار آکوستیک به خصوصی مشاهده نمی‌شود ولی در آزمایش تک محوره رخداد‌ها قبل از نقطه حداکثر نیز وجود دارند و علت آن رشد ریز ترک‌ها است. به تعداد سنسورهای متصل شده داده اندازه‌گیری موجود است که در دو کانال معرفی شده‌اند، شکل ۴-۱۳ نمودارهای شمارش تجمعی هر سنسور به همراه تنش اعمال شده بر نمونه‌ها در زمان بارگذاری را نشان می‌دهد. برای آزمایش‌ها، هر دو سنسور داده‌های مشابه به هم را برداشت کرده‌اند که نشان دهنده نصب مناسب سنسورها است.

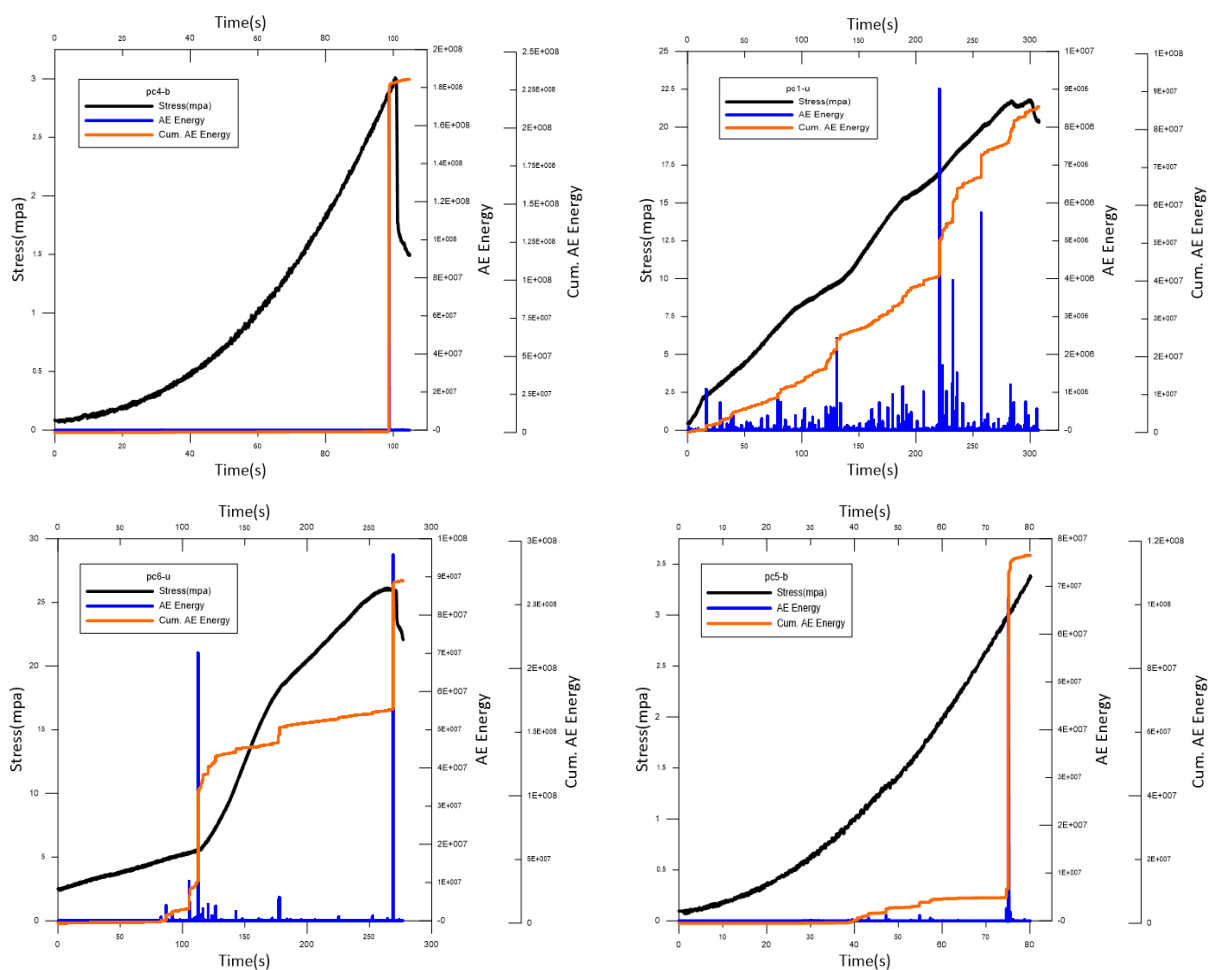


شکل ۱۳-۴) نمودار تغییرات مقدار شمارش تجمعی برای دو سنسور به صورت جداگانه و مقدار تنش در آزمایش‌های تک محوره (pc1-u و pc6-u) و برزلی (pc4-b و pc5-b)

فرآیند تغییر شمارش تجمعی AE همزمان با تغییرات تنش است، و روند صعودی تنش تا وقتی که باعث شکست نمونه شود و افت کند با مقدار شمارش تجمعی AE هر سنسور مشابه است و همچنین تولیدات انتشار آکوستیک هر سنسور برای وقتی که آزمایش تک محوره انجام شده است بیشتر از وقتی است که آزمایش برزلی روی نمونه‌ها انجام شده است. با بررسی داده‌های اندازه‌گیری شده هر سنسور در آزمایش‌ها، از یک کانال AE که بهترین نتیجه را داده است برای رسم نمودار پارامترهای انتشار آکوستیک استفاده شده است.

۴-۶-۳) پارامتر انرژی AE

انرژی، مساحت زیر نمودار دامنه-زمان موج AE و بالاتر از حد آستانه معرف انرژی AE است، شکل ۴-۱۴ نمودار انرژی، انرژی تجمعی و تنش اعمال شده را در آزمایش‌های فشاری تک محوره و برزیلین نشان می‌دهد. انرژی در نمونه‌های آزمایش برزیلی کمتر است و به صورت ناگهانی و با مقدار بالا در لحظه شکست نهایی می‌باشد و بر خلاف نمونه‌های آزمایش تک محوره قبل از لحظه شکست انتشارات آکوستیک کمی وجود دارد، ولی در آزمایش تک محوره قبل از شکست نهایی انتشارات آکوستیک بالایی وجود دارد.



شکل ۴-۱۴) نمودار تغییرات مقدار انرژی، انرژی تجمعی و تنش در آزمایش‌های تک محوره (pc1-u و pc6-u) و برزیلی (pc4-b و pc5-b)

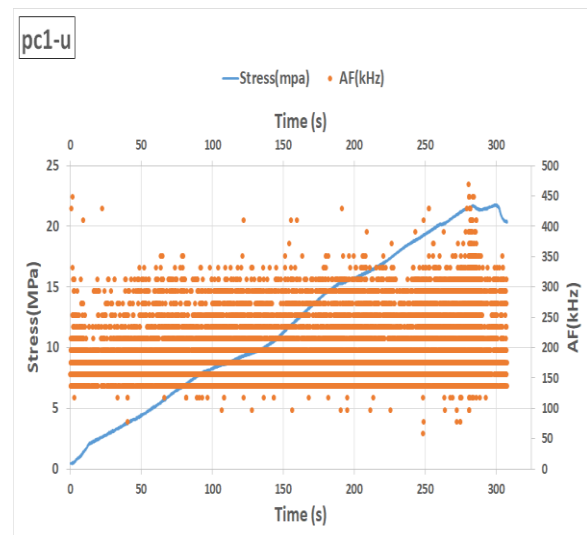
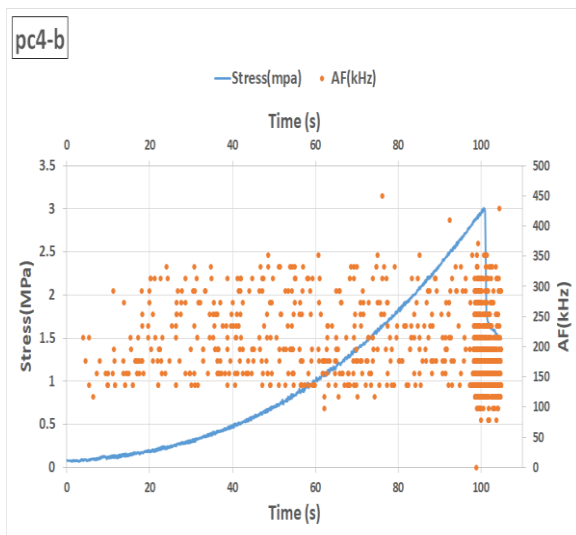
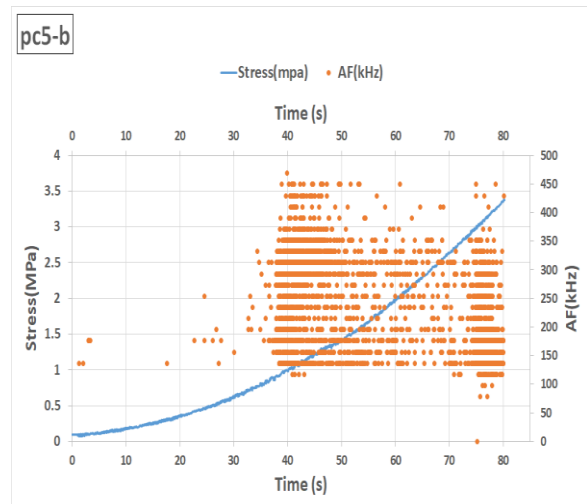
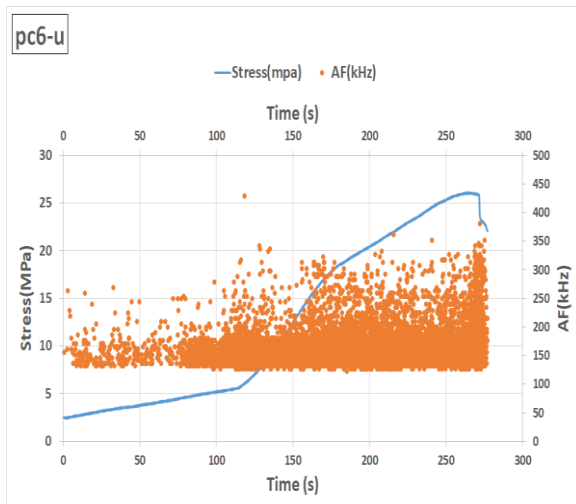
در نمونه‌های pc1-u و pc6-u تولیدات انرژی به صورت تدریجی و از مراحل آغازین بارگذاری شروع شده است و قبل از تنش حداکثر، نقطه اوج انرژی رخ داده است که دلیل آن ایجاد ریزترک‌ها در نمونه است

که منافذ و ترک‌های اولیه درون نمونه تحت فشرده‌سازی تک محوره فشرده می‌شود و انرژی به تدریج افزایش می‌یابد ولی در نمونه‌های pc4-b و pc5-b شکست ناگهانی و در زمان کمتری رخ می‌دهد و انرژی نیز به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد. تغییرات متفاوت انرژی AE، انرژی تجمعی AE و تنش در طول زمان بارگذاری مشاهده شده است. فرآیندهای تغییر انرژی AE همزمان با فرایندهای تغییر بازدهی‌های AE بوده و در کل انرژی AE تولید شده در آزمایش تک محوره بیشتر است و علاوه بر این مدت زمان آزمایش تا شکست نهایی در آزمایش برزلی در حین اعمال تنش بر روی نمونه کمتر است. انرژی AE و منحنی تجمعی انرژی AE همانند تغییرات شمارش، با تغییرات تنش اعمال شده بر روی نمونه‌ها مشابه است، یعنی شمارش تولیدی بیشتر با بالاترین سطح انرژی، مربوط به نمونه‌هایی است که بیشترین تنش را در لحظه شکست دارند.

۴-۶-۴) فرکانس متوسط (AF)

نسبت تعداد شمارش‌ها به مدت زمان موج AE که با AF (Average Frequency) نشان داده می‌شود را فرکانس (فراوانی) متوسط می‌گویند. این ویژگی در مرتبط کردن پارامترهای AE به حالت شکست و تحلیل آن‌ها کاربرد دارد. AF از رابطه ۴-۱ به دست می‌آید و نمودار تغییرات آن به همراه تنش بارگذاری در طول زمان برای آزمایش‌های فشاری تک محوره و برزلی در شکل ۴-۱۵ آورده شده است. AF برای آزمایش تک محوره در بازه ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلوهرتز و برای آزمایش‌های برزلی در بازه ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلوهرتز بدست آمده است. این نوع فعالیت‌ها به دلیل ایجاد ریزترک‌هایی است که درون نمونه ایجاد می‌شود، چون هیچ افت ظاهری در لحظه، یا وقوع شکست بزرگ وجود ندارد. در زمان شکستگی اصلی، یک افت ناگهانی در AF برای نمونه بوجود می‌آید، این افت ناگهانی در آزمایش برزلی نیز وجود دارد هر چند کمتر از شرایط بارگذاری فشاری تک محوره است.

$$AF = \frac{\text{شمارش}}{\text{مدت زمان}} \quad (4 - 1)$$



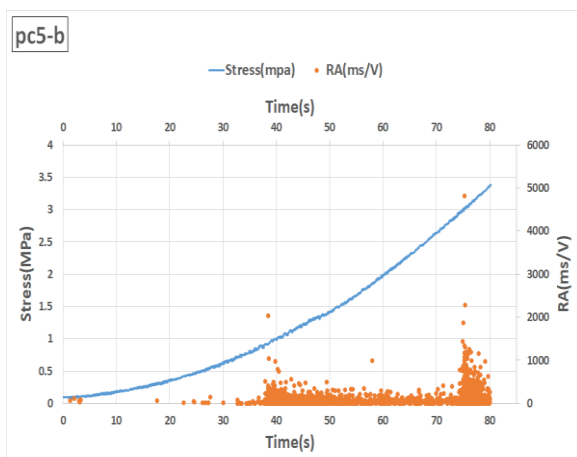
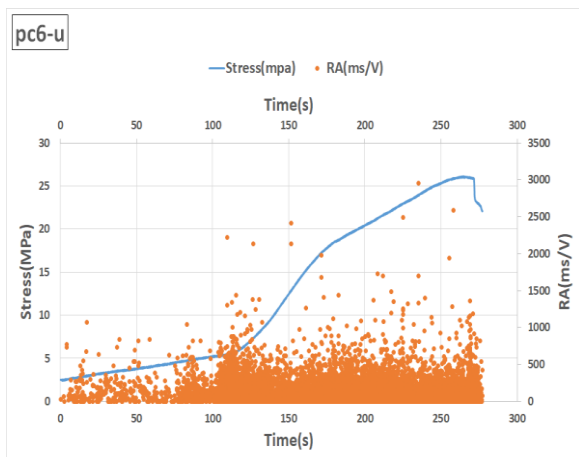
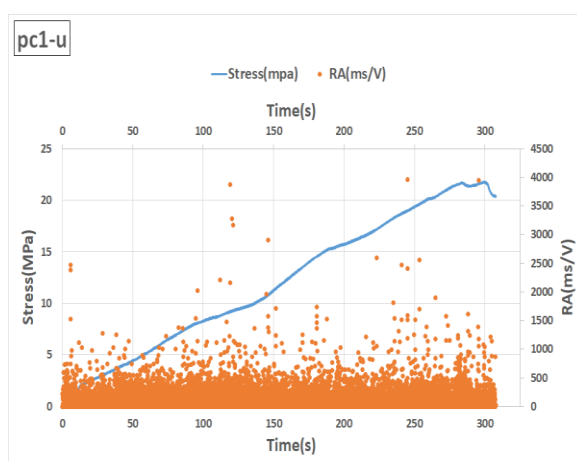
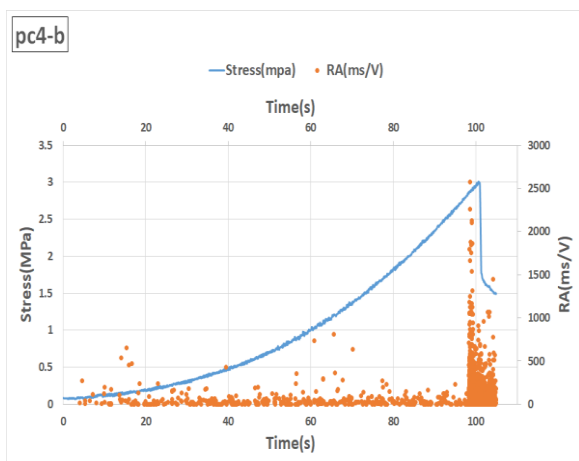
شکل ۱۵-۴) نمودار تغییرات فرکانس متوسط و تنش بارگذاری در آزمایش تک محوره (pc1-u و pc6-u) و برزلی (pc4-b و pc5-b)

فرکانس متوسط پس از گسیختگی اصلی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد که برای نمونه‌های آزمایش شده با روش فشاری تک محوره این روند کاهشی به صورت تدریجی و هموارتر است. همان‌گونه که در شکل ۱۵-۴ مشاهده می‌شود در مرحله ایجاد ریزترک‌ها، روند فعالیت AE در هر دو نوع آزمایش‌ها مشابه هستند ولی در آزمایش برزلی در لحظه شکست، انرژی به طور ناگهانی آزاد می‌شود که باعث افت ناگهانی AF می‌شود. با این حال، برای آزمایش تک محوره انرژی کمی پایین‌تر در محل شکست نمونه آزاد شده و مشخص است که انرژی شکستگی به تدریج آزاد شده است.

۴-۶-۵) زاویه خیز (RA)

نسبت زمان خیز به دامنه موج AE که با RA (Rise Angle) نشان داده می‌شود. RA از رابطه ۲-۴ محاسبه شده و نمودار تغییرات آن به همراه تنش بارگذاری برای آزمایش‌های تک محوره و برزلی در طول زمان در شکل ۱۶-۴ آورده شده است.

$$RA = \frac{\text{زمان خیز (RT)}}{\text{دامنه (A)}} \quad (4-2)$$



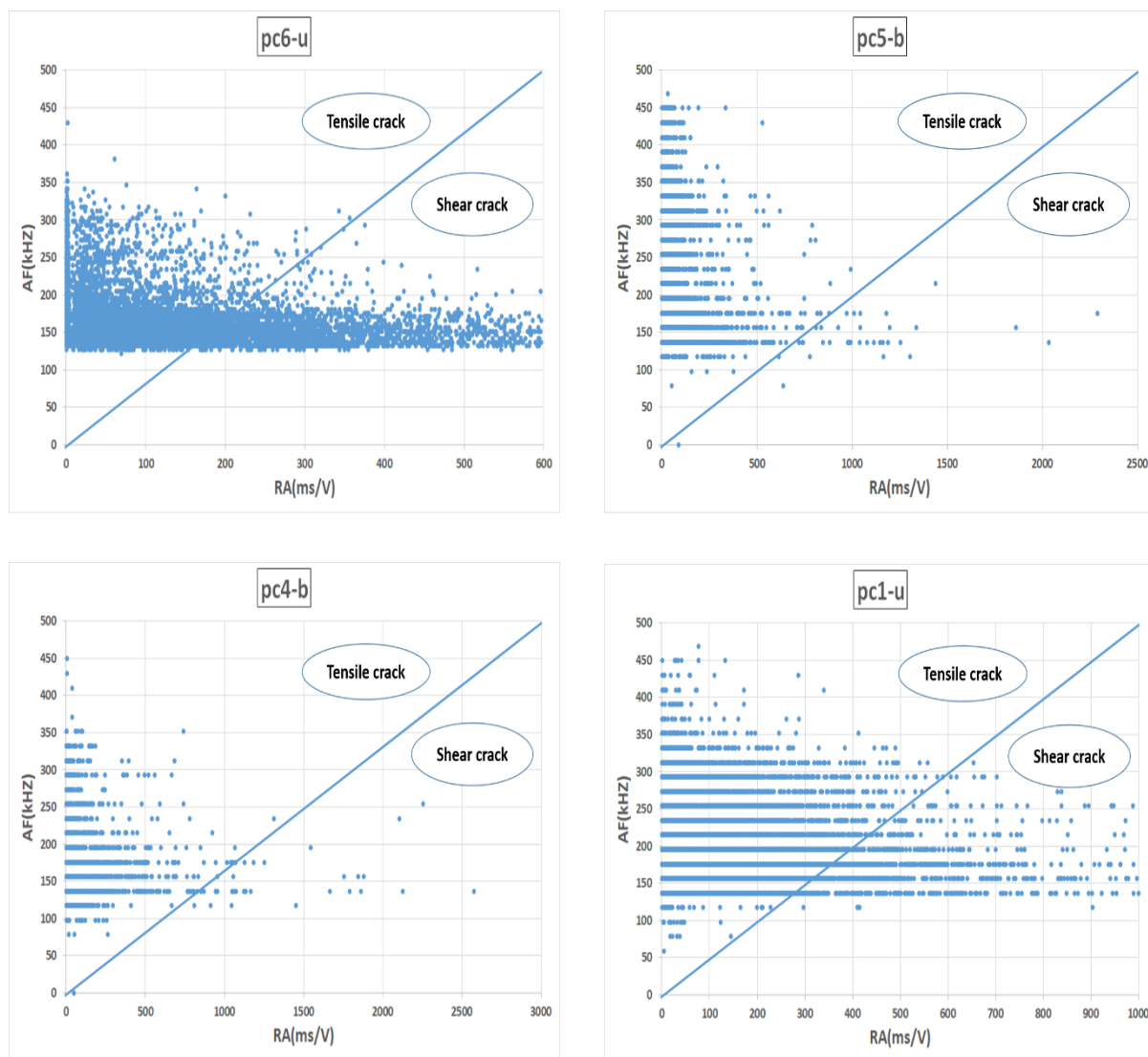
شکل ۱۶-۴) نمودار تغییرات زاویه خیز و تنش بارگذاری در آزمایش‌های تک محوره (pc1-u و pc6-u) و برزلی (pc4-b و pc5-b)

طبق شکل ۶-۲، ترک نوع کششی به صورت سیگنال AE با فرکانس متوسط بالا و مقدار RA پایین تعیین شده و ترک برشی با فرکانس متوسط پایین و مقدار RA بالا مشخص می‌شود. مقدار RA پارامتری است که برای توصیف نوع آسیب مورد استفاده قرار می‌گیرد که به عنوان نسبت زمان افزایش موج به دامنه در واحد ms/V بیان می‌شود. به طور کلی، RA به شکل موج مربوط می‌شود، که به طور قابل توجهی با پیشرفت آسیب تغییر می‌کند. از شکل ۱۶-۴، کاهش کمی در مقدار RA در مرحله اولیه بارگذاری و شروع تنش اعمالی بر روی نمونه‌ها مشاهده می‌شود. در زمان وقوع شکستگی، افزایش مقدار RA برای نمونه‌های تک محوره مشاهده می‌شود و با افزایش تنش نیز روند افزایشی RA نسبتاً ثابت بوده است. از سوی دیگر، افزایش مقدار RA برای نمونه‌های برزلی در زمان شکستگی قابل مشاهده است. RA به طور کلی تا پایان بارگذاری و شکست نمونه همچنان افزایش می‌یابد. بیشتر تغییرات RA در قبل و بعد از وقوع شکستگی است و روند تغییرات آن برای آزمایش تک محوره ملایم‌تر است ولی برای آزمایش برزلی در لحظه شکست، ناگهانی است. RA ممکن است در مرحله اول شکستگی (توسعه ریزترک) کاهش یابد، و سپس افزایش بیابد و تا پایان مرحله دوم به افزایش خود ادامه دهد (ایجاد ماکروترک) در آخرین مرحله شکستگی (باز شدن ماکروترک)، دوباره می‌توان روند کاهشی را مشاهده کرد و برعکس این موضوع را تا حدی می‌توان برای AF در نظر گرفت.

۴-۶-۶) طبقه بندی نوع ترک‌ها

تغییرات فرکانس متوسط و زاویه خیز برای نمونه‌ها، برای تعیین نوع سیگنال دریافتی توسط دستگاه آکوستیک بسیار مهم است. در شکل ۱۷-۴ طبقه بندی نوع ترک‌های ایجاد شده در آزمایش‌های فشاری تک محوره و برزلی نشان داده شده است. با توجه به تجزیه و تحلیل پارامترها، نقاط بالای خط از شکل ۱۷-۴ به عنوان ترک کششی و نقاط زیر آن به عنوان ترک نوع برشی طبقه بندی می‌شود. در آزمایش برزلی، حالت رشد ترک، ترک خوردگی کششی است که بیشتر ترک‌های ایجاد شده از این نوع هستند و ترک برشی بسیار کمی وجود دارد و برای آزمایش تک محوره نیز ترک‌ها بیشتر از نوع ترک‌های برشی است، و ترک کششی در مراحل اولیه بارگذاری نمونه‌ها ایجاد شده‌اند. به طور کلی، AF افزایش می‌یابد در حالی که

RA قبل شکست کاهش می‌یابد و در هنگام شکست اصلی AF کاهش می‌یابد و RA افزایش می‌یابد. بیشتر سیگنال‌های رشد ترک در فرایند آزمایش برزیلی از نوع سیگنال ترک کششی می‌باشد و سیگنال‌های ترک برشی کمتر هستند.



شکل ۱۷-۴) طبقه بندی نوع ترک‌ها در آزمایش‌های تک محوره (pc1-u و pc6-u) و برزیلی (pc4-b و pc5-b)

۴-۶-۷) تحلیل b-value

b-value نمایان‌گر حوادث ضعیف و قوی است به گونه‌ای که ریزترک باعث تعداد زیادی رویداد آکوستیک با انرژی کم شده به طوری که منجر به ترک خوردگی با مقدار b-value بالا می‌شود در حالی که

ماکروترک مقدار b-value کمی تولید می‌کند. وقتی تنش افزایش می‌یابد ریزترک‌ها به سمت به هم آمیختگی پیش می‌روند، و با افزایش تنش تا نقطه شکست، مقدار b-value کم می‌شود [111]. مراحل اولیه بارگذاری تا حداکثر مقاومت نمونه، مقدار b-value با افزایش تنش، افزایش می‌یابد و به تشکیل ریزترک‌ها در نمونه اشاره دارد. همچنین افت ناگهانی در مقادیر b-value در مرحله تنش حداکثر مشاهده شده است که نشان‌دهنده تغییر نوع تشکیل ترک از میکرو به ماکرو است و تشکیل ماکروترک باعث کاهش ناگهانی مقدار b-value شده است. بنابراین، تجزیه و تحلیل b-value می‌تواند برای درک ماهیت تشکیل ترک صورت پذیرد [17]. b-value معمولاً در زلزله‌شناسی کاربرد گسترده دارد و به صورت منفی و از نمودار لگاریتمی-خطی بین فرکانس زلزله و بزرگی آن بدست می‌آید (تعداد زلزله‌های بزرگتر از یک زلزله مشخص)، رابطه گوتنبرگ-ریشتر برای زلزله‌شناسی به صورت رابطه ۳-۴ می‌باشد [42].

$$\log_{10}(N) = a - b M \quad (4-3)$$

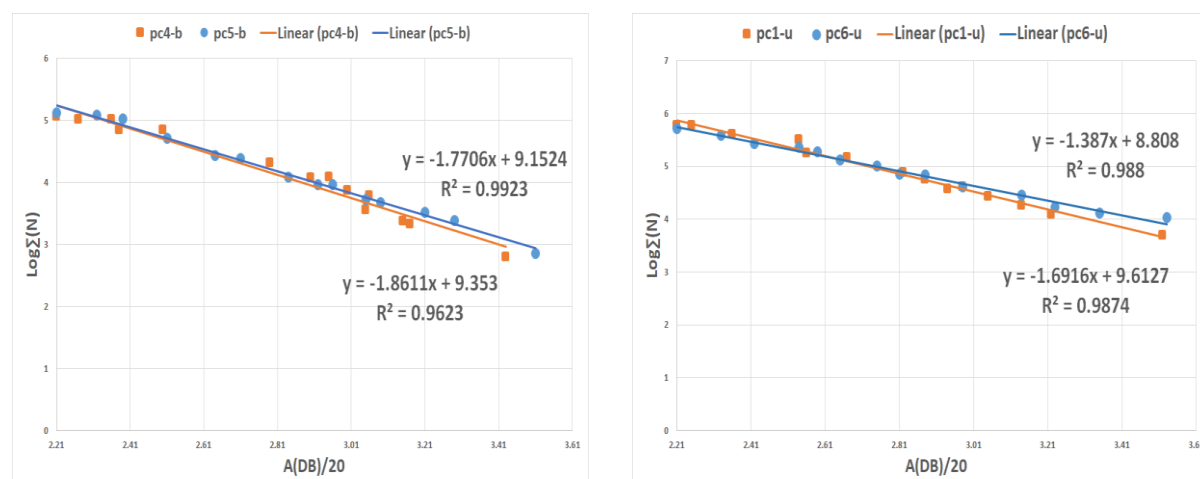
a و b ثوابتی هستند که به وضعیت تکتونیکی محدوده وابسته‌اند، M بزرگی زلزله و N تعداد زلزله‌های با بزرگی بیشتر از M در محدوده مورد نظر بیان می‌شود. b-value برای انتشار آکوستیک معمولاً از رابطه گوتنبرگ-ریشتر که بین فرکانس تجمعی و بزرگی زلزله است بدست می‌آید، رابطه به صورت زیر است [42]:

$$\log_{10}(N) = a - b \left(\frac{A_{dB}}{20} \right) \quad (4-4)$$

که در آن a و b ثوابتی هستند که به وضعیت ترک خوردگی نمونه وابسته‌اند و A_{dB} دامنه سیگنال‌های ناشی از ایجاد رخدادها و N تعداد رخدادها با دامنه بیشتر از A_{dB} می‌باشد، که تغییر ثوابت a و b در نمونه‌های مورد نظر بررسی شده است. روش b-value به طور گسترده برای تعیین خاصیت امواج لرزه‌ای ایجاد شده در طول زلزله استفاده شده است. مقدار b-value مشابه رابطه گوتنبرگ-ریشتر محاسبه می‌شود، که در زلزله‌شناسی کاربرد گسترده دارد. b-value به دلیل شباهت مشاهده شده بین موج لرزه‌ای و امواج AE، در تحلیل سیگنال AE استفاده شده است. کاربرد b-value در درک ماهیت تشکیل ترک و شناسایی تشکیل ماکروترک‌ها می‌باشد [17]. هنگامی که ترک‌ها در حال شکل‌گیری هستند، رویدادهای AE افزایش

می‌یابند و باعث کاهش مقدار b-value می‌شوند. هنگامی که ریزترک در مرحله اولیه ترک خوردگی رخ می‌دهد و زمانی که به هم آمیختگی ماکروتک شروع می‌شود، مقدار b-value بالا است. تحقیقات قبلی نشان داده است که مقدار b-value کمتر از ۱/۰ با تغییر ریزترک به ماکروتک مطابقت دارد [56].

مقدار b-value بر روی مجموعه‌ای از ۵۰ رخداد از داده‌های AE ثبت شده انجام می‌شود، زیرا ادبیات



گزارش شده نشان می‌دهد که تعداد رخدادها باید بین ۵۰ تا ۱۰۰ باشد (فرهیدزاده و همکاران ۲۰۱۳) [45]. توزیع دامنه از حد آستانه تا ۱۰۰ دسی‌بل طبقه بندی می‌شود. در هر مجموعه دامنه، تعداد رخدادهای AE شمارش می‌شوند و نمودار پراکندگی تعداد لگاریتم رخدادها در مقابل مقدار دامنه تقسیم بر ۲۰ برای هر مجموعه محاسبه می‌شود. از نقاط بدست آمده، برازش خطی با استفاده از روش حداقل مربع ترسیم می‌شود، شیب خط برازش نشان دهنده مقدار b-value است. زمان مربوطه، زمان آخرین رخداد (۵۰) مجموعه در نظر گرفته شده است. نمودار مقادیر b-value برای نمونه‌ها در آزمایش‌های تک محوره و برزیلی در شکل ۱۸-۴ آورده شده است.

شکل ۱۸-۴) مقادیر b-value برای نمونه‌ها در آزمایش‌های تک محوره (pc1-u و pc6-u) و برزیلی (pc4-b و pc5-b)

نمودارهای رسم شده در شکل ۱۸-۴، مشابه معیار گوتنبرگ-ریشتر می‌باشد که شیب و عرض از مبدا متفاوت دارند و معادله هر خط روی آن‌ها نوشته شده است. مبدا نقطه (۰ و ۲/۲۱) است که با حد آستانه

۴۴ دسی بل که برای AE در نظر گرفته شده متناظر است، که دامنه‌های کمتر از حد آستانه ثبت نشده‌اند. عرض از مبدا خطوط مورد نظر نشان دهنده تعداد رخدادهایی است که به سیگنال‌های AE منتهی می‌شوند و هر چه مقدار عرض از مبدا کمتر باشد، رخداد‌های ثبت شده کمتر است. بوسیله عرض از مبدا مقادیر ثبت شده، می‌توان میزان رخداد‌های ایجاد شده در نمونه را در حین افزایش تنش پی برد، که برای آزمایش برزیلی که شکست شکننده‌تر و ناگهانی‌تر است و در بازه زمانی کمتر رخ می‌دهد تا حدودی عرض از مبدا بیشتری نسبت به آزمایش تک محوره دارد و تعداد رخداد‌های منتهی به سیگنال AE بیشتر است. نکته دیگری که از نمودارها می‌توان ذکر نمود مقدار b-value است که متناظر است با شیب خط مربوط به هر نمونه که در زلزله‌شناسی افزایش b-value نشان دهنده کاهش نسب زلزله‌های بزرگ به زلزله‌های کوچک است، که با افزایش b-value زلزله‌های بزرگ کمتری رخ می‌دهد. در آزمایش برزیلی این نسبت به نمونه‌های آزمایش شده در آزمایش فشاری تک محوره بیشتر هستند که نشان دهنده این مورد است که هر چقدر مقدار b-value بیشتر باشد رخداد‌هایی با انرژی کمتر رخ داده است، که دلیل آن می‌تواند ترک‌های کوچک مقیاس با دامنه کم باشد.

۴-۶-۸) تحلیل Ib-value

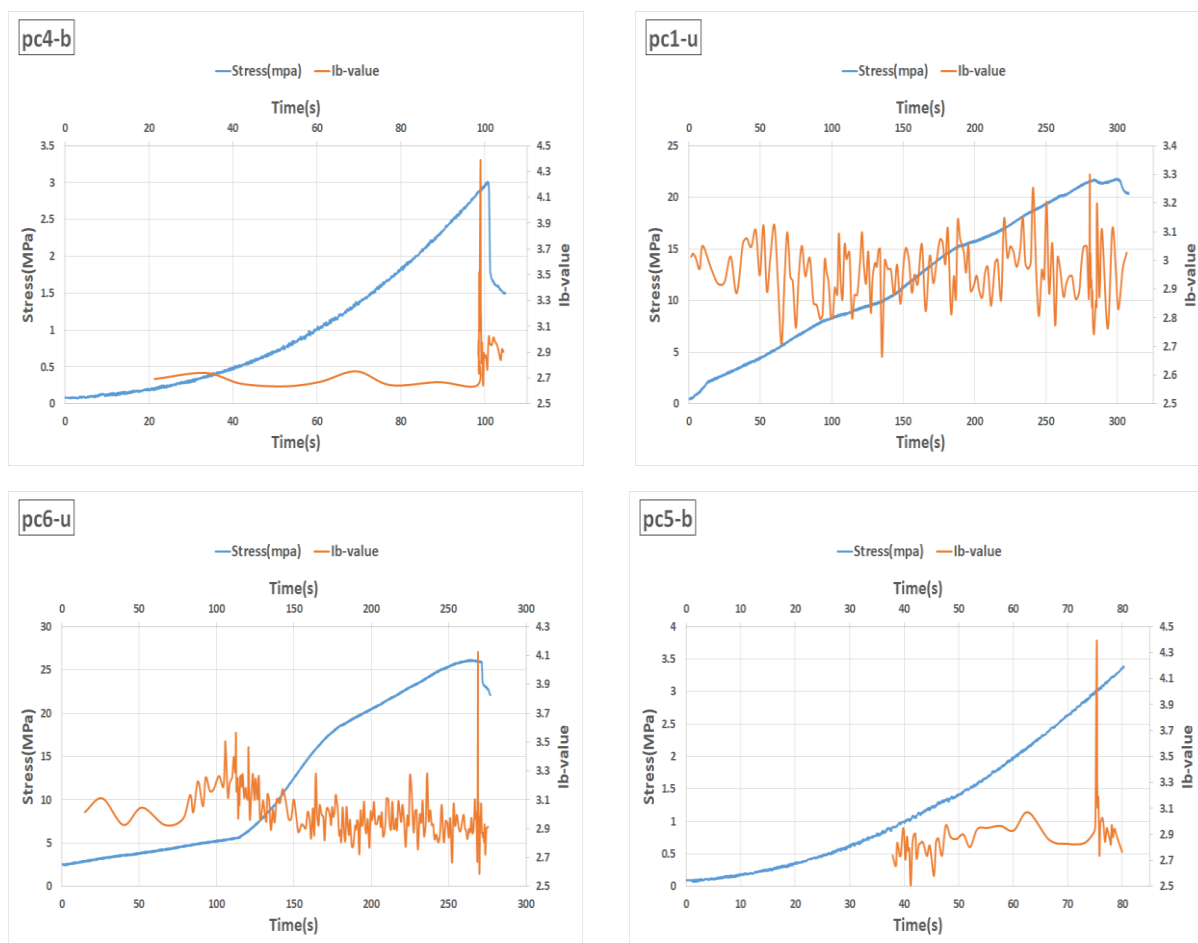
مقدار Ib-value یک پارامتر است که از داده‌های توزیع دامنه AE محاسبه می‌شود، که شامل فیلتر کردن AE با دامنه بالا و پایین به شیوه‌ای انتخابی است [42]. از آن جایی که توزیع دامنه AE در طول آزمایش متفاوت است، مقادیر آماری مانند میانگین و انحراف استاندارد هر مجموعه دامنه در نظر گرفته می‌شود. شیوتانی^۱ و همکاران (۲۰۰۱) با در نظر گرفتن حدودی برای دامنه رابطه b-value بهبود یافته (اصلاح شده) را ارائه داده‌اند که برای ارزیابی روند شکست نمونه استفاده می‌شود و Ib-value به صورت زیر محاسبه می‌شود [112]:

$$Ib = \frac{\log_{10}(N(\mu + \alpha_1\sigma)) - \log_{10}(N(\mu - \alpha_2\sigma))}{\sigma(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (4-5)$$

¹ Shiotani

که در آن μ میانگین توزیع دامنه، σ انحراف استاندارد و α_1 و α_2 ثابت‌هایی هستند که توسط کاربر تعریف می‌شود که نشان دهنده ضرایب کران پایین و بالای دامنه هستند. Ib-value به عنوان معیاری برای مشخص کردن توسعه ترک‌ها به کار می‌رود و تغییر مقدار آن مربوط به نوسان تعداد رویدادهای بزرگ و کوچک در نمونه، یعنی روند توسعه ترک در مقیاس‌های مختلف است. روند Ib-value نشان می‌دهد که ترک درون نمونه به طور ناگهانی و یا به طور پیوسته گسترش می‌یابد. هنگامی که مقدار آن به طور مداوم در نوسان است، نسبت رویدادهای AE بزرگ و کوچک در سطح پایدار حفظ می‌شود و ریزترک‌ها با مقیاس‌های داخلی مختلف به طور پایدار توسعه می‌یابند. نوسان زیاد مقادیر Ib-value نشان دهنده انفجار ناگهانی رشد ترک است و کاهش مقدار آن قبل از آسیب نشان می‌دهد که رخدادهای AE در مقیاس بزرگتر وجود دارد و ترک‌ها سرعت می‌گیرند و نفوذ می‌کنند [96].

روش انتشار آکوستیک کاربرد زیادی در بررسی مکانیک شکست دارد که این بررسی با تحلیل‌های متفاوت روی پارامترهای آن امکان‌پذیر است، Ib-value به این دلیل که یک معیار عددی در بررسی شکست است، در سازه‌های بزرگ مانند تونل‌ها، پل‌های بتنی، سدها می‌تواند به عنوان یک سیستم اعلام هشدار عمل کند. انتشار آکوستیک (AE) تولید شده در مراحل انجام آزمایش تک محوره و برزیلی با استفاده از نرم‌افزار متلب برای محاسبه Ib-value بهبود یافته مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در شکل ۱۹-۴، تغییرات Ib-value برای چهار نمونه آزمایش شده که دو نمونه تحت آزمایش برزیلی و دو نمونه تحت آزمایش تحت محوره قرار گرفتند، در نرم‌افزار متلب نمودار آن‌ها رسم شده است.



شکل ۱۹-۴) نمودار تغییرات Ib-value و تنش بارگذاری برای نمونه‌ها در آزمایش‌های تک محوره (pc1-u و pc6-u) و برزلی (pc5-b و pc4-b)

تعیین این پارامتر به سطح آسیب بستگی دارد و با این روش میزان آسیب نمونه تحت بارگذاری را می‌توان تعیین کرد و نشان داد که Ib-value بر اساس دامنه رخدادهای آکوستیک می‌تواند منجر به تعیین اندازه آسیب نمونه گردد. مقدار Ib-value در مرحله اولیه بارگذاری افزایش می‌یابد، که نشان دهنده افزایش رویدادهای ریزترک در نمونه‌ها است و با افزایش تنش، مقدار آن افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد نسبت رویدادهای ریزترک در مقیاس کوچک به اوج می‌رسد. پس از آن، مقدار Ib-value در یک محدوده کوچک متغیر است که نشان دهنده روند انتشار پیش‌رونده پایدار ریزترک‌ها قبل از حداکثر مقاومت نمونه است. در نقطه حداکثر مقاومت، Ib-value به حداکثر مقدار خود می‌رسد و در ادامه کاهش یافته و یک روند نزولی را طی می‌کند و کاهش مقدار ناگهانی آن نشان دهنده وقوع رویدادهای ترک خوردگی بزرگ است. تغییرات

این پارامتر طبق ثابت‌های تعریف شده برای ضرایب کران بالا و پایین دامنه در حدود $2/5$ الی $4/5$ است، که در اولین مرحله یعنی ایجاد ریزترک‌ها در نمونه‌ها یک روند صعودی دارد برای آزمایش برزیلی این روند صعودی کمی ملایم‌تر است. در ادامه اعمال تنش بر روی نمونه‌ها، افزایش لحظه‌ای در مقدار Ib-value مشاهده می‌شود که دلیل آن اتصال و به هم آمیختگی ریزترک‌ها و ایجاد ترک‌های بزرگ است. در ادامه آزمایش مشاهده می‌شود Ib-value روندی نزولی طی می‌کند که نشان می‌دهد ترک در حال گسترش است و در لحظه شکست Ib-value ناگهانی افزایش می‌یابد که برای آزمایش برزیلی این روند صعودی ناگهانی‌تر است و در مرحله بعدی مقدار Ib-value روند نزولی دارد که نشان دهنده رشد ترک بوده است.

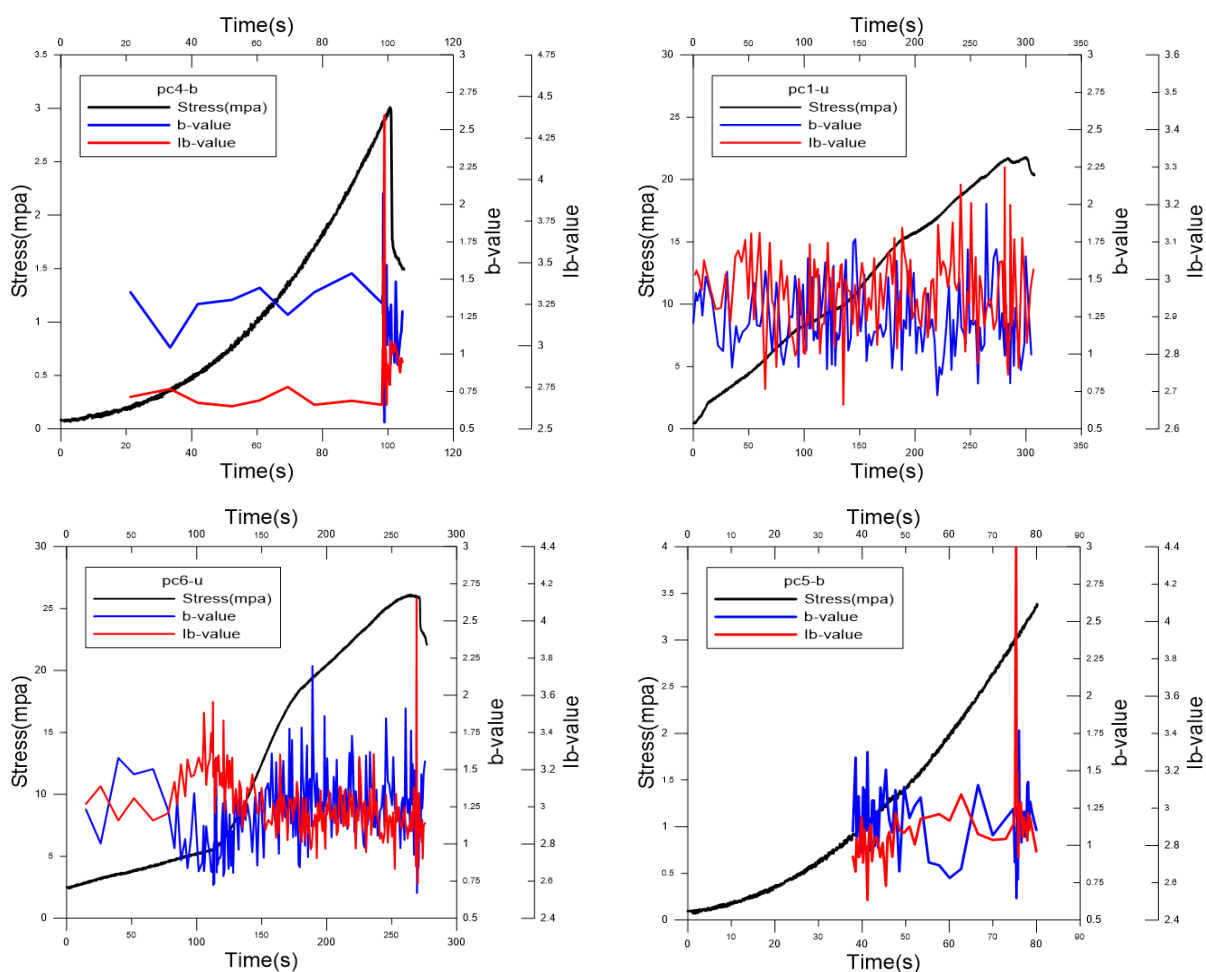
پس از شروع بارگذاری، مقدار Ib-value نسبت به کل فرایند بارگذاری در سطح نسبتاً بالایی قرار دارد که ترک‌های کوچک مقیاس در مرحله اولیه بیشتر هستند و تعداد زیادی ترک جدید با افزایش بارگذاری ایجاد می‌شوند. از آنجایی که مقیاس ترک جدید بزرگتر از ترک اولیه است، نسبت رویدادهای بزرگ AE به تدریج افزایش می‌یابد. فرایند توسعه ترک به گسیختگی نمونه نزدیک می‌شود، مقدار Ib-value به شدت نوسان می‌کند و به حداقل مقدار خود می‌رسد. رویدادهای بزرگ AE در این فرایند وجود دارند و تعداد زیادی ترک در مقیاس‌های مختلف شروع به گسترش و نفوذ می‌کنند و هنگامی که تنش به مقدار حداکثر می‌رسد، مقادیر Ib-value به شدت نوسان می‌کنند و تغییرات زیاد در مقدار Ib-value نشان دهنده تغییرات شدید در رشد ترک است. هنگامی که ریزترک در مرحله اولیه بارگذاری رخ می‌دهد، مقدار Ib-value بالا است و زمانی که ماکروترک شروع به گسترش می‌کند، مقدار Ib-value پایین است. این نتیجه ممکن است نشان دهنده ایجاد ترک‌های برشی کوچک در دوره اول بارگذاری باشد. سپس، ترک‌های کششی بزرگ بوجود می‌آیند که منجر به دوره دوم بارگذاری می‌شوند.

۴-۶-۹) مقایسه نتایج b-value و Ib-value

مقادیر b-value و Ib-value به وسیله نرم‌افزار متلب محاسبه شده و نمودار تغییرات آن‌ها به همراه تنش بارگذاری برای آزمایش‌های تک محوره و برزیلی برحسب زمان در شکل ۴-۲۰ آورده شده است. ماکروترک باعث آزادسازی انرژی کرنشی ذخیره شده در نمونه‌ها می‌شود، برای پیش‌بینی ماکروترک در

نمونه‌ها می‌توان از مقدار b -value استفاده کرد. مقدار b -value نسبت سیگنال AE با دامنه بالا به سیگنال AE با دامنه پایین را نشان می‌دهد. قبل از ایجاد ماکروترک‌ها، رویدادهای AE در مقیاس کوچک (ریزترک) در نمونه‌ها وجود دارند و انرژی کرنشی به صورت پیوسته ذخیره می‌شود و رویدادهای AE با دامنه‌های پایین فعال می‌شوند و مقدار b -value نسبتاً بالا است. هنگامی که ماکروترک رخ می‌دهد انرژی کرنشی ذخیره شده آزاد می‌شود و باعث انتشار امواج الاستیک با دامنه‌های بالا و مقدار b -value پایین می‌شود. بنابراین مقدار b -value بر اساس پارامترهای AE می‌تواند برای پیش‌بینی وقوع آسیب در مقیاس بزرگ در طول فرآیند شکست در نمونه‌ها استفاده شود.

در مراحل اولیه بارگذاری، انتشار آکوستیک ایجاد شده به دلیل ایجاد ریزترک‌ها باعث افزایش مقدار b -value و Ib -value می‌شود. این مقادیر در ادامه کاهش می‌یابند و در مرحله تغییر شکل الاستیک ثابت می‌شوند و در پایان این مرحله، در مرحله تغییر حجم غیر الاستیک به دلیل تشکیل تعداد زیادی ریزترک جدید در صفحه شکست نهایی، شکست ناگهانی رخ می‌دهد و مقادیر $b(Ib)$ -value به شدت کاهش می‌یابند. با افزایش تنش، $b(Ib)$ -value اندکی افزایش یافته که نشان دهنده عبور از مرحله تشکیل ترک به مرحله رشد ترک‌های جدید تشکیل شده است. ترک‌های جدید تشکیل شده شروع به رشد ناپایدار از نظر تعداد و اندازه در صفحه شکست نمونه‌ها می‌کنند، یعنی در مرحله‌ای که $b(Ib)$ -value ثابت می‌ماند سپس با شروع ترک ناپایدار باعث کاهش مقدار آن می‌شود تا وقتی که تنش اعمال شده به مقدار تنش شکست برسد، Ib -value به دلیل ادغام ترک‌ها و کاهش تنش، در لحظه شکست کاهش می‌یابد. b -value برای نمونه‌ها با سیگنال‌های AE با دامنه کم که در مرحله شکست ایجاد می‌شوند، کمتر کاربرد دارد، ولی مقادیر Ib -value محاسبه شده روند توزیع دامنه را بدون توجه به توزیع دامنه کلی نشان می‌دهد. برای مقادیر Ib -value، رخدادهای تجمعی AE در ناحیه دامنه کم بر مقدار شیب کلی تاثیر نمی‌گذارد، زیرا این مقادیر در یک منطقه کوچک محاسبه می‌شوند.

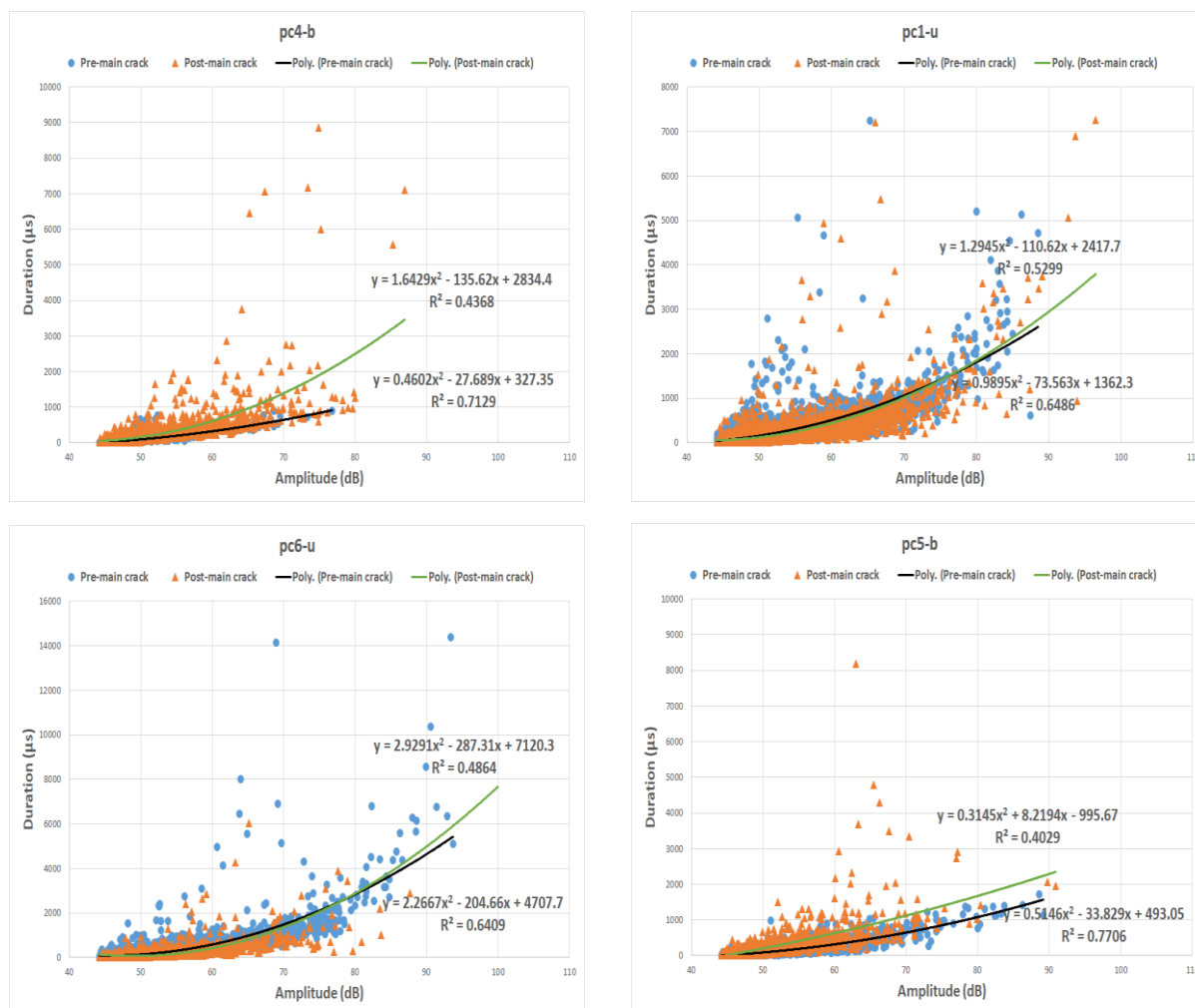


شکل ۲۰-۴) نمودار تغییرات b-value و lb-value و تنش بارگذاری برای نمونه‌ها در آزمایش‌های تک محوره (pc1-u و pc6- u) و برزلی (pc4-b و pc5-b)

۴-۶-۱۰) توزیع دامنه AE برحسب مدت زمان

توزیع دامنه AE برحسب مدت زمان برای نمونه‌ها در آزمایش‌های فشاری تک محوره و برزلی در شکل ۲۱-۴ نشان داده شده است. فعالیت‌های AE برای نمونه‌های تحت آزمایش برزلی در مرحله قبل از شکست (مرحله توسعه ریزترک‌ها)، در مقایسه با نمونه‌های تحت آزمایش فشاری تک محوره بسیار کمتر بوده است. این مورد ممکن است به دلیل رفتار شکست بتن باشد، که در اثر ایجاد ریزترک‌ها و فشرده شدن منافذ و ترک‌های اولیه درون نمونه‌ها تحت فشرده‌سازی تک محوره، تعداد زیادی رویداد AE قبل از شکست ایجاد شده است. تنها زمانی که ماکروترک در آزمایش‌های برزلی رخ می‌دهد، بخش قابل توجهی از انرژی

ساطع می‌شود. انرژی آزاد شده در آزمایش برزیلی بیشتر در لحظه شکست نمونه‌ها است و شکست به صورت ناگهانی رخ داده است. انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها با انجام آزمایش تک محوره افزایش می‌یابد ولی در همان زمان دامنه حداکثر و انرژی سیگنال AE کاهش می‌یابد.



شکل ۲۱-۴) توزیع دامنه AE برحسب مدت زمان در آزمایش‌های تک محوره (pc1-u و pc6-u) و برزیلی (pc4-b و pc5-b)

بر اساس شکل ۲۱-۴، برای نمونه‌های pc1-u و pc6-u تحت آزمایش تک محوره، رویدادهای AE بوجود آمده قبل و بعد از شکست اختلاف بسیار کمتری دارند و نشان می‌دهد قبل از شکست نیز در اثر ایجاد ریزترک‌ها، رویدادهای AE زیادی ایجاد شده و انرژی به صورت تدریجی آزاد شده است. محدوده مدت زمان AE برای نمونه‌های pc1-u و pc6-u به ترتیب برابر ۰ تا ۷۲۵۲ و ۰ تا ۱۴۳۸۹ میکروثانیه می‌باشد.

برای نمونه‌های pc4-b و pc5-b تحت آزمایش برزیلی، رویدادهای AE بوجود آمده بعد از شکست بسیار بیشتر است و نشان می‌دهد که ریزترک‌های اندکی قبل از شکست ایجاد شده است و در لحظه شکست، انرژی به دلیل ایجاد ماکروترک‌ها به صورت ناگهانی آزاد شده است. محدوده مدت زمان AE برای نمونه‌های pc4-b و pc5-b به ترتیب برابر ۰ تا ۸۸۵۴ و ۰ تا ۸۱۵۸ میکروثانیه می‌باشد. اگر چه فراوانی وقوع AE به طور قابل توجهی در نمونه‌های تک محوره بیشتر بوده است، ولی حداکثر دامنه ثبت شده آن کمی کمتر از نمونه‌های برزیلی بوده است (۹۶/۵ دسی بل در مقایسه با ۹۹/۴ دسی بل).

۴-۷) جمع بندی

در این بخش از تحقیق بر روی نمونه‌ها آزمایش‌های فشاری تک محوره و برزیلی به همراه رفتارنگاری انتشار آکوستیک انجام شده است. متوسط مقاومت فشاری نمونه‌ها ۲۴/۹۴ مگاپاسکال و متوسط مقاومت کششی نمونه‌ها ۳/۲۰ مگاپاسکال بوده است. سرعت موج طولی عبوری از نمونه‌ها ۳۵۴۶ متر بر ثانیه بدست آمده است. نمودار پارامترهای انتشار آکوستیک شامل کانت، انرژی و مقادیر تجمعی آن‌ها و همچنین مقادیر دامنه، مدت زمان، فرکانس متوسط، زاویه خیز، مقدار b-value و مقدار بهینه شده آن نسبت به تنش اعمالی بر روی نمونه‌ها در طول زمان بارگذاری رسم و تحلیل شده است. نتایج نشان داد که رخدادهای انتشار آکوستیک در مراحل ابتدایی بارگذاری تنش کم هستند، ولی با ادامه بارگذاری و افزایش تنش روی نمونه‌ها در نزدیکی نقطه حداکثر افزایش یافته‌اند و این به معنای ایجاد ترک‌های ناپایدار و شکست نمونه در نقطه حداکثر است. بیشتر سیگنال‌های رشد ترک در آزمایش‌های برزیلی از نوع سیگنال ترک کششی هستند، ولی برای آزمایش‌های فشاری تک محوره ترک برشی غالب می‌باشد. فعالیت‌های AE برای نمونه‌های تحت آزمایش برزیلی در مرحله قبل از شکست (مرحله توسعه ریزترک‌ها)، در مقایسه با نمونه‌های تحت آزمایش فشاری تک محوره بسیار کمتر بوده است. همچنین مقدار b(Ib)-value بر اساس پارامترهای انتشار آکوستیک می‌تواند برای پیش‌بینی وقوع آسیب در مقیاس بزرگ در طول فرایند شکست در نمونه‌ها استفاده شود.

فصل پنجم

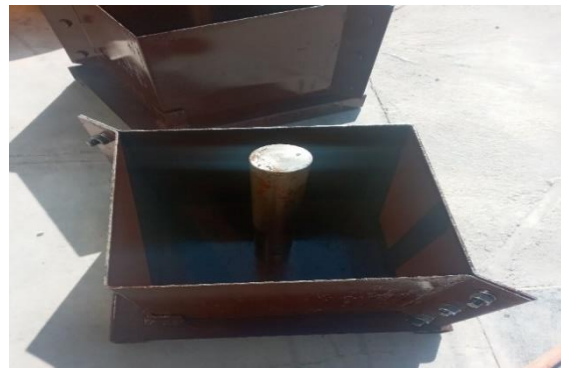
آزمایش‌های شکست هیدرولیکی به
همراه رفتارنگاری انتشار آکوستیک

۵-۱) مقدمه

در این فصل، به نحوه‌ی تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها پرداخته و تجهیزات استفاده شده در تحقیق معرفی می‌شوند. همچنین، روش و شرایط انجام آزمایش‌ها و ملاحظات مربوط به آن ارائه می‌گردد. با توجه به اهداف تعیین شده یعنی بررسی توسعه ترک خوردگی و ایجاد شکستگی ناشی از تزریق سیال، آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه آزمایش سه محوره واقعی انجام شده‌اند. نمونه‌های آزمایش به صورت بلوکی در حالت سه محوره واقعی قرار داده شده و یک ماده سیال را از حفره مورد نظر تزریق کرده تا شکستگی ایجاد شود و همزمان سنسورهای انتشار آکوستیک نصب شده بر نمونه‌ها و توسط دستگاه انتشار آکوستیک که دستگاه جداگانه‌ای است همزمان داده‌های انتشار آکوستیک اندازه‌گیری و ثبت می‌شوند. آزمایش‌ها تحت تنش‌های متفاوت اعمال شده بر روی نمونه‌ها انجام گرفته است تا بررسی تاثیر تنش‌های جانبی و قائم صورت پذیرد. همچنین در تعدادی از نمونه‌ها دو شکاف از پیش موجود در دیواره حفره مرکزی، مقابل هم و موازی با تنش افقی حداکثر ایجاد شده و مقایسه‌ای بین نمونه‌های بدون شکاف و شکافدار در ترکیبات تنش مشابه انجام شده است. نمودار پارامترهای انتشار آکوستیک نسبت به فشار تزریق سیال در طول آزمایش‌های شکست هیدرولیکی رسم و تحلیل شده است.

۵-۲) تهیه نمونه

برای انجام آزمایش شکست هیدرولیکی در شرایط سه محوره واقعی، از نمونه‌های مصنوعی استفاده شده است، این نمونه‌ها با طرح اختلاط و مصالح مشخص تهیه شده‌اند. طرح اختلاط و دانه‌بندی مصالح دانه‌ای برای تهیه نمونه‌ها، مشابه طرح اختلاط برای تهیه نمونه‌های استوانه‌ای در بخش ۲-۴ می‌باشد. برای این مورد قالب‌های فلزی در ابعاد ۳۰ سانتی‌متر مکعب طراحی و ساخته شده که یک میله فولادی به قطر ۵۰ میلی‌متر در مرکز آن‌ها قرار داده شده تا یک چال در مرکز نمونه برای تزریق سیال در نمونه ایجاد شود. تصویر قالب‌های فلزی ساخته شده در شکل ۱-۵ آورده شده است.



شکل ۱-۵) تصویر قالب‌های فلزی ساخته شده

برای خروج حباب و ایجاد ارتعاش در حین بتن‌ریزی بر اساس استانداردهای ASTM عمل شده است، به طوری که پس از هم زدن مصالح ریخته شده در قالب و گذشت ۲۴ ساعت از بتن‌ریزی، میله فولادی را از مرکز نمونه‌ها خارج کرده و نمونه‌ها را نیز از قالب‌ها خارج کرده و در حوضچه آب قرار داده‌اند، سپس بعد از گذشت ۷ روز از بتن‌ریزی، نمونه‌ها در محیط آزاد قرار گرفته تا برای انجام آزمایش آماده شوند. بتن‌ریزی نمونه‌های مکعبی و قرار دادن آن‌ها در حوضچه آب در شکل ۲-۵ آورده شده است. مراحل بتن‌ریزی و طرح اختلاط برای همه نمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. در پایان ۲۲ نمونه مکعبی با ابعاد ۳۰ سانتی‌متر مکعب دارای حفره مرکزی ۵۰ میلی‌متر با وزن متوسط ۵۵ کیلوگرم آماده شده است.



شکل ۲-۵) الف) بتن‌ریزی نمونه‌های مکعبی ب) قرار دادن در حوضچه آب

۳-۵) آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت ترکیبات تنش متفاوت به همراه رفتارنگاری انتشار آکوستیک

۲۳ نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است که ۱ نمونه سنگ مرمریت و ۱ نمونه بتنی در ابتدا برای راه-اندازی دستگاه سه محوره واقعی و تایید عملکرد آن آزمایش شده و سپس ۱۵ نمونه بتنی در ترکیبات تنش متفاوت تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند.

۵-۳-۱) دستگاه آزمایش شکست هیدرولیکی سه محوره واقعی

دستگاه سه محوره واقعی با قابلیت شبیه‌سازی شکست هیدرولیکی طراحی شده و شامل این موارد می‌باشد. ۱. محفظه اعمال فشار: در این محفظه نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۳۰ سانتی‌متر مکعب جای می‌گیرند. بر نمونه‌ها سه تنش مستقل ۱۵ (تنش محوری) و ۲۵ و ۲۵ (تنش جانبی) که توسط دو جفت جک هیدرولیکی که دو به دو به روی هم قرار دارند، اعمال می‌شوند [3]. (شکل ۵-۳)

۲. واحد تزریق: سیال را با نرخ ۶ cc/s به درون نمونه تزریق می‌نماید و جک قائم، برای آب‌بندی کردن حفره تزریق استفاده می‌شود. همچنین جک قائم، تنش در امتداد Z را بر روی نمونه اعمال می‌کند به گونه‌ای که واحد تزریق بر روی نمونه قرار می‌گیرد و جک قائم با اعمال فشار، آن را در تماس با نمونه قرار می‌دهد. واحد تزریق بوسیله حفره‌ای که دارد با سیال تزریق پر می‌شود [3]. (شکل ۵-۳)

۳. واحد هیدرولیک: این واحد دارای یک مخزن ۲۵۰ لیتری است که سیال را به داخل سیلندر جک-ها تزریق می‌کند. همچنین مسیری بر روی این واحد تعبیه شده که برای هدایت سیال به سامانه تزریق است، این واحد شامل ۲ موتور ۳ ph (۲۲۰۰ w) و ۲ پمپ دو طبقه برای تزریق سیال به مسیرهای مورد نظر است. همچنین تابلوی برق دستگاه نیز بر روی این واحد قرار دارد [3]. (شکل ۵-۳)

۴. واحد جمع‌آوری و نظارت بر داده‌ها: در این دستگاه نیروهایی که در سه راستای متعامد بر روی نمونه اعمال می‌شوند به وسیله فشارسنج‌هایی که بر روی واحد هیدرولیک نصب شده است و همچنین از طریق سیستم قرائت داده‌ها کنترل می‌گردند. برای ثبت داده از یک دستگاه دیتالاگر ۱۶ کاناله استفاده شده است که ۴ فرستنده فشار، که بوسیله ۴ کابل به دیتالاگر متصل هستند، از طریق یک کابل که از یک طرف به دیتالاگر و از طرف دیگر به کامپیوتر متصل است به یک سیستم ثبت اطلاعات (نرم افزار آرتیمیس) منتقل شده و با نمودارهای فشار-زمان نمایش داده می‌شوند [3]. (شکل ۵-۳)



شکل ۳-۵ (a) محفظه اعمال فشار؛ (b) واحد تزریق؛ (c) واحد هیدرولیک؛ (d) واحد جمع‌آوری و نظارت بر داده‌ها

ابعاد دستگاه ۲۴۰×۱۰۰×۱۰۰ سانتی‌متر مکعب و وزن آن ۳/۶ تن است. توسط دستگاه شکست هیدرولیکی سه محوره واقعی، تزریق سیال به حفره ایجاد شده درون نمونه انجام می‌شود که باعث اعمال فشار از درون به نمونه و افزایش فشار تا لحظه شکست نمونه می‌شود (فشار سیال تزریقی را تا ۲۰۰۰ bar می‌توان افزایش داد). هنگامی که عملیات تزریق انجام می‌شود نمونه در سه امتداد تحت تنش خواهد بود [3]. دستگاه شکست هیدرولیکی سه محوره واقعی در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵ دستگاه شکست هیدرولیکی سه محوره واقعی استفاده شده

۵-۳-۲) تجهیزات آزمایش شکست هیدرولیکی

در آزمایش‌های شکست هیدرولیکی برای سیال تزریقی، با توجه به مطالعات و تحقیقات صورت گرفته در این زمینه با افزایش ویسکوزیته سیال، فشار شکست کاهش می‌یابد، بنابراین باید از سیالی استفاده شود که ویسکوزیته نسبتاً بالایی داشته باشد، به این منظور از روغن هیدرولیک ۶۸h با دبی تزریق ۰/۱۹ s/ccec که از ویسکوزیته مناسبی برخوردار است در همه آزمایش‌ها استفاده شده است. برای کاهش اصطکاک بین سطح نمونه و صفحات فلزی جک‌های دستگاه شکست هیدرولیکی سه محوره واقعی از ۶ لاستیک فشرده با ضخامت حدوداً ۷ میلی‌متر استفاده شده که بین نمونه و جک‌ها قرار می‌گیرند. برای آب‌بندی انتهای حفره موجود در نمونه‌های مکعبی، باید از ماده‌ای استفاده شود که به علاوه قدرت و استحکام کافی از کیفیت بالایی برخوردار باشد، از چسب سنگ استفاده شده و با استفاده از آن دهانه پایینی حفره برای انجام آزمایش شکست هیدرولیکی آب‌بندی شده است. در شکل ۵-۵ آب‌بندی انتهای حفره موجود در نمونه‌های مکعبی نشان داده شده است.



شکل ۵-۵) آب‌بندی انتهای حفره موجود در نمونه‌های مکعبی

نصب سنسور آکوستیک برای انجام آزمایش شکست هیدرولیکی تحت بارگذاری سه محوره واقعی بر روی نمونه‌های مکعبی، کمی دشوار است و لازم است برای نصب سنسور به حفاظت آن توجه شود و سنسور نیز تثبیت شود. در آزمایش شکست هیدرولیکی، از ۴ سنسور پیزوالکتریک AE در تمام آزمایش‌ها به منظور رفتارنگاری و اندازه‌گیری انتشار آکوستیک در نمونه‌های تحت آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. به منظور نصب سنسورها بدون آسیب رسیدن به آن‌ها، صفحه‌های فلزی طراحی شد که بین نمونه و جک‌های

هیدرولیکی دستگاه قرار گیرد و سنسور درون این صفحات جانمایی شده است. قرار دادن سنسور داخل صفحه دو مسئله اصلی دارد، اول، هدف از جک‌های هیدرولیکی دستگاه انتقال تنش از آن‌ها به طور مساوی در سراسر هر وجه نمونه است و تغییر هندسه چنین جک‌هایی توزیع تنش بر وجه نمونه را تغییر می‌دهد که این مسئله با حذف فقط مقدار فولاد لازم برای قرار دادن سنسور و عبور کابل آن تا حد ممکن به حداقل رسید، دوم، این طراحی به راحتی سنسور و کابل آن را در خود جای می‌دهد و سنسور را در تماس با سطح نمونه قرار می‌دهد، یک محفظه نیز برای سنسور ایجاد شده است که در آن قرار می‌گیرد و در اطراف دیواره‌های جانبی سنسور از فوم استفاده شده است که باعث ثابت ماندن سنسور شود و همچنین از انتقال هر گونه نویز از جک‌های دستگاه را کاهش دهد. در پشت سنسور نیز یک ورقه کوچک فلزی قرار داده می‌شود که با پیچ به صفحه فلزی اتصال داده می‌شود و نیروی کافی را به پشت سنسور وارد می‌کند تا آن را همیشه در تماس با وجه نمونه نگه دارد و تا فشار ۱۰ مگاپاسکال از طرف جک‌های هیدرولیکی از سنسور محافظت می‌کند. شکل ۵-۶ محفظه قرارگیری سنسور AE و صفحه فلزی ماشین‌کاری شده را نشان می‌دهد که در ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی‌متر و ضخامت ۲۲ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۵-۶ (الف) صفحه فلزی ماشین‌کاری شده، (ب) محفظه قرارگیری سنسور AE

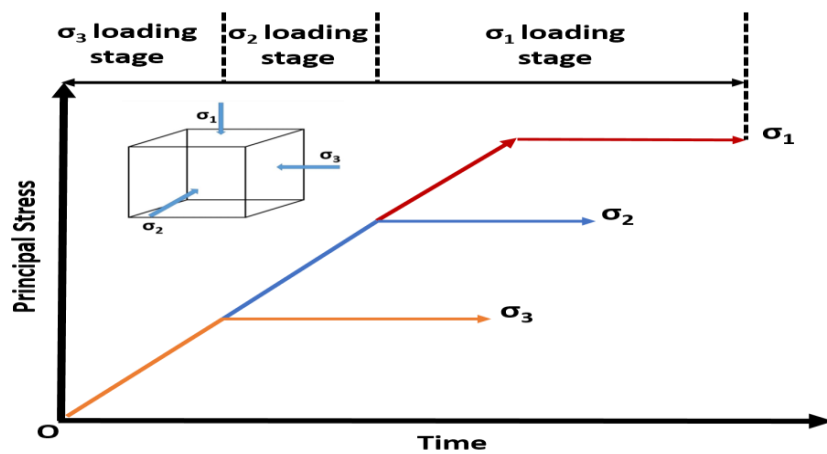
۵-۳-۳) مراحل انجام آزمایش شکست هیدرولیکی

ابتدا نمونه‌ی مورد نظر در داخل دستگاه به شیوه‌ای قرار داده می‌شود که دقیقاً در مرکز آن قرار گیرد و نازل روغن در قسمت تزریق سیال، در وسط حفره مرکزی نمونه مستقر شود. در تمامی آزمایش‌ها از روغن

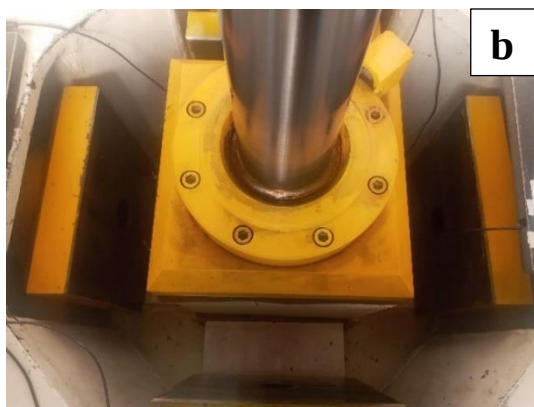
هیدرولیک ۶۸h استفاده شده و انتهای حفره‌ها بوسیله چسب سنگ آببندی شده است. پس از قرارگیری نمونه در دستگاه، جک‌های جانبی به سمت نمونه حرکت داده می‌شوند تا به صورت ظاهری در مرکز قرار گرفتن نمونه تایید گردد و سپس جک قائم به سمت نمونه حرکت داده می‌شود. لازم به ذکر است جک قائم فقط برای در مرکز نگه داشتن نمونه به سمت آن حرکت داده می‌شود و به محض تماس با نمونه اعمال بار از طریق آن متوقف می‌شود. برای نصب سنسورهای AE، صفحه‌های فلزی طراحی شده بین نمونه و جک-های هیدرولیکی دستگاه قرار می‌گیرند.

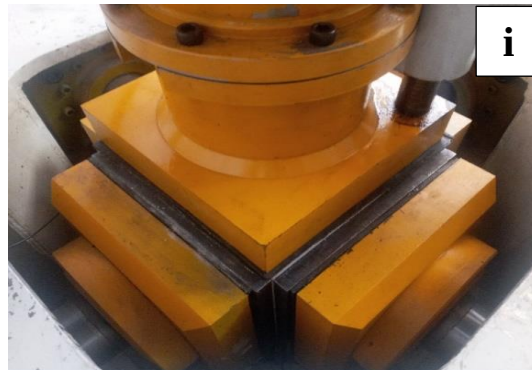
سپس جک‌های جانبی در راستای x و y به سمت نمونه حرکت داده می‌شود تا نمونه را در محل خود تثبیت کند و بعد از اطمینان از تثبیت نمونه، جک قائم به سمت بالا هدایت می‌شود تا سامانه تزریق بر روی نمونه و بین نمونه و جک قائم قرار بگیرد و همزمان حفره مرکزی نمونه بوسیله روغن هیدرولیک ۶۸h پر می‌شود. حال می‌توان جک قائم را به سمت سامانه تزریق حرکت داد که به دنبال آن سامانه تزریق بر روی نمونه قرار می‌گیرد، در این لحظه نمونه آماده است تا تنش‌های قائم و جانبی به میزان تعیین شده بر روی آن اعمال شوند.

اعمال تنش‌های جانبی و قائم به صورت سه محوره واقعی بارگذاری شده است، یعنی هر سه محور تنش تا مقدار تنش افقی حداقل بارگذاری می‌شوند و سپس تنش افقی حداقل ثابت می‌شود و تنش‌های افقی حداکثر و تنش قائم تا مقدار تنش افقی حداکثر بارگذاری می‌شوند و تنش افقی حداکثر ثابت می‌شود و سپس تنش قائم به مقدار تعیین شده بارگذاری می‌شود. پس از تثبیت تنش‌های قائم و جانبی، داخل سامانه تزریق دستگاه با سیال تزریق مورد نظر پر می‌شود و عملیات تزریق آغاز می‌شود، همزمان با شروع تزریق سیال، رفتارنگاری انتشار آکوستیک آغاز می‌شود و زمانی که شکست در نمونه اتفاق افتاد آزمایش به اتمام رسیده و افت فشار رخ می‌دهد که همزمان تزریق سیال و انتشار آکوستیک متوقف می‌شوند. نمودار بارگذاری شرایط تنش سه محوره واقعی در شکل ۷-۵ و مراحل انجام آزمایش‌ها در شکل ۸-۵ از شماره a تا z آورده شده است.



شکل ۷-۵) نمودار بارگذاری شرایط تنش سه محوره واقعی





شکل ۵-۸) مراحل انجام آزمایش شکست هیدرولیکی؛ (a) استقرار نمونه در داخل دستگاه، (b) تثبیت نمونه با جک قائم، (c) قرار دادن صفحات فلزی دارای سنسور AE، (d) حرکت دادن جک‌های جانبی، (e) هدایت جک قائم به سمت بالا و پر کردن حفره مرکزی با سیال، (f) نمونه آماده آزمایش، (g) حرکت دادن جک قائم و قرار گرفتن سامانه تزریق بر روی نمونه، (h) پر کردن سامانه تزریق با سیال، (i) اعمال تنش‌های جانبی و قائم و شروع عملیات تزریق، (j) نمونه شکسته شده

۵-۳-۴) نتایج آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت بارگذاری سه محوره واقعی

نتایج آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت بارگذاری سه محوره واقعی در جدول ۵-۱ آورده شده است. برای هر نمونه آزمایش شده ترکیب تنش اعمال شده بر آن و فشار شکست به دست آمده از آزمایش ذکر شده است.

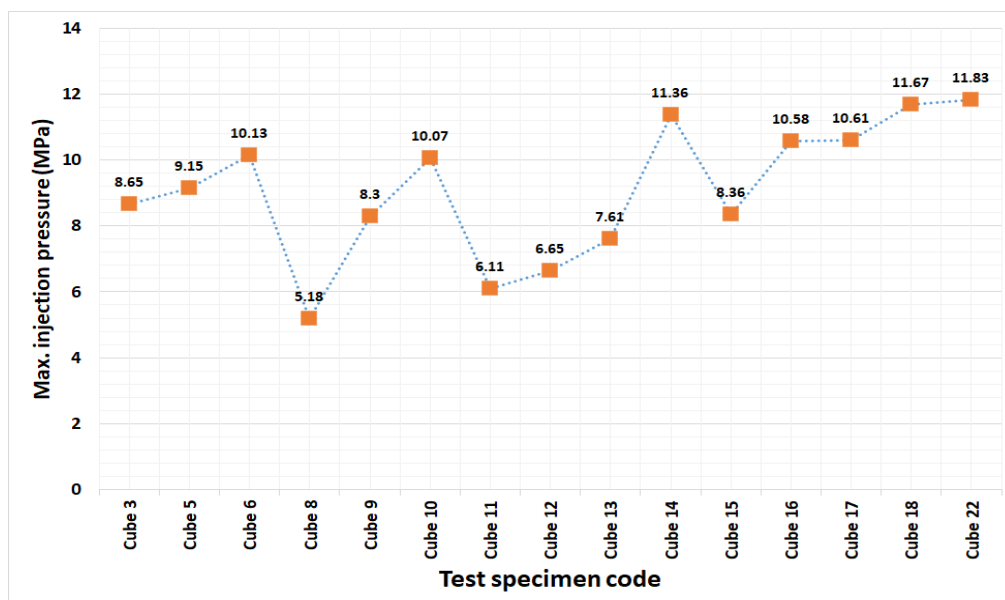
جدول ۱-۵) نتایج بدست آمده از آزمایش‌های انجام شده بر اساس ترکیب تنش‌های مختلف

شماره آزمایش	کد نمونه	جنس نمونه	هدف آزمایش	فشار شکست (MPa)	تنش قائم (MPa)	تنش افقی حداکثر (MPa)	تنش افقی حداقل (MPa)	شکاف روی دیواره حفره	توضیحات
۱	Cube.M	مرمریت	راه‌اندازی دستگاه سه‌محوره واقعی	---	۱۰	۶	۵	---	بدون رفتارنگاری انتشار آکوستیک و ثبت داده
۲	Cube 1	بتن	راه‌اندازی دستگاه سه‌محوره واقعی	---	۱۰	۶	۵	---	بدون رفتارنگاری انتشار آکوستیک و ثبت داده
۳	Cube 2	بتن	ترکیب تنش‌های مختلف	۱۱/۹۹	۱۵	۱۰	۵	---	---
۴	Cube 3	بتن	ترکیب تنش‌های مختلف	۸/۶۵	۱۰	۱۰	۱۰	---	---
۵	Cube 4	بتن	ترکیب تنش‌های مختلف	---	۱۰	۵	۵	---	شکست نمونه قبل از تزریق سیال
۶	Cube 5	بتن	ترکیب تنش‌های مختلف	۹/۱۵	۱۰	۵	۵	---	---
۷	Cube 6	بتن	ترکیب تنش‌های مختلف	۱۰/۱۳	۲۰	۱۰	۱۰	---	---
۸	Cube 7	بتن	ترکیب تنش‌های مختلف	۸/۵	۱۵	۱۰	۱۰	---	---
۹	Cube 8	بتن	ترکیب تنش‌های مختلف	۵/۱۸	۷	۱	۱	---	---

---	---	۱	۲/۵	۱۰	۸/۳۰	ترکیب تنش‌های مختلف	بتن	Cube 9	۱۰
---	---	۵	۵	۱۵	۱۰/۰۷	ترکیب تنش‌های مختلف	بتن	Cube 10	۱۱
---	---	۷	۷	۷	۶/۱۱	ترکیب تنش‌های مختلف	بتن	Cube 11	۱۲
---	---	۷	۱۰	۷	۶/۶۵	ترکیب تنش‌های مختلف	بتن	Cube 12	۱۳
---	---	۲/۵	۵	۱۰	۷/۶۱	ترکیب تنش‌های مختلف	بتن	Cube 13	۱۴
---	---	۵	۷	۱۰	۱۱/۳۶	ترکیب تنش‌های مختلف	بتن	Cube 14	۱۵
---	---	۲/۵	۱۰	۱۵	۸/۳۶	ترکیب تنش‌های مختلف	بتن	Cube 15	۱۶
---	---	۵	۱۰	۱۰	۱۰/۵۸	ترکیب تنش‌های مختلف	بتن	Cube 16	۱۷
---	---	۵	۱۰	۲۰	۱۰/۶۱	ترکیب تنش‌های مختلف	بتن	Cube 17	۱۸
---	---	۵	۱۰	۱۵	۱۱/۶۷	ترکیب تنش‌های مختلف	بتن	Cube 18	۱۹
---	شکاف موازی با تنش افقی حداکثر	۵	۵	۱۰	۸/۹۶	شکاف از پیش موجود	بتن	Cube 19	۲۰
---	شکاف موازی با تنش افقی حداکثر	۷	۱۰	۷	۶/۱۹	شکاف از پیش موجود	بتن	Cube 20	۲۱

---	شکاف موازی با تنش افقی حداکثر	۵	۱۰	۱۵	۱۱/۵۳	شکاف از پیش موجود	بتن	Cube 21	۲۲
---	---	۱۰	۱۰	۱۵	۱۱/۸۳	ترکیب تنش‌های مختلف	بتن	Cube 22	۲۳

با هدف بررسی تاثیر ترکیبات تنش متفاوت بر روی فشار شکست، از ۴ نوع ترکیب تنش استفاده شده است. ترکیباتی که تنش‌های جانبی و قائم اعمال شده مقدار برابر دارند ($\sigma_h = \sigma_H = \sigma_V$) و ترکیباتی که تنش‌های جانبی برابر ولی تنش قائم بزرگتر دارند ($\sigma_h = \sigma_H < \sigma_V$)، همچنین تنش افقی حداقل برابر تنش قائم و کوچکتر از تنش افقی حداکثر ($\sigma_h = \sigma_V < \sigma_H$) و در آخر حالتی که تنش قائم بزرگتر از تنش افقی حداکثر و تنش افقی حداکثر نیز بزرگتر از تنش افقی حداقل باشد ($\sigma_h < \sigma_H < \sigma_V$). برای بررسی تاثیر ترکیبات تنش بر روی فشار شکست نمونه‌ها، ۱۵ ترکیب تنش متفاوت بر روی نمونه‌ها اعمال شده است که فشار شکست نمونه‌ها در شکل ۹-۵ قابل مشاهده است.



شکل ۹-۵) فشار تزریق سیال در لحظه شکست نمونه‌ها در ترکیبات تنش متفاوت

۵-۳-۴-۱) مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج مدل تحلیلی

حسین^۱ و همکاران (۲۰۰۰)، فجار^۲ و همکاران (۲۰۰۸) و پان^۳ و همکاران (۲۰۲۰) برای بدست آوردن مقدار فشار شکست، مدل‌های تحلیلی ارائه داده‌اند و مقایسه‌ای بین فشار شکست بدست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی و مدل‌های تحلیلی انجام داده‌اند. برای مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی از معیار اصلاح شده فشار شکست (P_b) که بر اساس رابطه ۵-۱ می‌باشد، استفاده شده است [113].

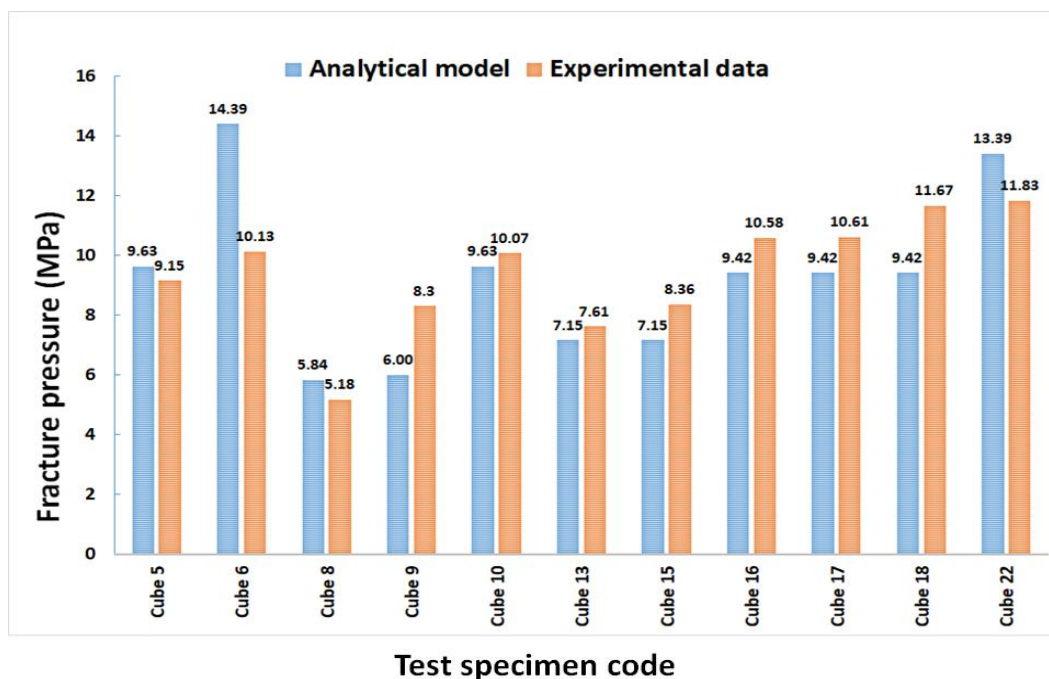
$$P_b = \frac{[(2\frac{a}{b} + 1)\sigma_h - \sigma_v]}{2\frac{a}{b} - 1} + \gamma\sigma_T \quad ; \gamma = Ae^{B\sigma_H} \quad (5-1)$$

که در آن σ_T مقاومت کششی نمونه‌ها، σ_h تنش افقی حداقل، σ_H تنش افقی حداکثر، σ_v تنش قائم، A و B ثابت‌هایی هستند که بر اساس داده‌های آزمایش‌ها فیت شده‌اند و مقادیر آن‌ها برابر $A=1/5$ و $B=-0.01$ بدست آمده است. همچنین برای سادگی یک شاخص γ معرفی شده است [113]. مطابق شکل ۵-۱۰ نتایج معیار اصلاح شده در اغلب موارد با نتایج آزمایشگاهی مطابقت نشان می‌دهند.

¹ Hossain

² Fjar

³ Pan



شکل ۵-۱۰ مقایسه فشار شکست بدست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی با مدل تحلیلی

۵-۳-۴-۲) تاثیر ترکیبات تنش بارگذاری بر روی فشار شکست هیدرولیکی

فشار شکست در فرایند شکست هیدرولیکی به مقاومت کششی، تنش افقی حداقل و تنش افقی حداکثر بستگی دارد. در شکستگی قائم تنش افقی حداکثر در امتداد شکستگی است و تنش افقی حداقل عمود بر صفحه شکستگی است. در فرایند شکست هیدرولیکی، سیال به داخل چال تزریق می‌شود که با اعمال فشار باعث ایجاد شکستگی در نمونه می‌شود که هدف این کار غلبه بر مقاومت کششی و تنش‌های برجا است. برای ایجاد شکستگی باید بر تنش افقی حداقل و مقاومت کششی غلبه شود، در شکست هیدرولیکی در مرحله اول بر مقاومت کششی غلبه می‌شود که مقاومت کششی نمونه‌ها بر اساس آزمایش‌های صورت گرفته به طور میانگین $3/2$ مگاپاسکال می‌باشد، سپس در مرحله دوم بر تنش افقی حداقل غلبه می‌شود. تاثیر ترکیبات تنش بارگذاری متفاوت بر روی فشار شکست هیدرولیکی در جدول ۵-۲ نشان داده شده است.

جدول ۲-۵) تاثیر ترکیبات تنش بارگذاری متفاوت بر روی فشار شکست هیدرولیکی

کد نمونه	تنش افقی حداقل σ_h (MPa)	تنش افقی حداکثر σ_H (MPa)	تنش قائم σ_V (MPa)	فشار شکست (MPa)
$(\sigma_h < \sigma_H < \sigma_V)$				
Cube 9	۱	۲/۵	۱۰	۸/۳۰
Cube 13	۲/۵	۵	۱۰	۷/۶۱
Cube 14	۵	۷	۱۰	۱۱/۳۶
Cube 15	۲/۵	۱۰	۱۵	۸/۳۶
Cube 18	۵	۱۰	۱۵	۱۱/۶۷
Cube 17	۵	۱۰	۲۰	۱۰/۶۱
$(\sigma_h = \sigma_H < \sigma_V)$				
Cube 8	۱	۱	۷	۵/۱۸
Cube 5	۵	۵	۱۰	۹/۱۵
Cube 10	۵	۵	۱۵	۱۰/۰۷
Cube 22	۱۰	۱۰	۱۵	۱۱/۸۳
Cube 6	۱۰	۱۰	۲۰	۱۰/۱۳
$(\sigma_h = \sigma_H = \sigma_V)$				
Cube 11	۷	۷	۷	۶/۱۱
Cube 3	۱۰	۱۰	۱۰	۸/۶۵
$(\sigma_h = \sigma_V < \sigma_H)$				
Cube 12	۷	۱۰	۷	۶/۶۵
$(\sigma_h < \sigma_H = \sigma_V)$				
Cube 16	۵	۱۰	۱۰	۱۰/۵۸

در آزمایش‌های انجام گرفته، هنگامی که تنش‌های افقی و جانبی یکسان هستند با افزایش تنش قائم مقدار فشار شکست افزایش می‌یابد. به وضوح روند افزایشی فشار شکست با افزایش تنش قائم مشاهده شده است، ولی بعد از مقدار مشخصی از تنش قائم، فشار شکست کاهش می‌یابد. شکستگی در آزمایش شکست هیدرولیکی زمانی آغاز می‌شود که تنش کششی حداکثر القایی در اطراف چال، بیشتر از مقاومت کششی و تنش مماسی شود و شکستگی حاصل بر روی دیواره چال، عمود بر امتداد تنش افقی حداقل خواهد بود.

ابتدا با افزایش تنش قائم از ۱۰ MPa تا ۱۵ MPa فشار شکست افزایش می‌یابد، سپس با افزایش تنش قائم از ۱۵ MPa تا ۲۰ MPa، فشار شکست کاهش می‌یابد.

با افزایش تنش قائم تا یک مرزی، نمونه فشرده شده و خلل و فرج و ریزترک‌های داخل نمونه بسته می‌شود، بنابراین، مقاومت کششی و فشار شکست افزایش می‌یابد. سپس از یک مرز مشخصی به بعد، افزایش تنش قائم به عنوان یک عامل کمکی سبب بازشدگی ریزترک‌ها و کاهش مقاومت کششی می‌شود. در اینجا با ورود عامل خارجی به داخل نمونه که همان سیال شکست است، گسترش سریع‌تر ریزترک‌ها و غلبه بر مقاومت کششی انجام می‌شود. در نتیجه فشار شکستگی که برای شروع شکست در این حالت لازم است، کاهش خواهد یافت، زیرا تنش قائم در این حالت به عنوان عاملی برای کاهش فشار شکست عمل می‌کند. شکل ۵-۱۱ تاثیر تغییرات تنش قائم بر روی فشار شکست نمونه‌های با تنش‌های افقی و جانبی یکسان را نشان می‌دهد.

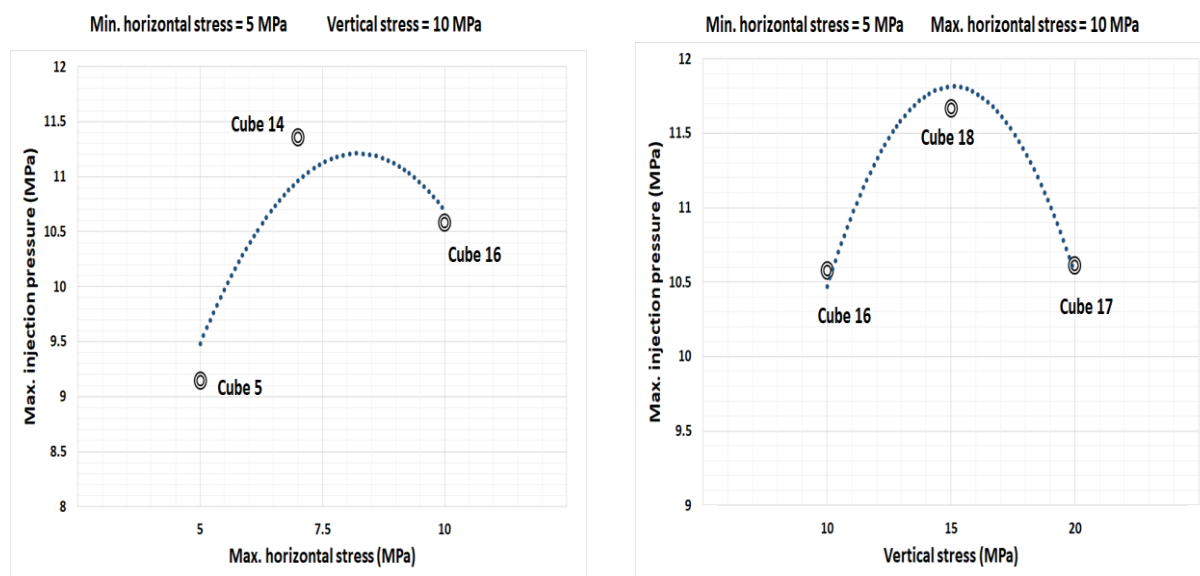
هنگامی که تنش قائم و تنش افقی حداقل یکسان هستند، فشار شکست با افزایش تنش افقی حداکثر، افزایش می‌یابد. با افزایش تنش افقی حداکثر از ۵ MPa تا ۷ MPa فشار شکست افزایش می‌یابد و با افزایش آن از ۷ MPa تا ۱۰ MPa فشار شکست کاهش می‌یابد. طبق روابط زیر:

$$\sigma_{\theta, \max} = 3\sigma_H - \sigma_h - P_W \quad \theta = 90 \quad (5-2)$$

$$\sigma_{\theta, \min} = 3\sigma_h - \sigma_H - P_W \quad \theta = 0 \quad (5-3)$$

که $\sigma_{\theta, \max}$ تنش مماسی حداکثر، $\sigma_{\theta, \min}$ تنش مماسی حداقل و P_W فشار سیال داخل چال است [113]. با افزایش تنش افقی حداکثر، تنش القایی مماسی حداکثر افزایش می‌یابد و چون تنش القایی مماسی حداکثر، عمود بر راستای تنش افقی حداکثر است، برای رشد ترک در این راستا، فشار سیال متناظر با افزایش تنش مماسی حداکثر، افزایش می‌یابد. با افزایش تنش افقی حداکثر از ۷ MPa تا ۱۰ MPa، کاهش فشار شکست می‌تواند به علت تمرکز تنش و کرنش بیشتر در راستای تنش افقی حداقل باشد.

تنش افقی حداکثر، شروع گسترش شکست را به تاخیر می‌اندازد که منجر به افزایش مقاومت نمونه‌ها می‌شود. با این حال، بر اساس نتایج پان^۱ و همکاران (۲۰۱۲) و فنگ^۲ و همکاران (۲۰۱۶) هنگامی که تنش افقی حداکثر به مقدار معینی برسد، در طول فرایند اعمال تنش افقی حداکثر، آسیب‌هایی در نمونه‌ها ایجاد می‌شود. یعنی زمانی که تنش افقی حداکثر به اندازه کافی بالا باشد، پس از اعمال تنش مرزی خارجی، رفتار مکانیکی نمونه‌ها تحت تاثیر قرار گرفته و در واقع مقاومت کششی کاهش یافته است. از آن جایی که قبل از تزریق سیال آسیب در نمونه وجود دارد، در شرایط شکست هیدرولیکی برای شکست نمونه‌ها تحت تنش افقی حداکثر بالاتر، فشار تزریق سیال کمتری لازم است. شکل ۱۱-۵ تاثیر تغییرات تنش افقی حداکثر بر روی فشار شکست نمونه‌های با تنش قائم و تنش افقی حداقل یکسان را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱-۵) تاثیر تغییرات تنش قائم بر روی فشار شکست نمونه‌های با تنش‌های افقی و جانبی یکسان و تاثیر تغییرات تنش افقی حداکثر بر روی فشار شکست نمونه‌های با تنش قائم و تنش افقی حداقل یکسان تحت آزمایش شکست هیدرولیکی

با توجه به تغییرات تنش که در ترکیبات مختلف انجام گرفته است، با افزایش تنش افقی حداقل می‌توان افزایش فشار شکست را مشاهده کرد. این مورد زمانی آشکار می‌شود که با یکسان گرفتن تنش قائم و تنش افقی حداکثر، تنش افقی حداقل افزایش می‌یابد. با توجه به معیارهای شکست هابرت و ویلیس

¹ Pan

² Feng

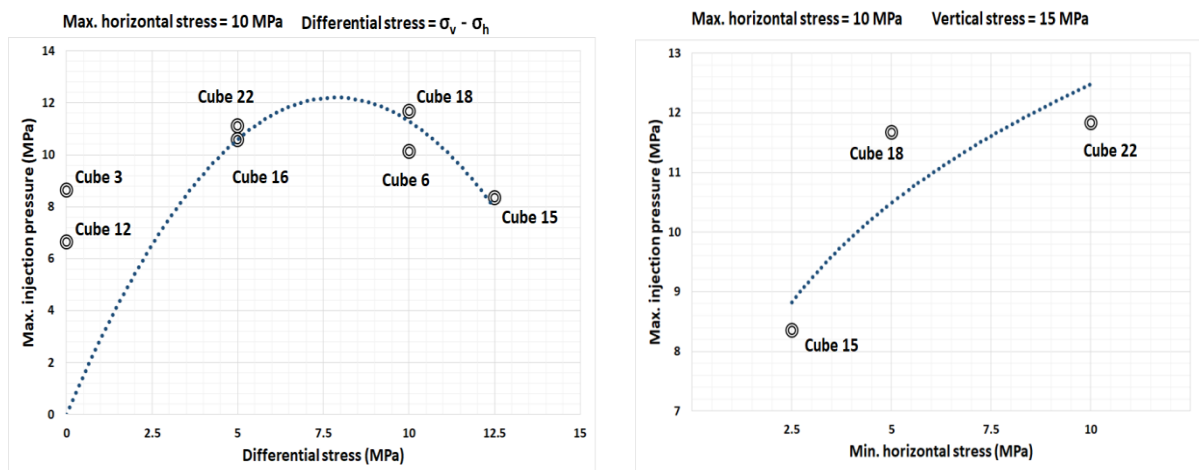
(۱۹۵۷)، هایمن و فیرهورست (۱۹۶۷) و پین و همکاران (۲۰۰۰) که در بخش‌های قبلی شرح داده شد، با افزایش تنش افقی حداقل فشار شکست نمونه‌ها افزایش می‌یابد. شکل ۱۲-۵ تاثیر تغییرات تنش افقی حداقل بر روی فشار شکست نمونه‌ها با تنش قائم و تنش افقی حداکثر یکسان را نشان می‌دهد. در ترکیبات تنش هیدرواستاتیک، یعنی سه تنش یکسان، و ترکیبات تنش همسانگرد یعنی تنش‌های جانبی و افقی یکسان، نسبت به زمانی که تنش‌ها ناهمسانگرد هستند و مقادیر متفاوتی دارند، فشار شکست نمونه‌ها کمتر است. وقتی تنش‌ها ناهمسانگرد هستند فشار سیال تزریقی صرف غلبه بر مقاومت کششی و همچنین تنش افقی حداقل شده است، ولی زمانی که تنش‌ها همسانگرد می‌باشند فشار سیال تزریقی صرف شکست نمونه در اولین نقطه ضعف موجود در نمونه می‌شود و شکست به صورت تصادفی و به هر جهتی می‌تواند رخ بدهد.

تنش تفاضلی، اختلاف بین تنش قائم و تنش افقی حداقل می‌باشد، با افزایش تنش تفاضلی فشار شکست ابتدا افزایش می‌یابد و سپس کاهش می‌یابد، تاثیر تنش تفاضلی بر روی فشار شکست مشابه تاثیر تنش قائم می‌باشد. شکل ۱۲-۵ تاثیر تغییرات تنش تفاضلی بر روی فشار شکست نمونه‌های با تنش افقی حداکثر یکسان را نشان می‌دهد. با افزایش تنش افقی حداقل، فشار شکست افزایش می‌یابد و با افزایش تنش قائم و تنش افقی حداکثر، فشار شکست یک روند افزایش و کاهشی نشان می‌دهد. تاثیر تنش‌های جانبی بر روی فشار شکست به خصوص تنش افقی حداقل، نسبت به تاثیر تنش قائم بر روی فشار شکست بیشتر است. نتایج این بخش با نتایج بدست آمده توسط دوو و بویس^۱ (۱۹۸۹)، بهلولی و پاتر^۲ (۲۰۰۶)، دامنی^۳ و همکاران (۲۰۱۲)، داربر و همکاران (۲۰۱۹) و پان و همکاران (۲۰۲۰) انطباق داشته و همخوانی دارد [113, 81] - 116.

¹ Doe & Boyce

² Bohloli & Pater

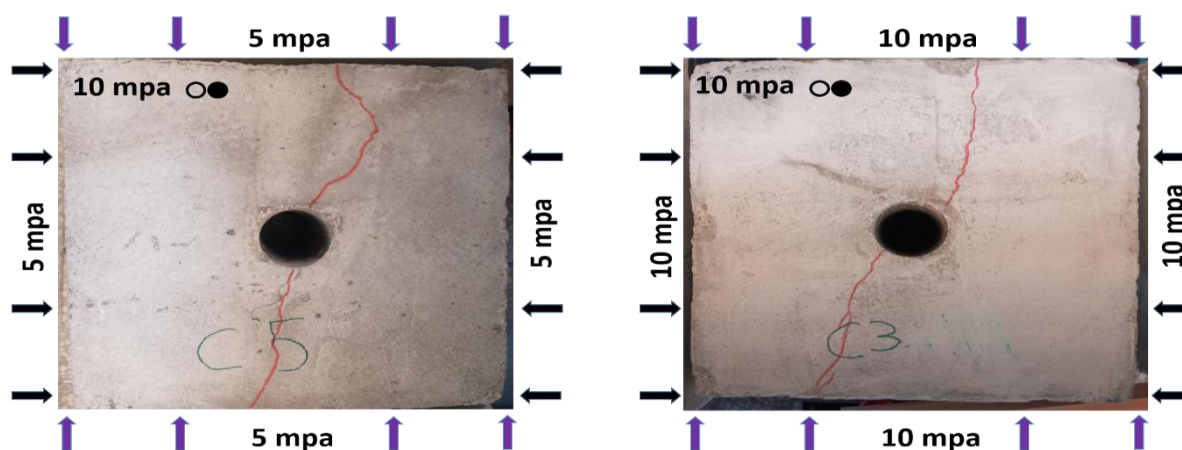
³ Damani

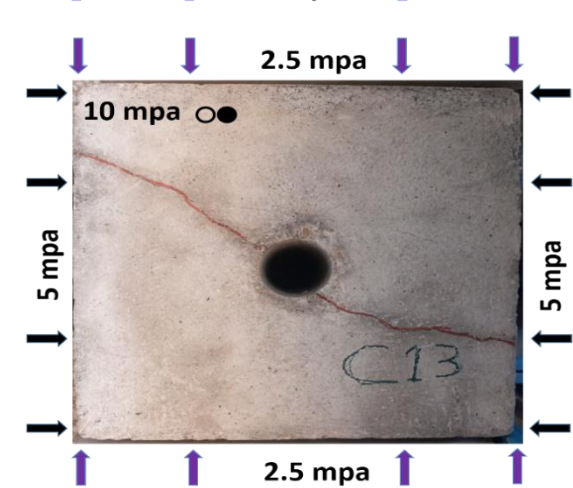
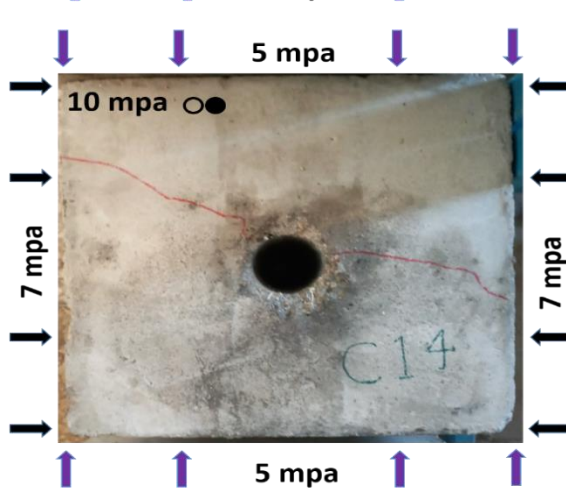
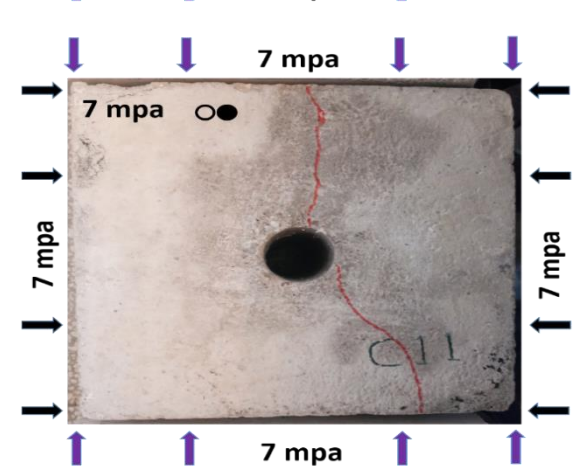
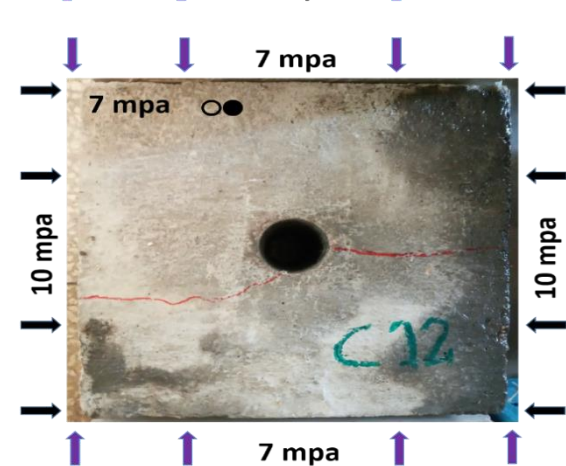
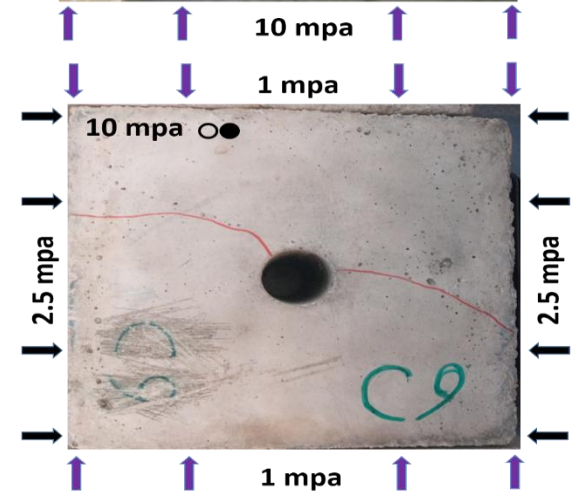
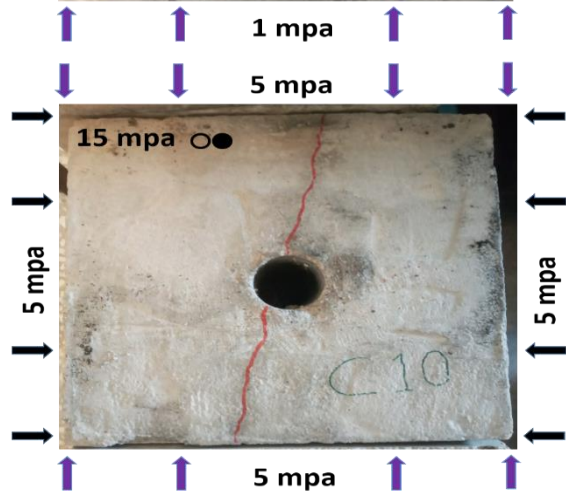
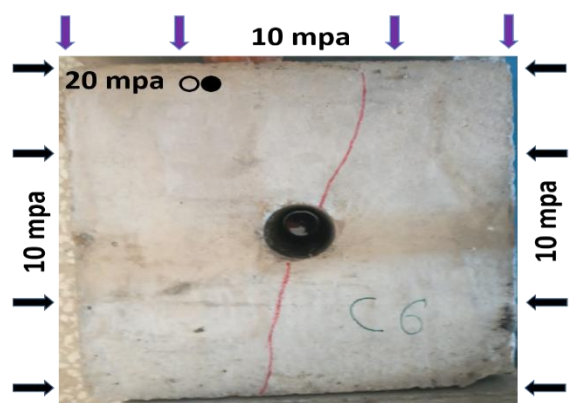
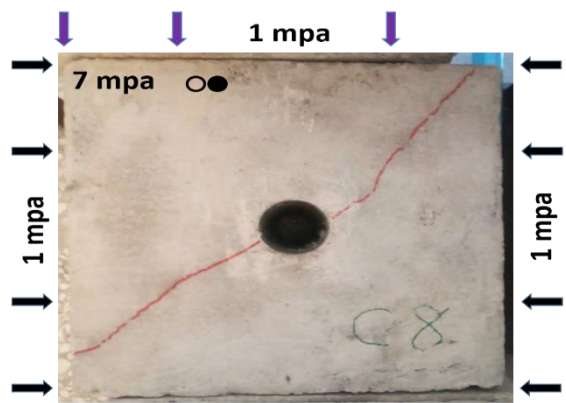


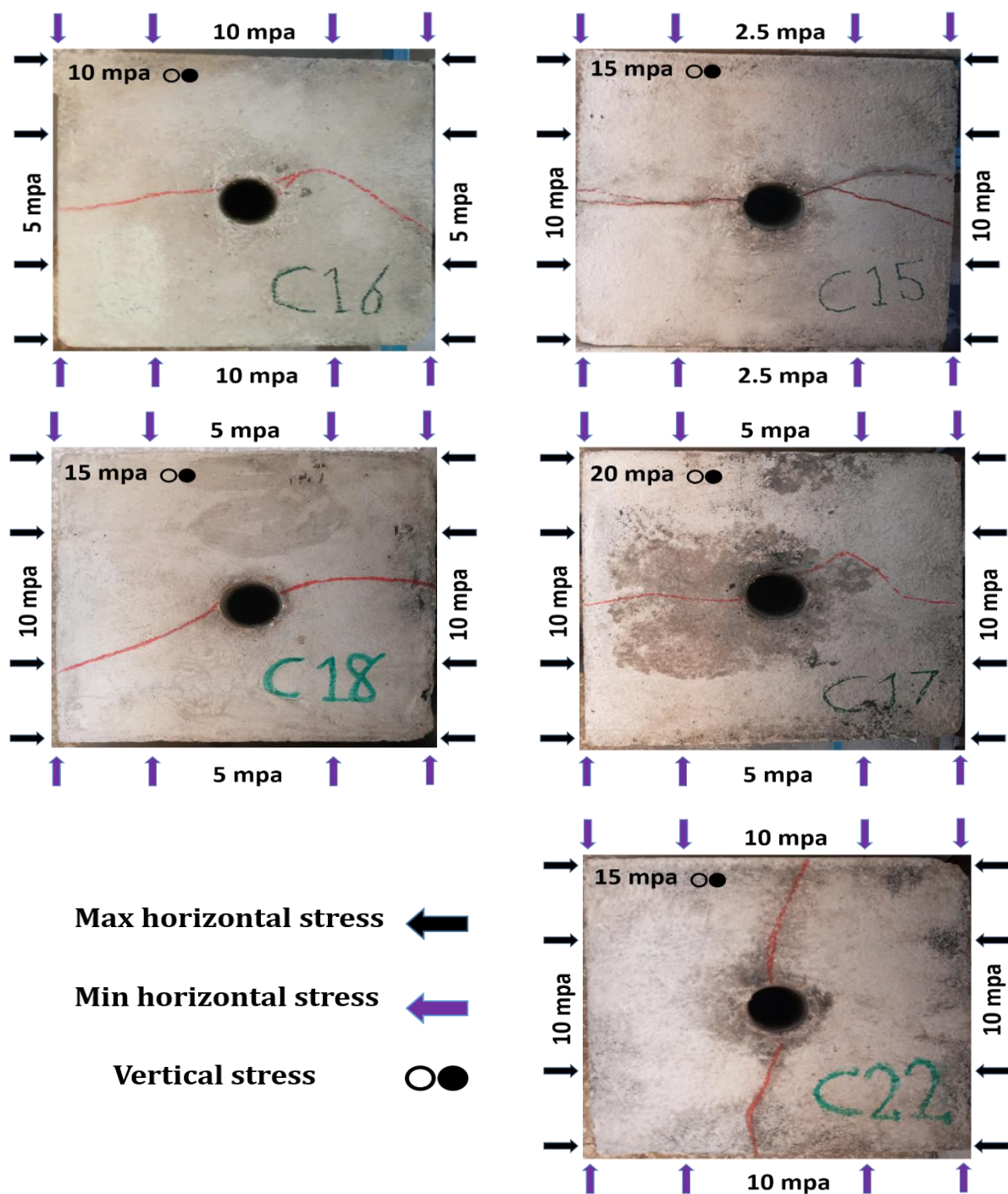
شکل ۱۲-۵) تاثیر تغییرات تنش افقی حداقل بر روی فشار شکست نمونه‌های با تنش قائم و تنش افقی حداکثر یکسان و تاثیر تغییرات تنش تفاضلی بر روی فشار شکست نمونه‌های با تنش افقی حداکثر یکسان تحت آزمایش شکست هیدرولیکی

۵-۳-۵) تحلیل هندسه شکست هیدرولیکی

شکستگی‌های هیدرولیکی در جهت عمود بر تنش افقی حداقل ایجاد می‌شوند. معمولاً شکستگی‌های هیدرولیکی در یک مسیر پر پیچ و خم که به طور قابل توجهی از یک صفحه منحرف می‌شوند، توسعه می‌یابند. در حالت شکستگی قائم، تنش قائم برابر با وزن طبقات فوقانی در نظر گرفته می‌شود و زمانی رخ می‌دهد که فشار سیال در چال به همراه مقاومت کششی، کمتر از تنش قائم ناشی از وزن روباره شود. این مورد مربوط به شکست دیواره گمانه می‌باشد که در یک صفحه شکست هیدرولیکی قائم، ایجاد می‌شود. هندسه شکست نمونه‌ها در آزمایش شکست هیدرولیکی سه محوره واقعی تحت ترکیبات تنش متفاوت، در شکل ۱۳-۵ آورده شده است.







شکل ۱۳-۵) هندسه شکست نمونه‌ها در آزمایش شکست هیدرولیکی سه محوره واقعی تحت ترکیبات تنش متفاوت

در آزمایش‌های شکست هیدرولیکی در شرایط سه محوره واقعی، دو نوع هندسه شکستگی از نوع شکستگی‌های قائم ایجاد شده است. اولین حالت، یک شکستگی قائم است که با وجود تفاوت زیاد در تنش‌های افقی ایجاد شده است. همان طور که تنش تفاضلی اعمال شده افزایش می‌یابد، روند شکست هیدرولیکی تقریباً عمود بر تنش افقی حداقل می‌شود و در راستای تنش افقی حداکثر، نفوذ سیال تحت

فشار زیاد می‌شود. این مورد نشان می‌دهد که اختلاف تنش‌های افقی یک نقش قطعی در کنترل انتشار شکست هیدرولیکی در نمونه‌ها دارد. در ترکیبات تنش که مقادیر تنش‌های جانبی و قائم متفاوت (ناهمسانگرد) است، شکستگی در راستای تنش افقی حداکثر ایجاد شده است. دومین حالت، شکستگی‌های تصادفی شعاعی در اطراف حفره مرکزی است که با وجود تفاوت کم در تنش‌های افقی، ایجاد می‌شود. هنگامی که تنش‌های افقی برابر هستند (همسانگرد) شکست هیدرولیکی در امتداد شعاعی به صورت تصادفی گسترش یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت هنگامی که تنش‌های افقی متفاوت باشند و حالت ناهمسانگرد در تنش‌ها موجود باشد، شکستگی‌های هیدرولیکی در راستای تنش افقی حداکثر گسترش می‌یابند و هنگامی که تنش‌های افقی برابر باشند و حالت همسانگرد در تنش‌ها موجود باشد، شکستگی‌های هیدرولیکی به صورت تصادفی شعاعی گسترش می‌یابند.

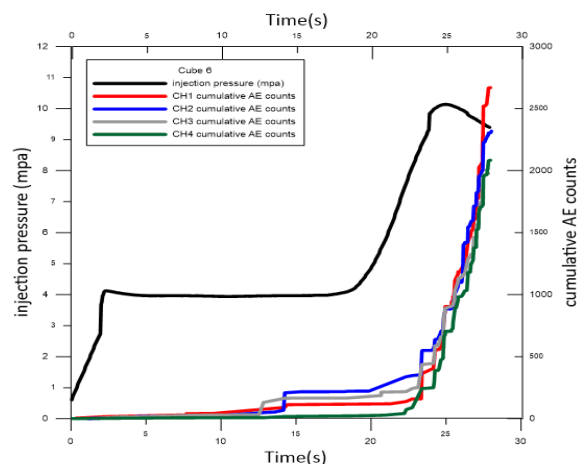
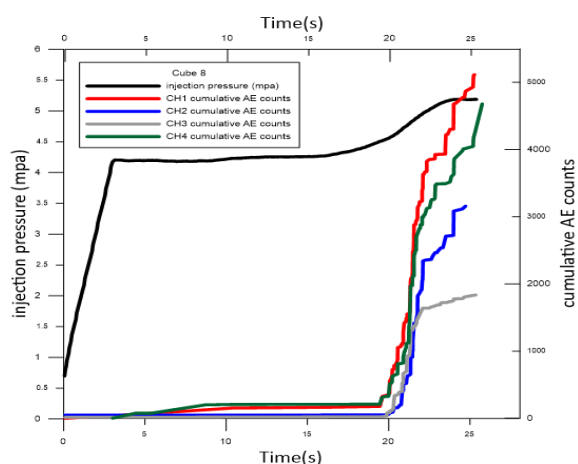
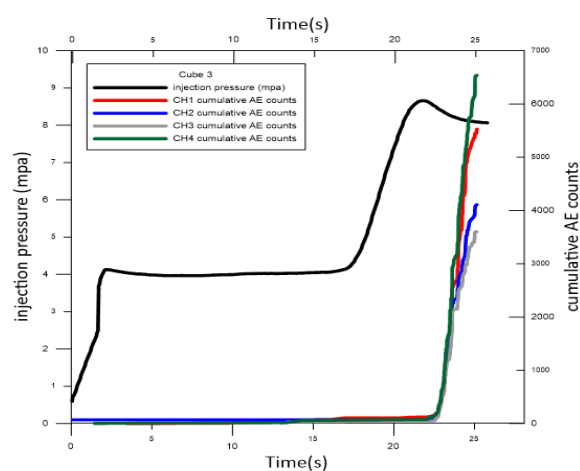
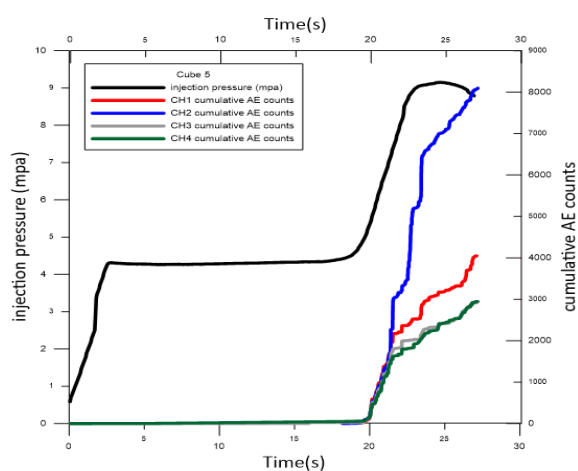
با افزایش تنش قائم، ترک‌های شاخه‌ای در نمونه‌ها ایجاد می‌شود و هندسه شکست هیدرولیکی را پیچیده می‌کند. همچنین افزایش تنش قائم تقریباً جهت یافتگی شکست را از تنش افقی حداکثر منحرف می‌کند و راستای اولیه گسترش ترک را تغییر می‌دهد، ولی در ادامه گسترش ترک به تدریج در راستای تنش افقی حداکثر قرار می‌گیرد. با افزایش تنش افقی حداکثر، ترک‌های شاخه‌ای با طول کم افزایش می‌یابند و باعث می‌شود شکست در جهت تنش افقی حداکثر رشد و عمود بر تنش افقی حداقل گسترش بیابد. در ترکیبات تنش همسانگرد هندسه شکست تصادفی شعاعی است و در راستای تنش افقی حداقل گسترش پیدا می‌کند. با کاهش اختلاف میان تنش‌های افقی، هندسه شکست به شدت پیچیده می‌شود و ریزترک‌ها و ترک‌های شاخه‌ای با طول کم در نمونه‌ها به وجود آمده است.

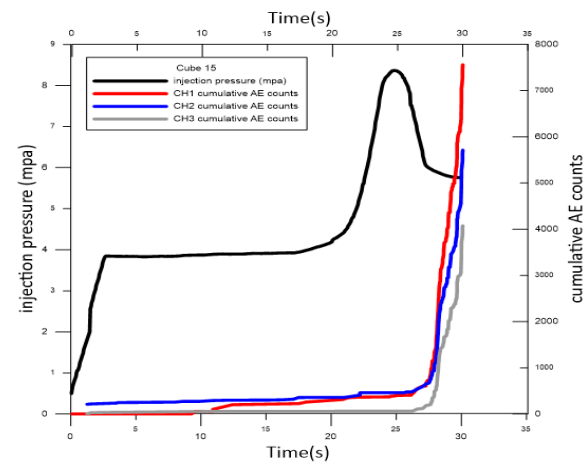
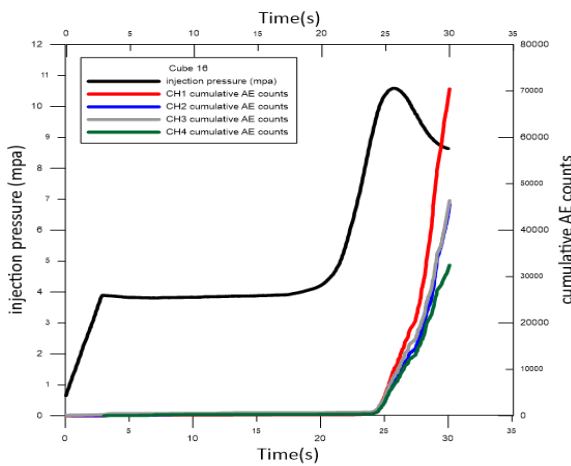
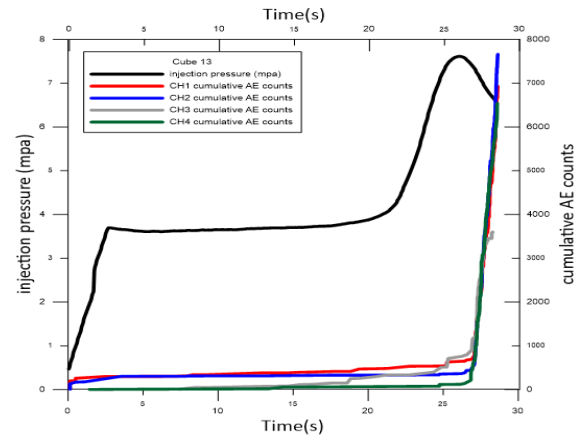
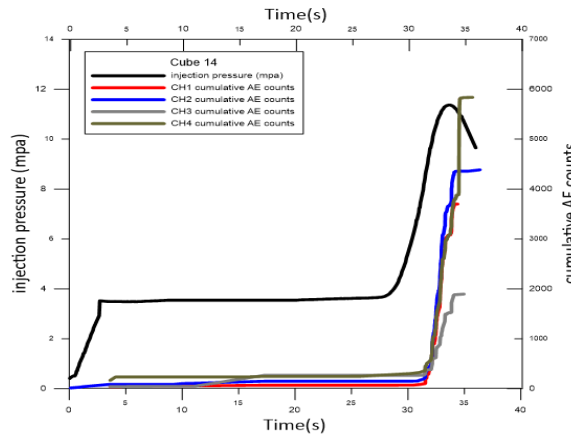
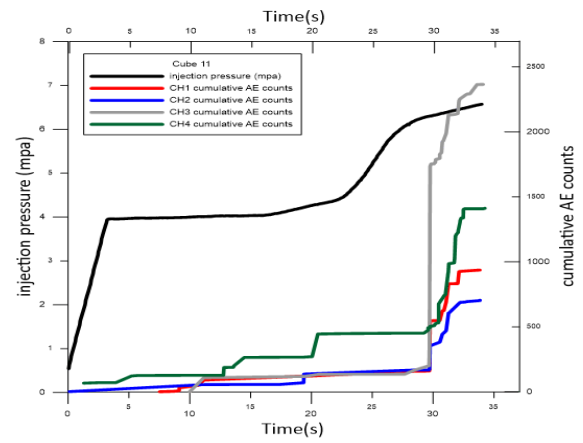
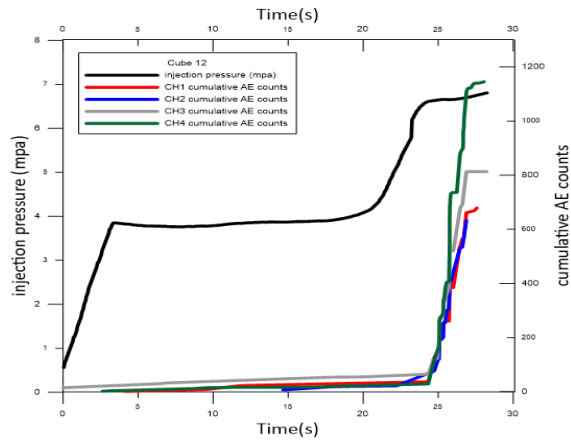
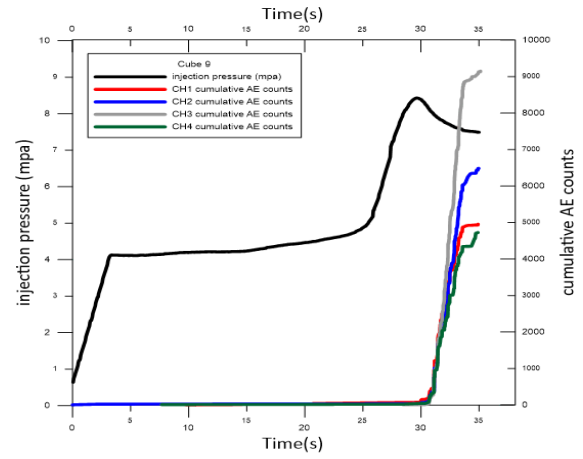
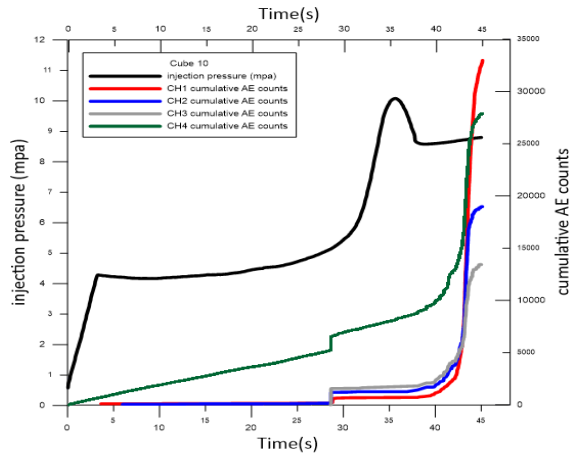
۵-۳-۶) پارامتر شمارش AE (کانت)

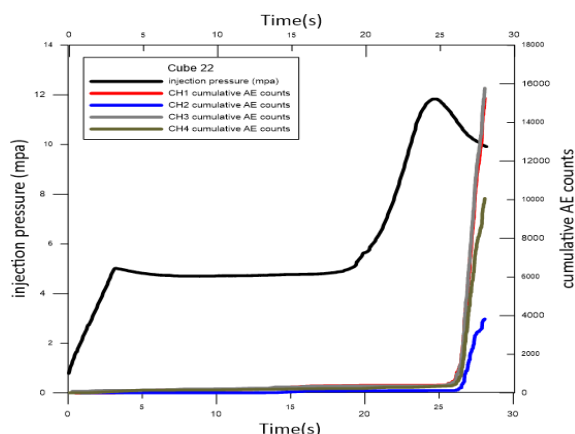
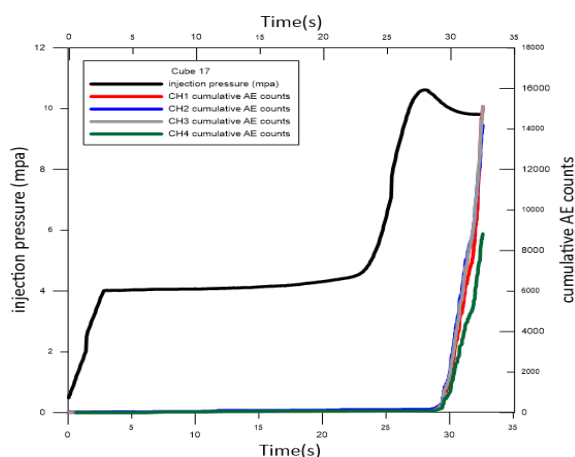
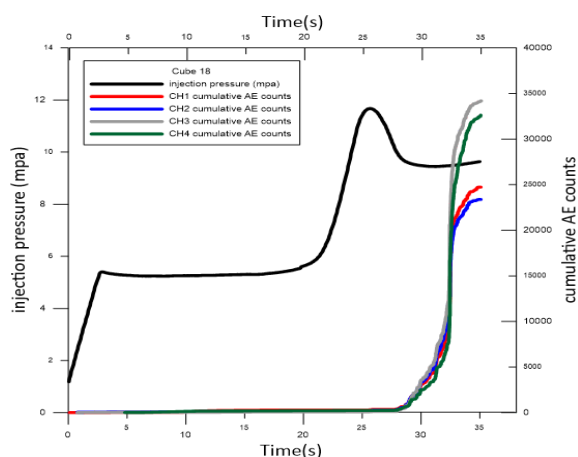
تعیین حد آستانه دقیق و مناسب برای آزمایش‌ها بسیار مهم است و به وسیله انجام تعدادی آزمایش نويز مناسب‌ترین مقدار برای حد آستانه یعنی ۴۲ دسی‌بل بدست آمده است. برای همه آزمایش‌های شکست هیدرولیکی، حد آستانه در این مقدار قرار دارد. برای رفتارنگاری مناسب انتشار آکوستیک و به منظور ارائه

اطلاعات کافی، از ۴ سنسور پیزوالکتریک AE در همه آزمایش‌ها استفاده شده است. نحوه نصب سنسورها و مکان قرارگیری آن‌ها قبلاً شرح داده شده است.

روند تغییرات فشار تزریق سیال و تغییرات انتشار آکوستیک با یکدیگر همخوانی دارند، به گونه‌ای که بوسیله تغییرات انتشار آکوستیک به راحتی می‌توان نقطه حداکثر فشار تزریق سیال را بدست آورد. بوسیله AE می‌توان فشار شکست نمونه‌ها را مشخص و اندازه‌گیری کرد، در لحظه‌ای که رخداد های AE افزایش یافته‌اند، فشار تزریق سیال اوج گرفته و به حداکثر مقدار خود رسیده است. نقطه شروع و پایان رفتارنگاری انتشار آکوستیک همزمان با شروع تزریق سیال تا لحظه شکست نمونه و افت فشار همراه است. در شکل ۱۴-۵ مقدار شمارش تجمعی هر سنسور به صورت جداگانه به همراه نمودار فشار-زمان هر نمونه تا لحظه شکست رسم شده است.





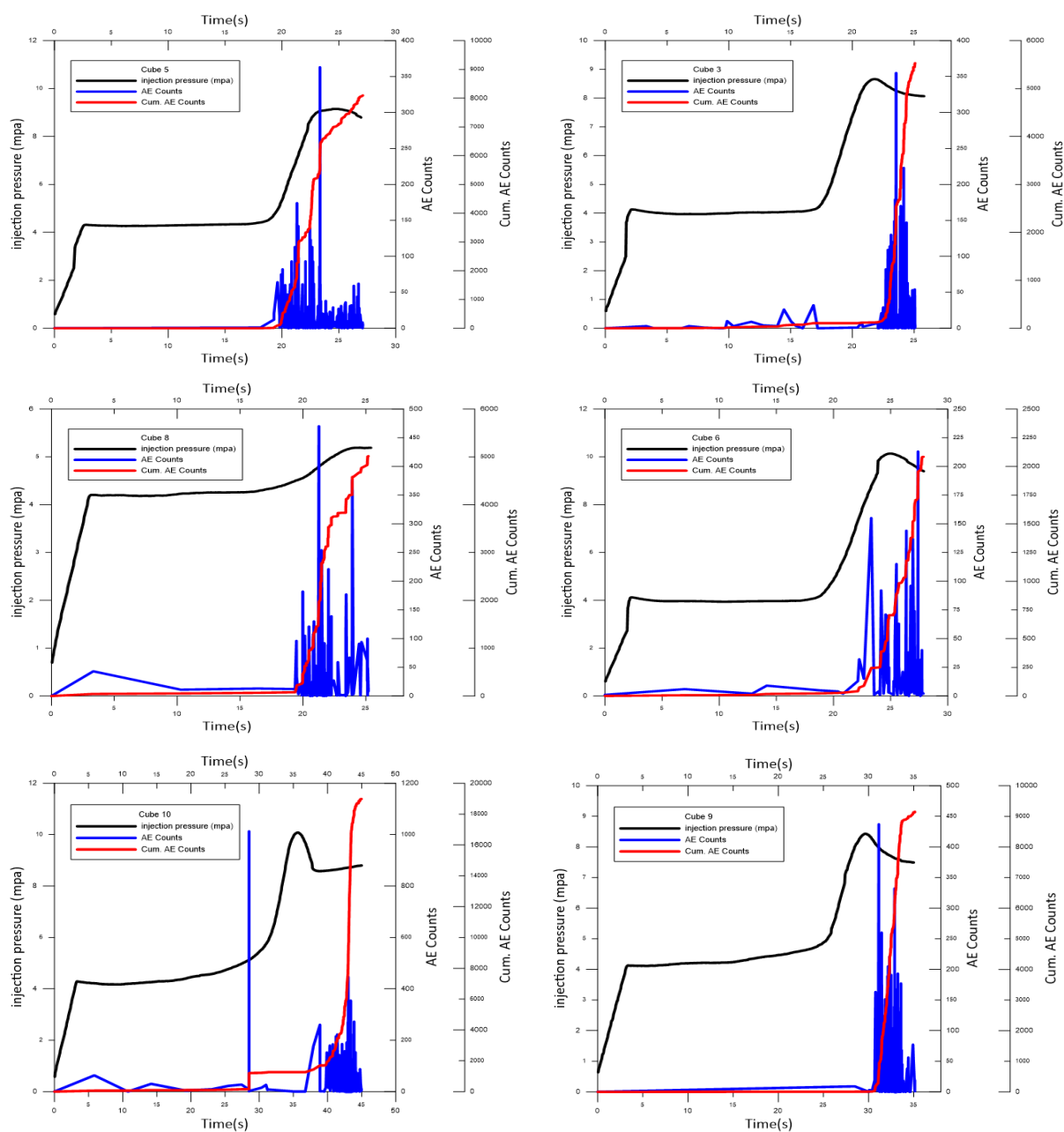


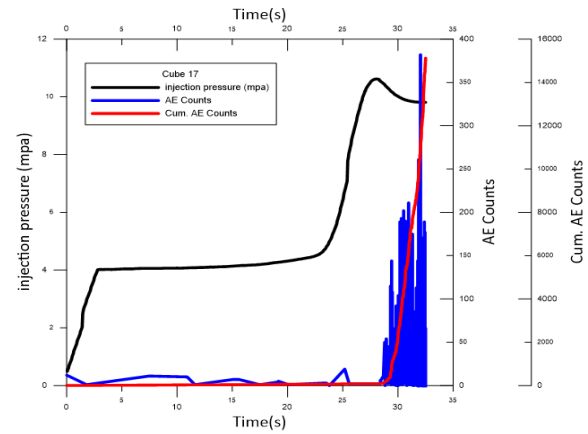
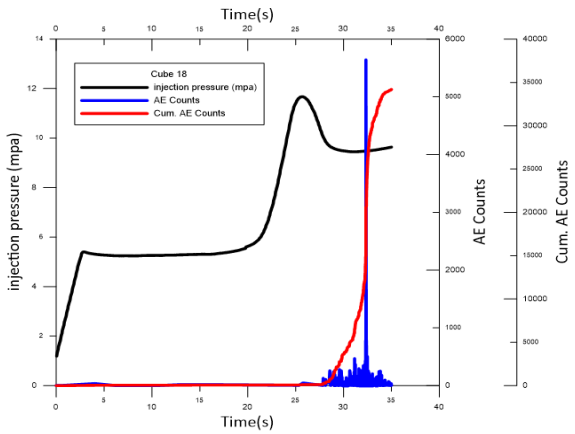
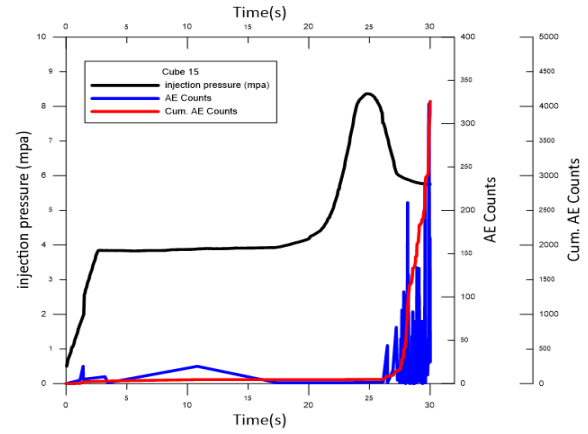
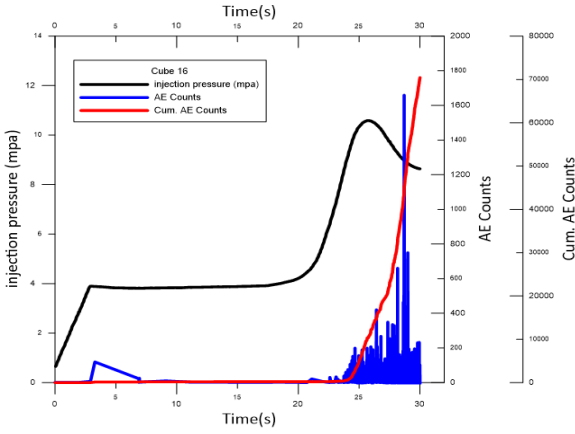
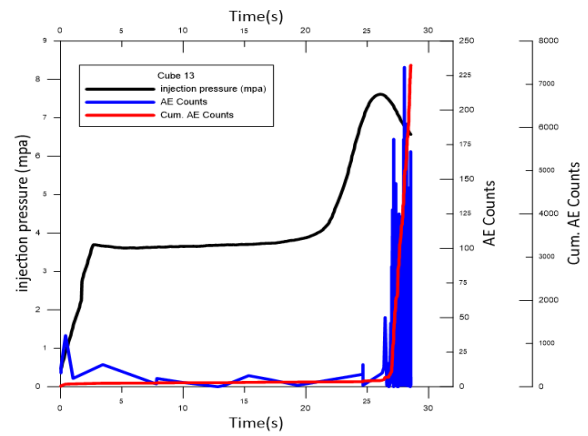
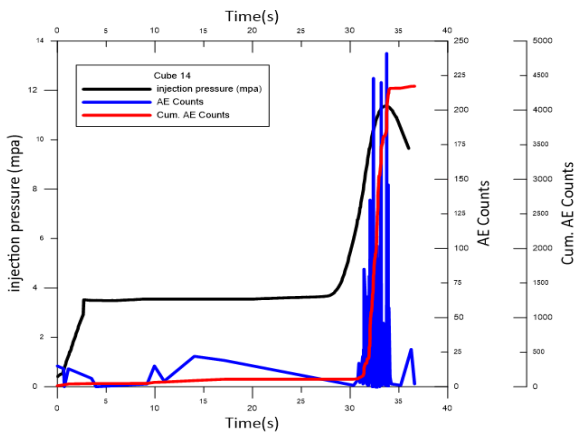
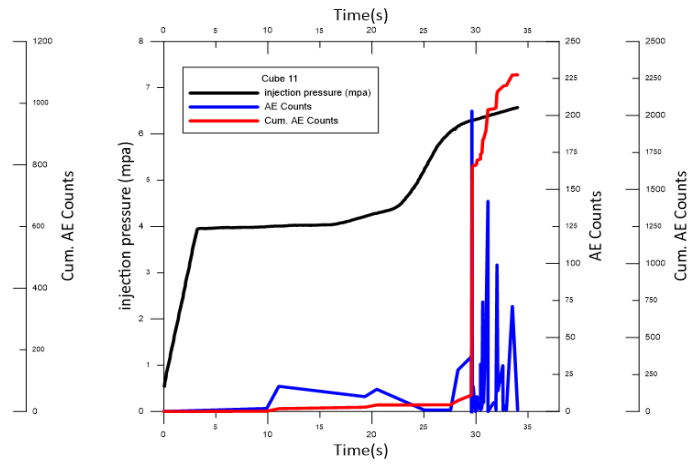
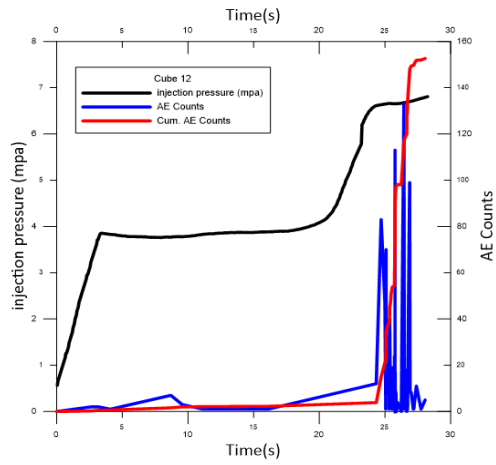
شکل ۱۴-۵) نمودار تغییرات مقدار شمارش تجمعی برای چهار سنسور و فشار تزریق سیال در آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت ترکیبات تنش متفاوت

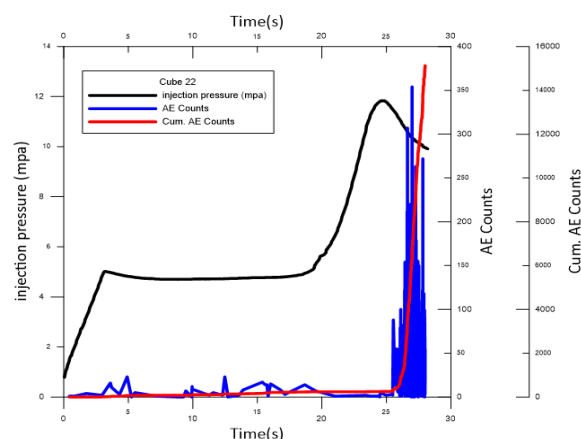
مقدار تجمعی شمارش برای کانال‌های AE معمولاً در مراحل اولیه که فشار تزریق سیال روند ثابتی دارد و در پایین‌ترین مقدار قرار دارد، ولی به محض شروع شکستگی تحرکات AE بالا رفته و مقادیر تجمعی شمارش نیز افزایش می‌یابند. با توجه به تغییرات نمودار فشار-زمان با شروع شکستگی، فشار تزریق سیال ناگهانی بالا می‌رود و سپس با ادامه تزریق سیال ریزترک‌ها و شکاف‌های شاخه‌ای ایجاد شده است و با گسترش ترک‌ها در نمونه و باز شدن ناپیوستگی‌های ایجاد شده نمونه می‌شکند و فشار تزریق سیال کاهش می‌یابد.

تغییرات شمارش تجمعی AE مشابه تغییرات فشار تزریق سیال است و با شروع شکستگی، مقدار شمارش تجمعی ناگهان افزایش می‌یابد و این روند افزایشی تا لحظه شکست نمونه و افت فشار ادامه دارد. پاسخ سنسورها در آزمایش‌ها متفاوت است و مقدار شمارش تجمعی AE در هر نقطه زمانی برابر نیست، ولی

کانال‌های AE همچنان با تغییرات فشار تزریق سیال موافق هستند. برای هر کانال AE و تعداد سنسورها، داده اندازه‌گیری موجود است که در ادامه برای رسم نمودار پارامترهای انتشار آکوستیک از یک کانال AE که بهترین نتیجه را داده، استفاده شده است. آسیب و شکست در نمونه‌ها باعث فعالیت AE می‌شود. مقدار شمارش هر چقدر بیشتر باشد، آسیب‌های وارده بر نمونه شدیدتر است. شکل ۱۵-۵ نمودار شمارش مقدار AE و تجمعی شمارش AE به همراه نمودار فشار-زمان را برای آزمایش‌های شکست هیدرولیکی نشان می‌دهد.







شکل ۱۵-۵) نمودار تغییرات مقدار شمارش، شمارش تجمعی و فشار تزریق سیال در آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت ترکیبات تنش متفاوت

با توجه به نمودارهای رسم شده در مراحل اولیه تزریق سیال که فشار تزریق پایین است، مقادیر شمارش و تجمعی شمارش AE نیز کمتر هستند، ولی بلافاصله با اوج گرفتن فشار تزریق، فعالیت‌های شمارش و تجمعی شمارش شروع می‌شوند تا زمانی که فشار تزریق به حداکثر مقدار خود می‌رسد و در آن نقطه نمونه می‌شکند و فشار افت می‌کند. در نقطه حداکثر فشار تزریق مقدار شمارش AE بالاترین مقدار خود را تجربه می‌کند و به دنبال آن مقدار تجمعی شمارش نیز روند صعودی‌تری به خود می‌گیرد. بعد از نقطه حداکثر فشار تزریق، مقادیر شمارش در سطح کمتری وجود دارند و شمارش تجمعی نیز با سرعت خیلی کمتری افزایش می‌یابد که نشان دهنده شکست در نمونه و نشت سیال از سطح خارجی نمونه است.

در نمونه Cube 3 فشار تزریق در ثانیه ۲۲ از آزمایش به حداکثر مقدار خود یعنی ۸/۶۵ مگاپاسکال رسیده است. سپس بلافاصله کاهش می‌یابد، که نشان دهنده شکست نمونه است. در لحظه شکست نمونه، مقدار شمارش و شمارش تجمعی به شدت افزایش می‌یابند. در نمونه Cube 5 مشاهده می‌شود که شکست در ثانیه ۲۱ رخ داده است، ولی بعد از آن همچنان مقدار شمارش تجمعی روند افزایشی خود را ادامه می‌دهد تا در ثانیه ۲۳ به بالاترین حد ممکن می‌رسد که در آن نقطه فشار تزریق به مقدار ۹/۱۵ مگاپاسکال رسیده است. این مورد نشان می‌دهد که بر اساس AE ترک در اطراف حفره مرکزی نمونه شکل گرفته است ولی هنوز به داخل نمونه نفوذ نکرده است. نمونه در ثانیه ۲۳ شکست می‌خورد و بعد از آن نقطه فشار تزریق

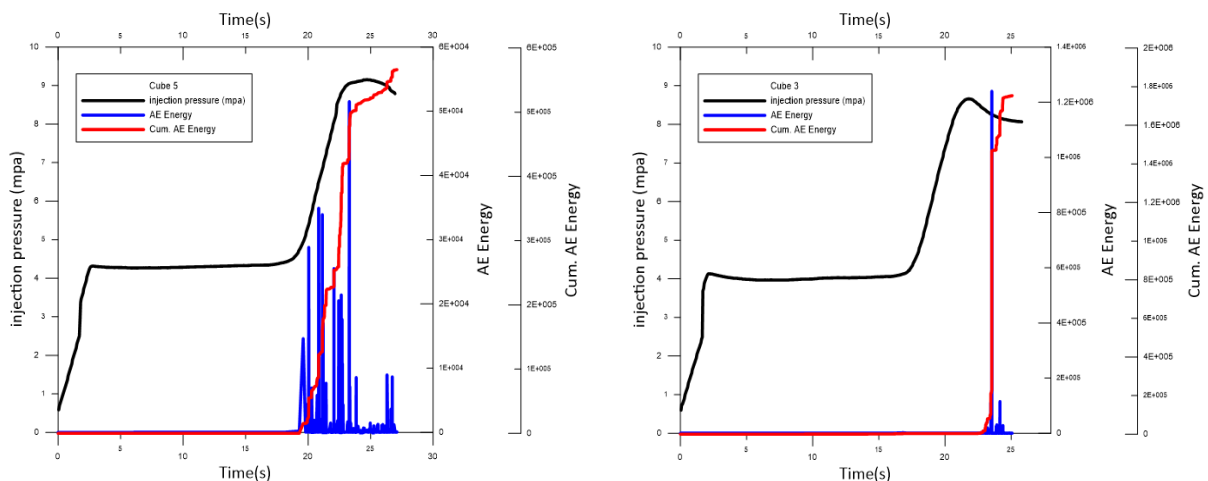
کاهش می‌یابد، فشار تزریق سیال در لحظه شکست نمونه ۹/۱۵ مگاپاسکال بوده است و حداکثر مقدار تجمعی شمارش نیز ۸۰۹۷ بوده است. قبل از ثانیه ۲۰، مقدار قابل توجهی از فعالیت انتشار آکوستیک مشاهده نمی‌شود که مشابه تغییرات فشار تزریق است و بلافاصله با افزایش فشار تزریق در ثانیه ۲۰ مقدار شمارش نیز افزایش می‌یابد و پس از کاهش فشار تزریق، مقادیر شمارش نیز کاهش می‌یابد. برای مابقی آزمایش‌ها نیز همین روند را می‌توان متصور شد ولی فشار تزریق، مقدار تجمعی شمارش و زمان شکست نمونه در هر آزمایش بر اساس تنش‌هایی که به نمونه اعمال شده و شکستگی ایجاد شده، متغیر هستند.

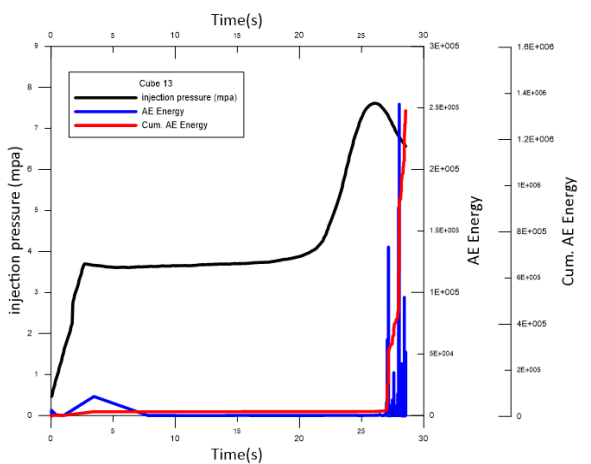
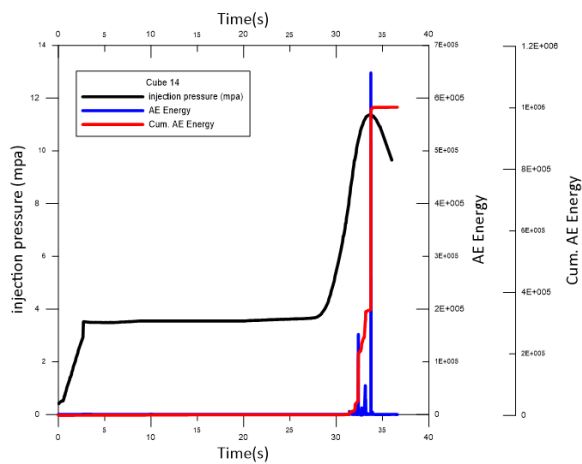
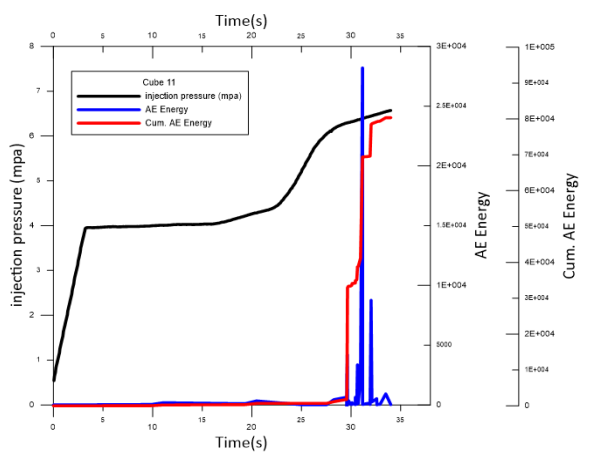
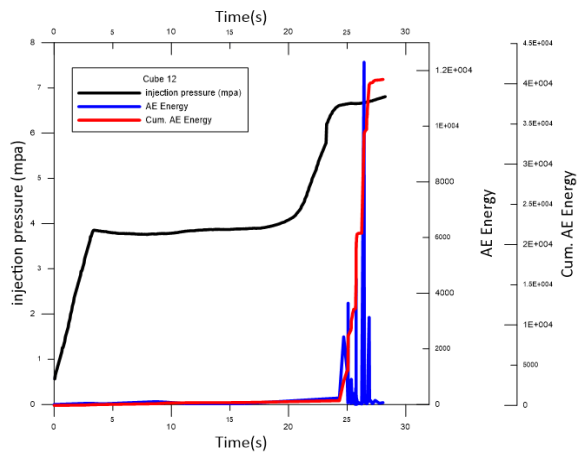
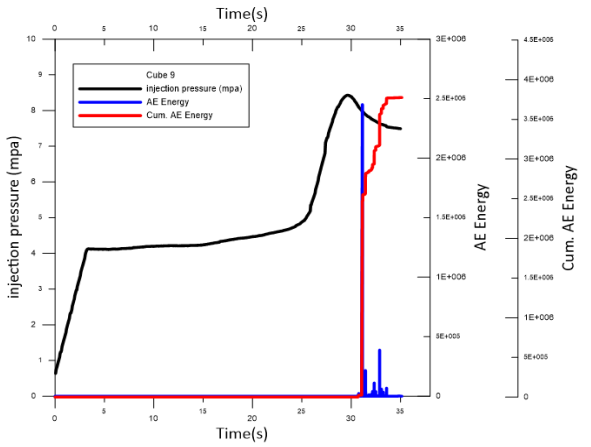
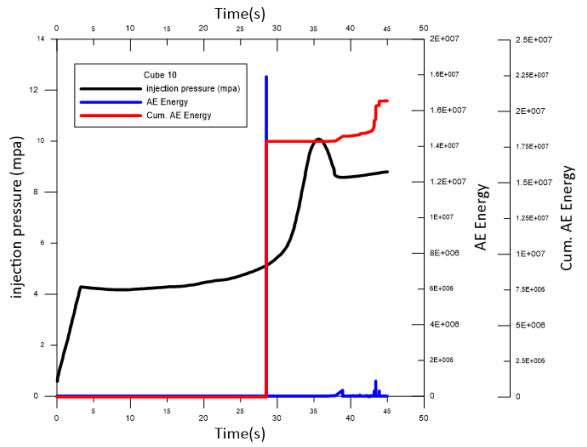
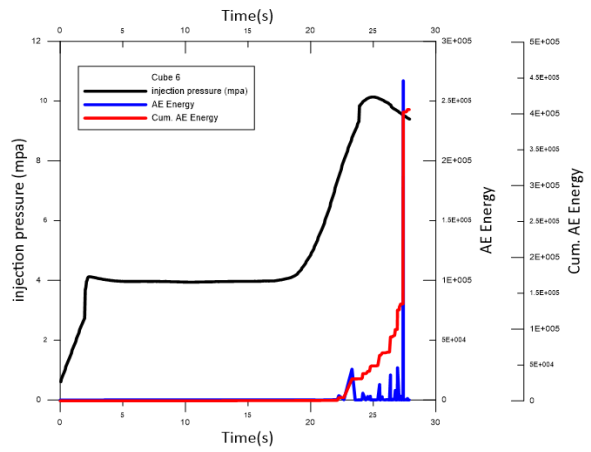
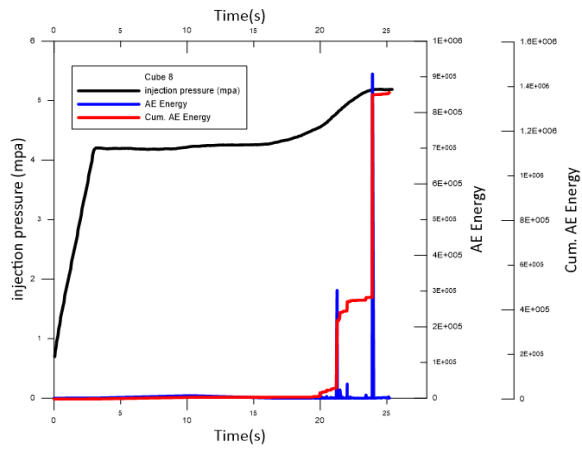
در اکثر آزمایش‌ها تا قبل از شروع ناگهانی روند افزایش فشار تزریق، فعالیت در AE مشاهده نمی‌شود ولی در بعضی از آزمایش‌ها مانند Cube 10، Cube 14 و Cube 22 قبل از آن نیز فعالیت‌های کوچک AE مشاهده شده است، این نتایج نشان می‌دهد اگر چه ممکن است ترک‌هایی ایجاد شده و باعث نشت سیال شود، اما هنوز بسیار کوچک هستند که اجازه جریان سیال را نمی‌دهند. در مراحل اولیه آزمایش‌ها سیال تزریق شده است تا حجم حفره مرکزی نمونه پر شود که باعث می‌شود فشار به آرامی افزایش یابد. هنگامی که حفره مرکزی نمونه از سیال پر شد، فشار تقریباً خطی می‌شود. هنگامی که روند رشد فشار به غیر خطی تغییر کرد، نشت سیال آغاز شد و شیب منحنی فشار کاهش یافت، ترک‌های کوچک قبل از شکست ایجاد شده‌اند و این ریزترک‌ها می‌توانند به طور مداوم به انتشار سیال در نمونه اجازه بدهند.

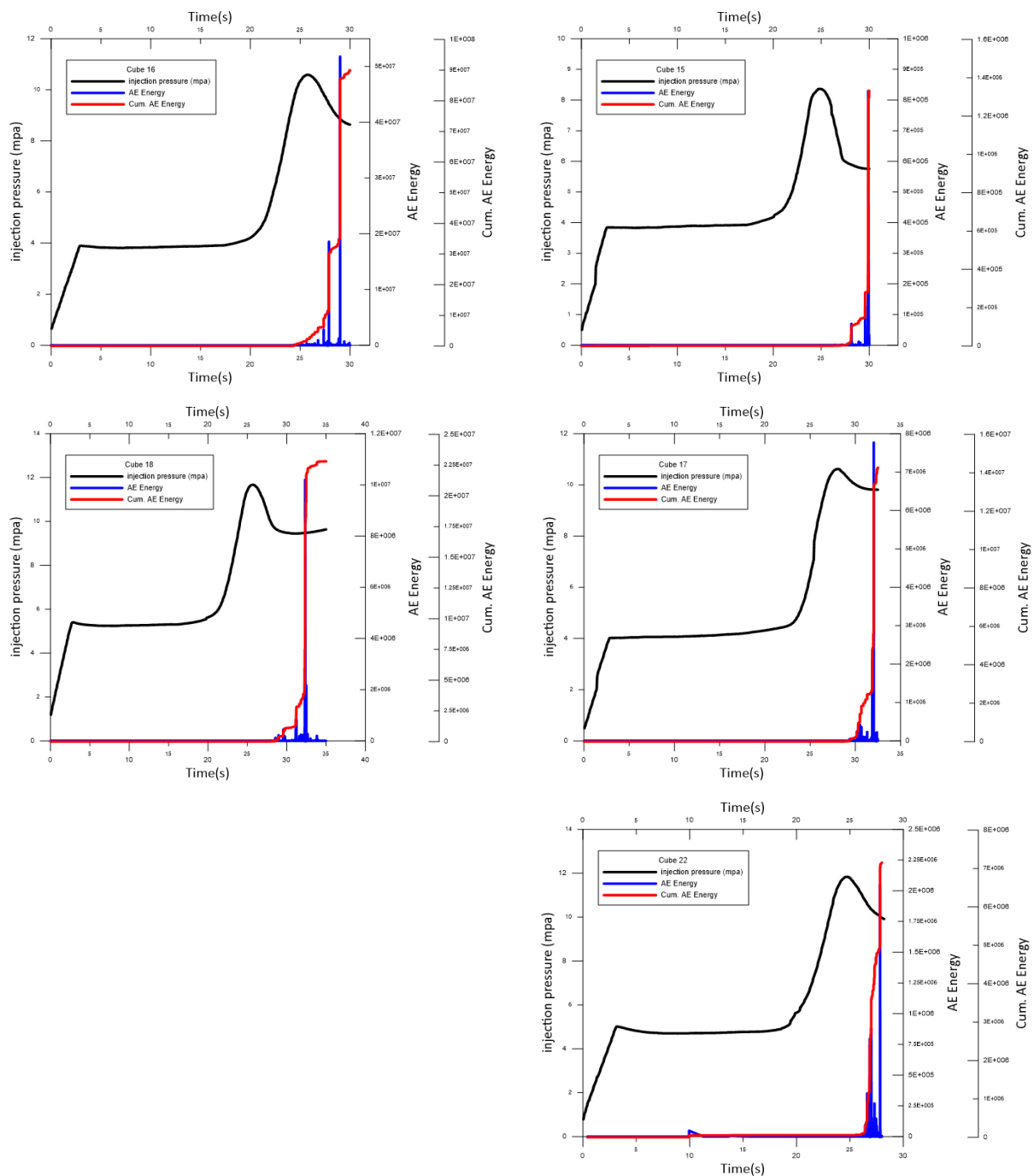
تغییرات انتشار آکوستیک قبل و بعد از افت فشار در حین آزمایش شکست هیدرولیکی بسیار بیشتر از زمان‌های دیگر در آزمایش است. فشار تزریق گاهی اوقات یک روند طولانی و نوسان آرامی را تجربه می‌کند و تعداد AE به سرعت افزایش می‌یابد، این مورد به دلیل ایجاد ریزترک‌ها در نمونه‌ها است. با این حال، این ریزترک‌ها به قسمت بیرونی نمونه نفوذ نمی‌کنند ولی هنگامی که انتشار ترک از سطح خارجی نمونه عبور کند، فشار تزریق به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و هرچه نوسان فشار شدیدتر باشد، مقیاس و طول ترک ایجاد شده نیز بیشتر است. بنابراین هر چه افزایش شمارش AE سریع‌تر باشد، اندازه ترک بزرگ‌تر است و رشد ناگهانی آن نشان دهنده ترک‌هایی در مقیاس بزرگ (ماکروترک) است.

۵-۳-۷) پارامتر انرژی AE

انرژی رویدادهای AE شاخص موثری برای توصیف کمی رفتارهای شکستگی است. روند تغییرات انرژی AE نمونه‌های آزمایش شده در ترکیبات مختلف تنش مشابه است. در ابتدا انرژی AE بسیار کم است، سپس به تدریج افزایش می‌یابد تا به حداکثر مقدار خود می‌رسد و بعد از سطح حداکثر، کاهش شدیدی وجود دارد و هیچ پاسخی برای انرژی AE دریافت نمی‌شود. هر چه تنش‌های قائم و جانبی افزایش می‌یابند، نمونه‌ها در فشار شکست بالاتری می‌شکنند و تنش‌های بالا، فشار شکست را افزایش می‌دهند و همان‌گونه انرژی AE و مقدار انرژی تجمعی AE نیز افزایش می‌یابد و نوسانات بالاتری در طی گذشت زمان دارند. نتایج آزمایش میزان انرژی AE، انرژی تجمعی AE در شکل ۱۶-۵ همراه با فشار تزریق سیال در طول فرایند بارگذاری ذکر شده است. تراکم سیگنال‌های AE سطح شدت فعالیت‌های انتشار ترک در داخل نمونه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان حداکثر مقادیر انرژی AE در لحظه حداکثر فشار تزریق سیال در نمونه‌ها را مشاهده کرد و انرژی تجمعی AE در این زمان به سرعت افزایش می‌یابد و در دوره پس از حداکثر فشار تزریق، میزان انرژی AE در حال کاهش است و سطح فعالیت رویدادهای AE کم می‌شود. مقدار تجمعی انرژی AE با روند تغییر فشار تزریق مشابه است و با افزایش فشار تزریق، مقدار تجمعی انرژی AE نیز افزایش می‌یابد. انتشار آکوستیک همه آزمایش‌ها در طول دوره اولیه تزریق سیال بدون فعالیت بوده است و فعالیت انتشار آکوستیک به سرعت در طول دوره میانی تزریق سیال و اواخر آن افزایش یافته است.







شکل ۱۶-۵) نمودار تغییرات مقدار انرژی، انرژی تجمعی و فشار تزریق سیال در آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت ترکیبات تنش متفاوت

از آن جا که سطح انرژی AE سطح انرژی امواج تنش تولید شده توسط فعالیت‌های انتشار ترک را منعکس می‌کند، سطح انرژی AE سطح فعالیت انتشار ترک در نمونه‌ها را نیز مشخص می‌کند. سطح انرژی امواج تنش تحت اختلاف تنش افقی کم، بیشترین بوده و سطح انرژی هنگامی که اختلاف تنش افقی بیشتر

می‌شود، افت زیادی دارد. هر چه مقدار اختلاف تنش افقی بیشتر باشد، رویدادهای AE تولید شده توسط انتشار ترک کمتر می‌شوند، به این ترتیب کار انجام شده در طول مسیر گسترش شکستگی کاهش یافته و قدرت امواج تنش آزاد شده توسط فرآیند گسترش ترک کاهش می‌یابد. علاوه بر این، قدرت انرژی رویدادهای AE و حداکثر فشار تزریق کاهش می‌یابد. بر اساس مشاهداتی که توضیح داده شد، انرژی تجمعی رویدادهای AE در طول فرایند بارگذاری قبل از حداکثر فشار تزریق، انرژی لازم برای ایجاد شکست را منعکس می‌کند و مقدار انرژی AE قدرت امواج تنش تولید شده توسط شکستگی را منعکس می‌کند.

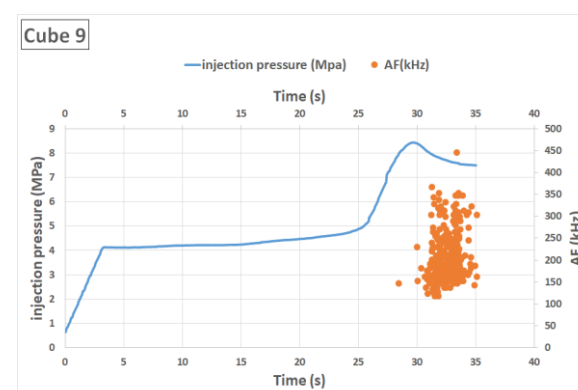
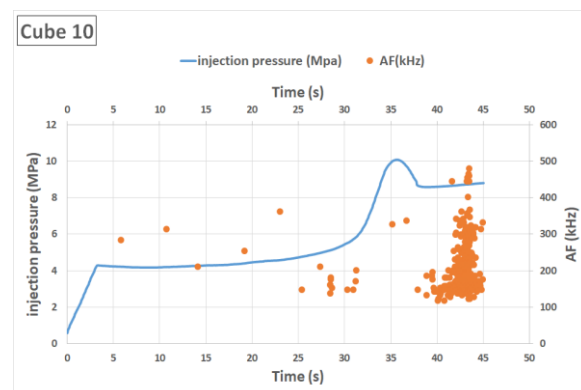
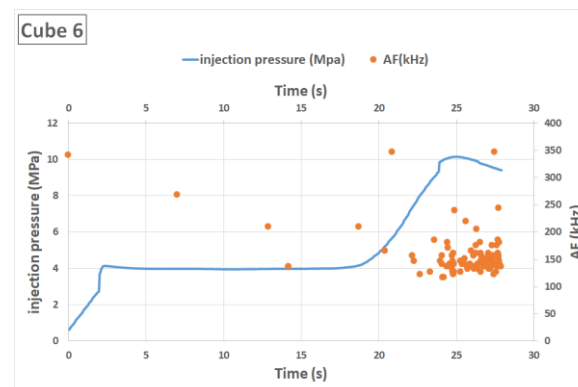
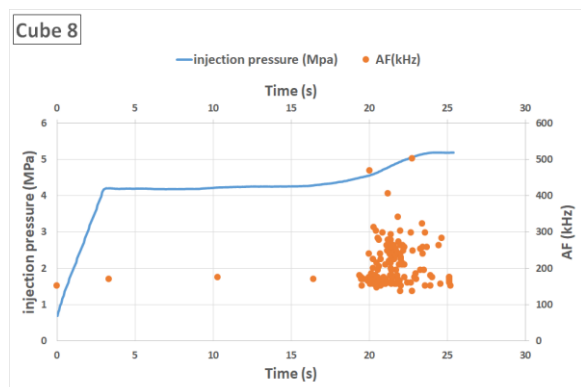
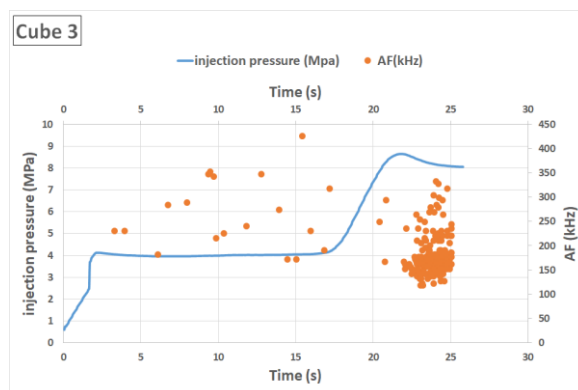
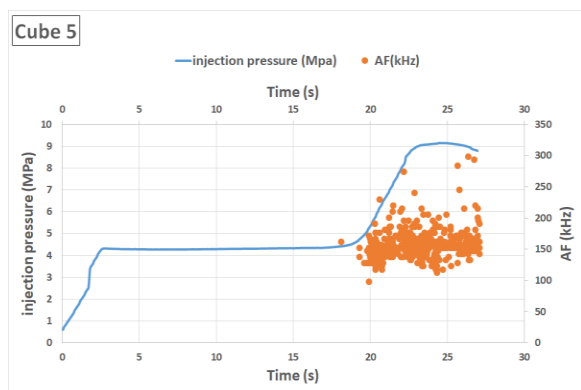
اطراف حفره نمونه‌ها به دلیل نفوذ سیال دچار تغییر شکل دائمی شده است. پس از رسیدن به تغییر شکل نهایی، شکستگی‌ها آغاز می‌شود و نمونه در اثر فشار سیال دچار شکست می‌شود. این فرایند با ذخیره و آزادسازی انرژی همراه است که با وقوع رویدادهای AE مشخص می‌شود. در ابتدای آزمایش شکست هیدرولیکی فشار سیال موجود در حفره بر روی دیواره حفره اثر کرده و در آن نفوذ می‌کند و تغییر شکست جزئی ایجاد می‌کند. در این مرحله انرژی الاستیک در داخل نمونه ذخیره می‌شود. با این حال، هیچ انرژی و رویداد AE در این مرحله وجود ندارد (تشکیل ریزترک). حفره با سیال پر شده است، با افزایش فشار هیدرولیکی، انرژی به سرعت با تغییر شکل بزرگ دیواره حفره ذخیره می‌شود. هنگامی که کرنش کششی به مرز شکست رسید، شکستگی شروع می‌شود. انرژی به سرعت ذخیره و آزاد می‌شود و دیواره حفره در موقعیت‌های مختلف دچار تغییر شکل کششی و فشاری می‌شود (شروع شکستگی).

سیال شکست وارد شکستگی شده است و فشار هیدرولیکی به تدریج کاهش می‌یابد، در حالی که سیال بیشتری به سمت شکستگی توسط دستگاه تزریق می‌شود و انرژی برای شکستگی را فراهم می‌کند. در این مرحله فشار هیدرولیکی عمدتاً بر روی سطح یا نوک شکستگی‌ها تاثیر می‌گذارد. ترک‌های بیشتری ایجاد می‌شود که باعث می‌شود شکستگی‌ها در طول انتشار، جهت خود را تغییر دهند. بر این اساس، کرنش دیواره حفره در نوسان است و شکستگی‌ها به سرعت به سمت سطح گسترش می‌یابند تا زمانی که شکست ایجاد شود. با انتشار شکستگی‌ها انرژی پیوسته ذخیره و آزاد می‌شود که منجر به وقوع تعداد زیادی رویداد AE می‌شود. در این مرحله تغییر شکل فشاری به تدریج ترمیم می‌شود در حالی که تغییر شکل کششی

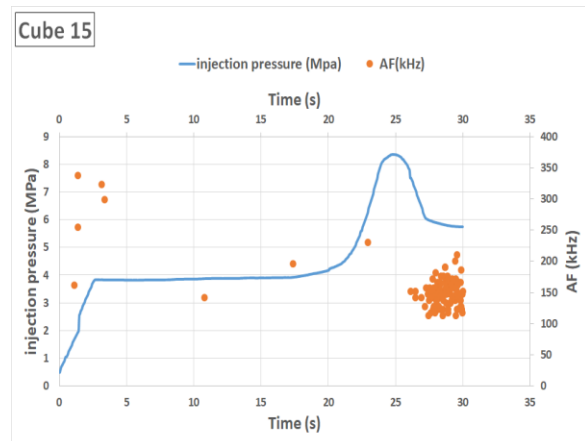
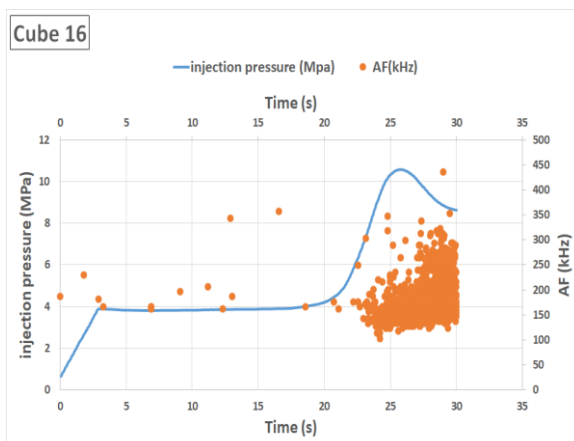
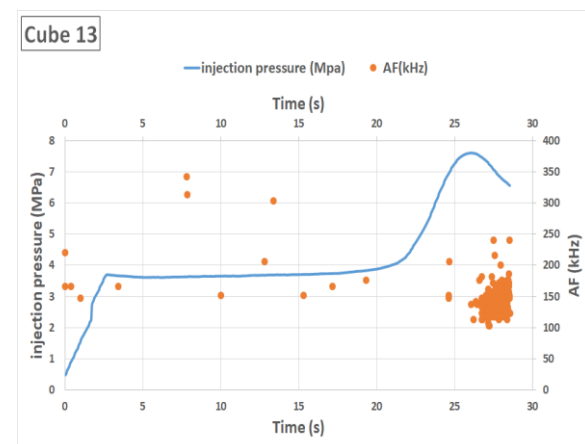
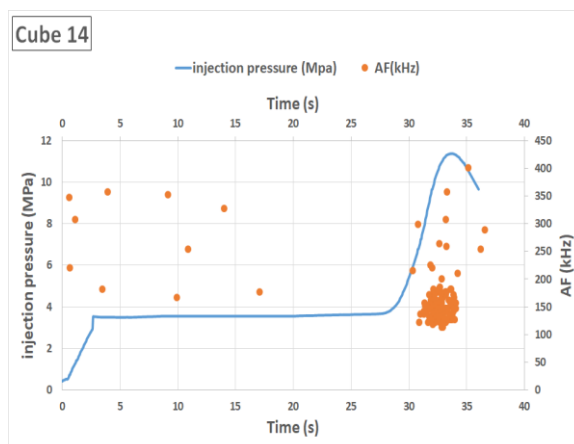
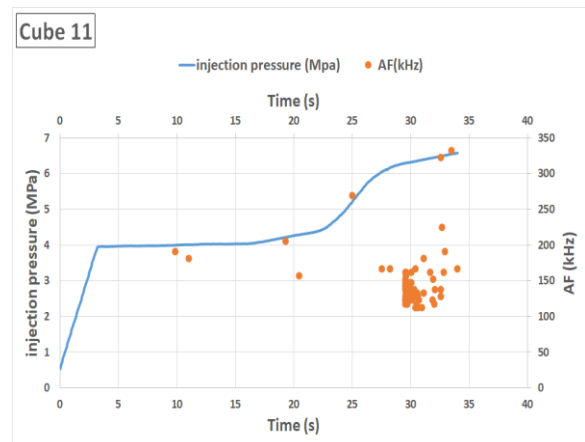
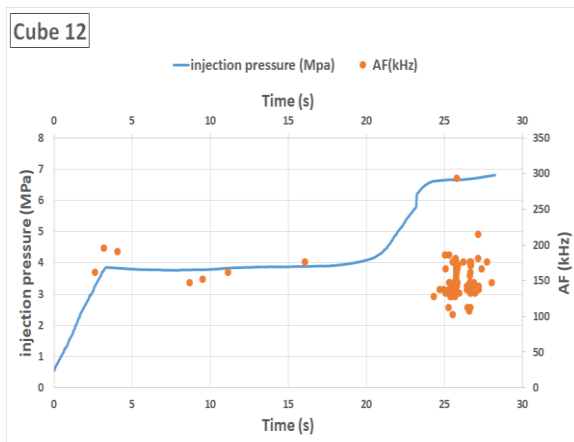
ادامه دارد (انتشار ترک ناپایدار). تزریق سیال متوقف شده و سیال از شکستگی‌ها خارج می‌شود و شکستگی-ها با خروج سیال بسته شده‌اند. پس از شکست، هیچ انرژی ذخیره و آزاد نمی‌شود و هیچ رویداد AE رخ نداده است (بسته شدن شکستگی).

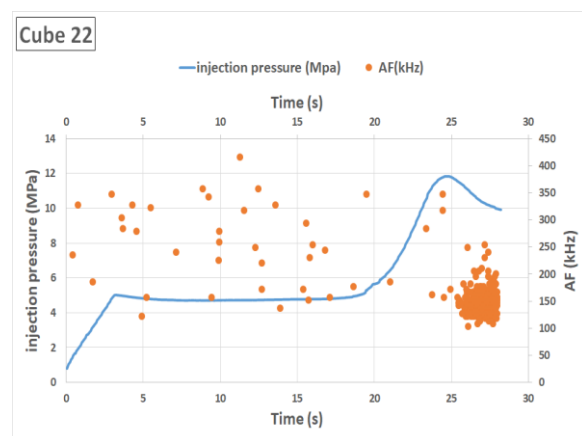
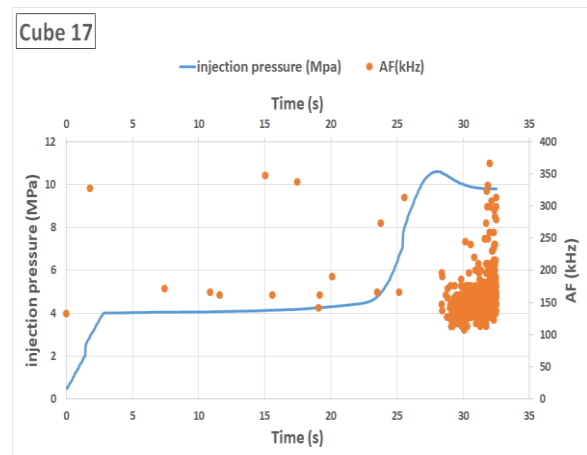
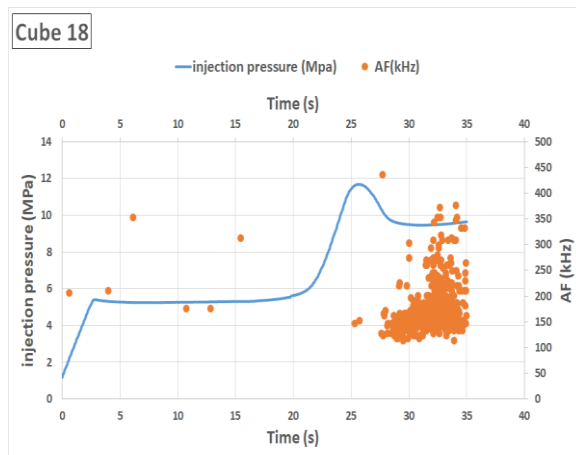
۵-۳-۸) پارامتر فرکانس متوسط (AF)

فرکانس‌های متوسط در آزمایش‌های انجام شده در بازه ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیلوهرتز می‌باشند. برای بررسی تغییرات فرکانس متوسط در طول زمان آزمایش‌ها، نمودارهای فرکانس متوسط به همراه فشار تزریق در



شکل ۱۷-۵ آورده شده است.





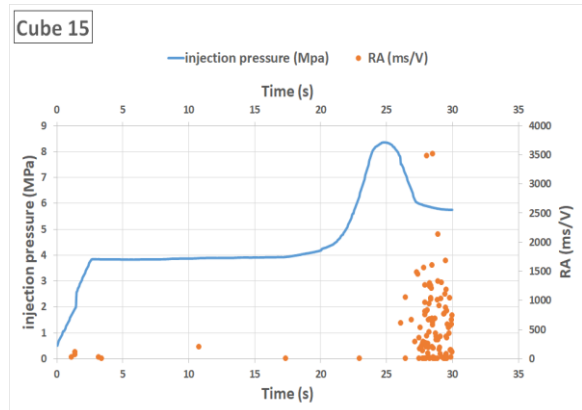
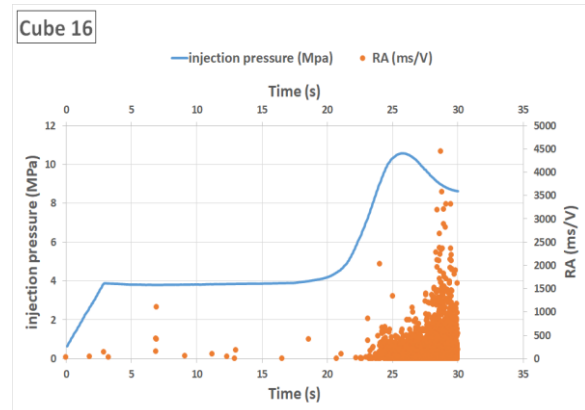
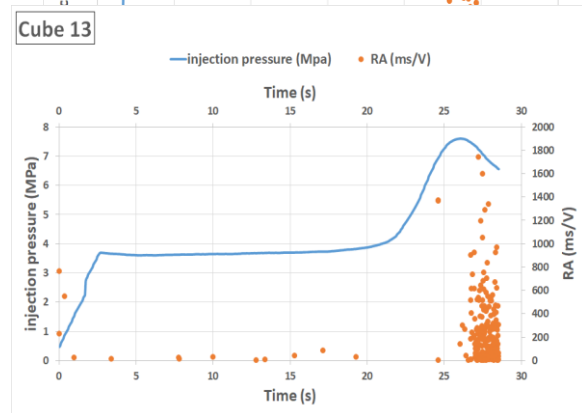
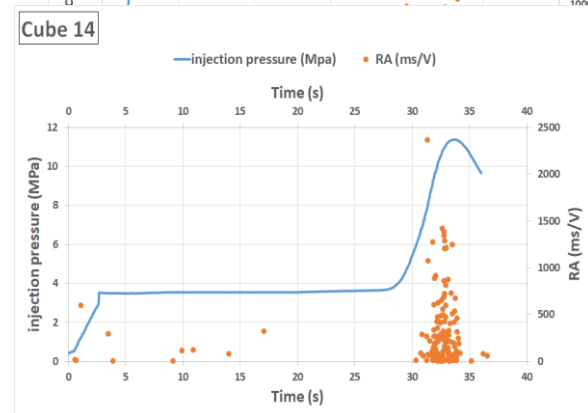
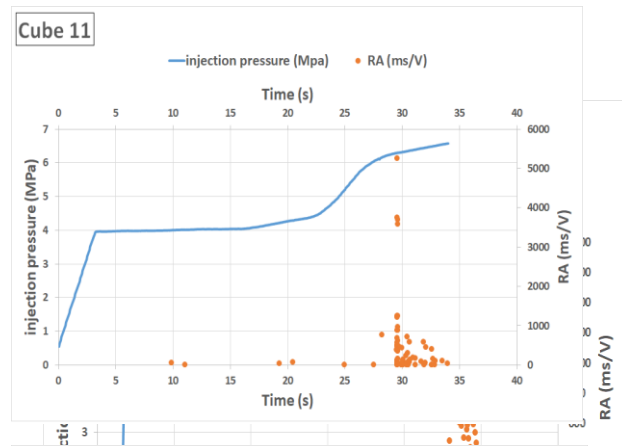
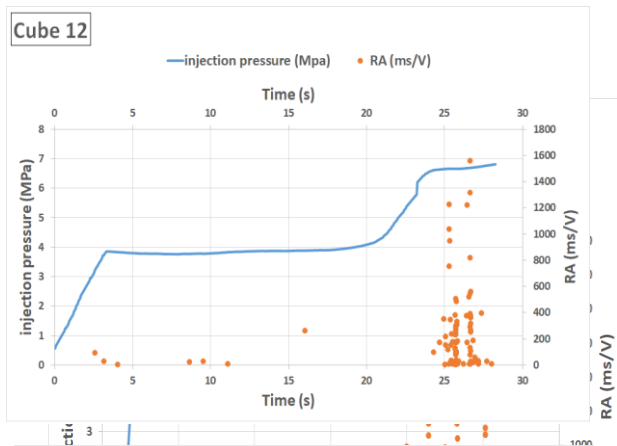
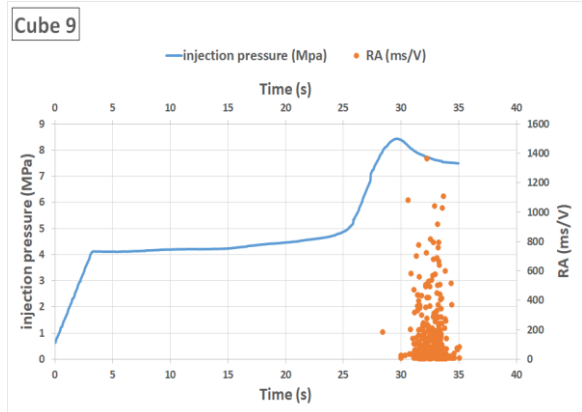
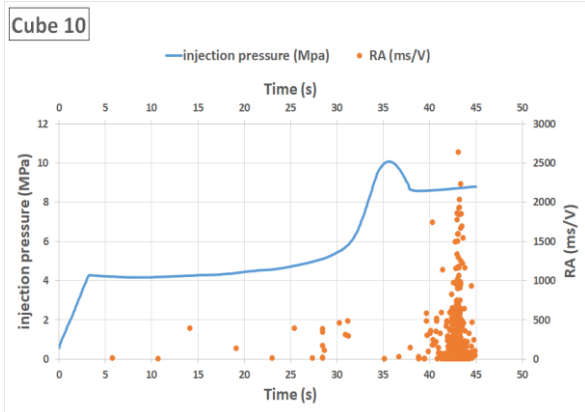
شکل ۱۷-۵) نمودار تغییرات مقدار فرکانس متوسط و فشار تزریق سیال در آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت ترکیبات تنش متفاوت

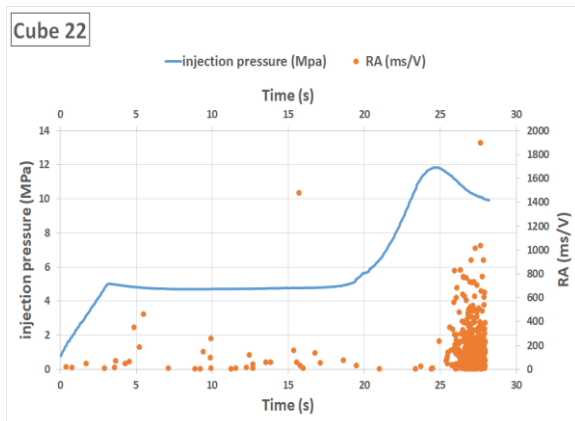
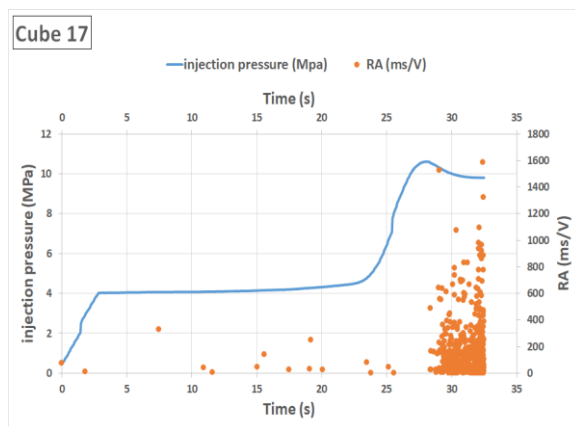
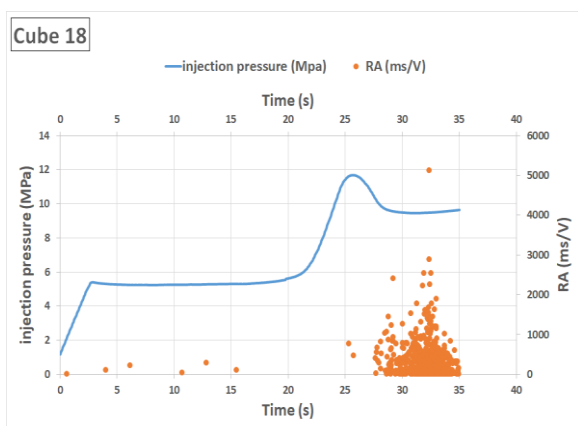
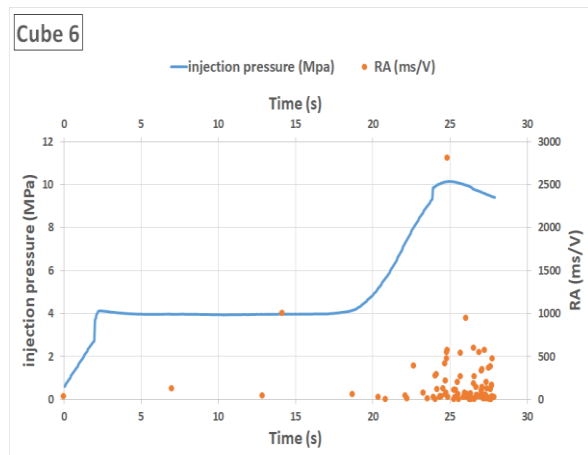
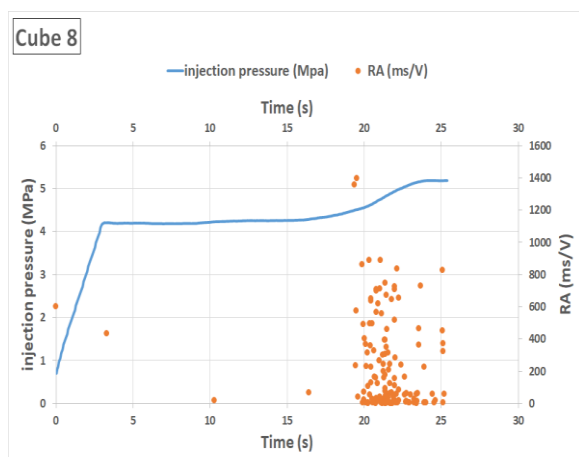
بر اساس شکل ۱۷-۵، فرکانس متوسط برای آزمایش‌ها به طور متوسط از ۳۵۰-۱۵۰ کیلوهرتز شروع شده است. این فعالیت‌ها به دلیل ایجاد ریزترک‌هایی در نمونه‌ها است و شکستگی در مقیاس بزرگ رخ نداده است. در لحظه شکست که فشار تزریق ناگهان به مقدار حداکثر خود می‌رسد، افت ناگهانی AF وجود دارد. برای آزمایش نمونه Cube 3، AF قبل از شکست به مقدار ۴۵۰-۴۰۰ کیلوهرتز رسیده است ولی در لحظه شکست ناگهان به مقدار ۳۵۰-۱۰۰ کیلوهرتز کاهش می‌یابد. مقدار AF در مراحل اولیه تزریق سیال بسیار کم است و در بعضی از آزمایش‌ها در لحظات ابتدایی آزمایش AF غیرفعال است. در مراحل میانی که ترک‌ها در حال گسترش هستند، AF افزایش می‌یابد و سپس زمانی که شکست رخ می‌دهد، AF کاهش می‌یابد و بعد از شکست نیز AF دوباره افزایش یافته است. تغییرات AF قبل و بعد از شکست بیشتر می‌باشد. مقدار

AF بالا نشان دهنده ایجاد ریزترک و AF پایین نشان دهنده ایجاد ماکروترک است. به طور کلی می‌توان از شکل ۵-۱۷ چنین استنباط کرد که AF در مرحله اول شکستگی (توسعه ریزترک) افزایش می‌یابد و سپس تا مرحله دوم کاهش می‌یابد (ایجاد ماکروترک) و در آخرین مرحله شکستگی (باز شدن عرض ماکروترک)، دوباره روند افزایشی مشاهده می‌شود. با توجه به این که ترک‌های کششی دارای AF بالایی هستند، در حالی که ترک‌های برشی دارای AF پایینی هستند. در مراحل اولیه تزریق سیال تا قبل از ایجاد شکست، تولید ترک‌های کششی در نمونه‌ها بیشتر است و همراه با ایجاد ریزترک‌ها می‌باشد. سپس در لحظه شکست نمونه‌ها، تولید ترک‌های برشی در نمونه‌ها بیشتر می‌شود که در آن لحظه فشار تزریق افزایش می‌یابد و بعد از نشت سیال و کاهش فشار تزریق، دوباره تولید ترک‌های کششی در نمونه‌ها افزایش یافته است.

۵-۳-۹) پارامتر زاویه خیز (RA)

چنانچه قبلاً بیان گردید مقدار RA نشان دهنده نسبت زمان خیز به دامنه موج AE است. مقدار RA سیگنال‌های AE ناشی از شکست برشی بیشتر از مقدار RA شکست کششی است. از مقدار RA به عنوان شاخصی برای تشخیص مکانیزم شکست استفاده شده است. در اکثر مواد، شکست برشی معمولاً پس از شکست کششی رخ می‌دهد. تغییرات زاویه خیز در طول زمان آزمایش به همراه فشار تزریق در شکست ۱۸-۵ برای آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت ترکیبات مختلف تنش آورده شده است. مقدار RA در مرحله اول فرایند تزریق سیال کمتر بوده و مقدار RA در زمان شروع شکستگی به حداکثر مقدار خود رسیده است. مقدار RA به سرعت پس از شکست کاهش می‌یابد و همچنین فشار تزریق در همان لحظه به سرعت کاهش می‌یابد.





شکل ۱۸-۵) نمودار تغییرات مقدار زاویه خیز و فشار تزریق سیال در آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت ترکیبات تنش متفاوت

همان طور که از شکل ۱۸-۵ پیدا است، ایجاد ترک‌های برشی منجر به افزایش مقدار RA در دوره شروع شکستگی شده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که ترک‌های برشی در دوره شروع شکستگی،

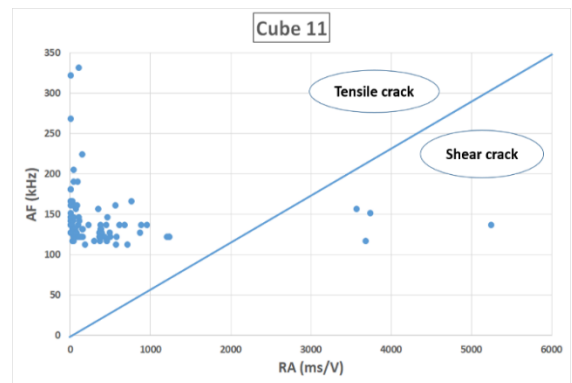
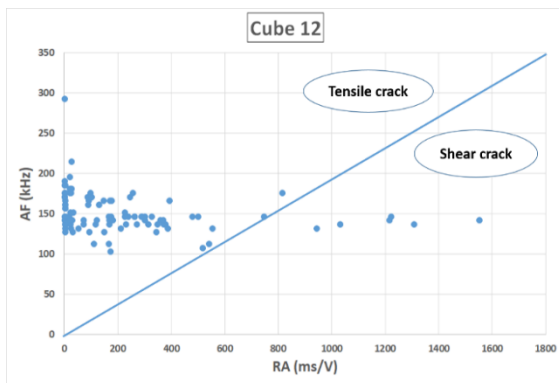
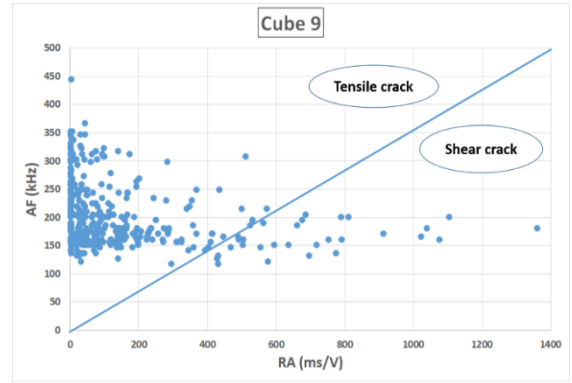
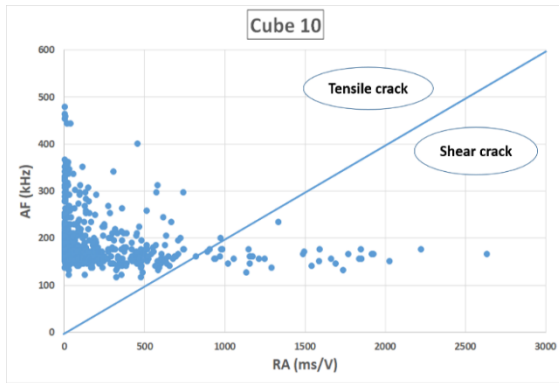
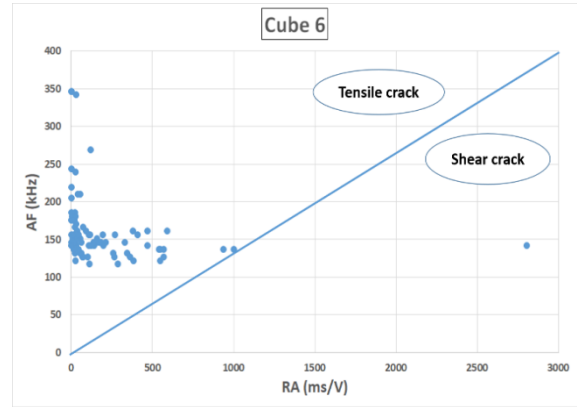
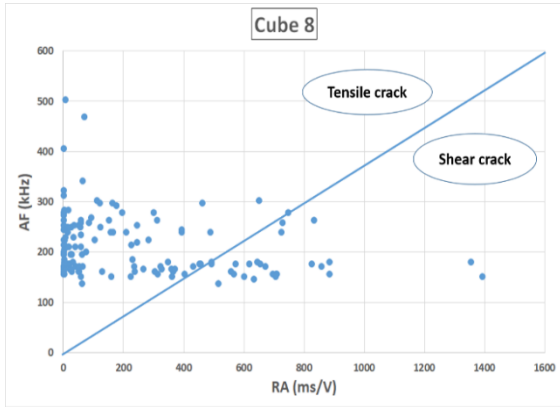
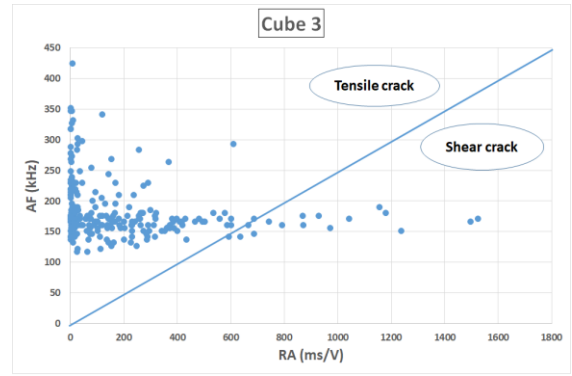
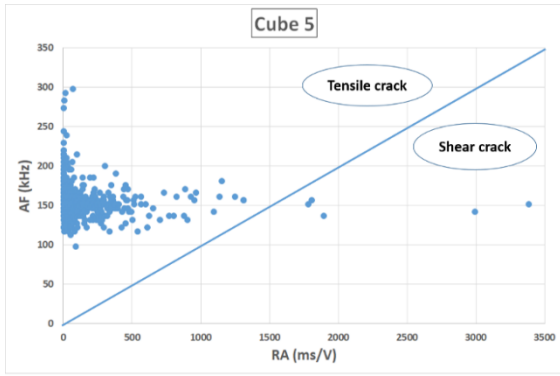
یعنی هنگامی که ترک تازه به سطح نمونه گسترش یافته و متمرکز شده، رخ داده است. برای آزمایش نمونه Cube 3، در مراحل ابتدایی تزریق سیال مقدار RA پایین است و نشان می‌دهد که معمولاً در ابتدا ترک‌های کششی در نمونه بوجود می‌آیند. مقدار RA تا ثانیه ۱۷ آزمایش در مقدار پایینی قرار دارد ولی همزمان با شروع روند افزایشی فشار تزریق و از ثانیه ۱۷ تا ۲۰، مقدار RA تقریباً غیر فعال است یا بسیار کاهش یافته است که ترک‌های کششی در نمونه به طور گسترده در حال تشکیل هستند. با افزایش فشار تزریق تا نقطه حداکثر، مقدار RA به طور ناگهانی تا مقدار 1500 ms/V افزایش می‌یابد و بعد از شکست دوباره کاهش می‌یابد. در لحظه شکست ترک‌های برشی بسیاری ایجاد شده و ایجاد ترک‌های برشی است که باعث افزایش ناگهانی مقدار RA شده است. مقدار RA برای بقیه آزمایش‌ها نیز همین رفتار را از خود نشان داده است. پس می‌توان از مباحث بالا نتیجه گرفت که شکست برشی بیشترین قسمت شکل‌های موج تنش تولید شده انتشار ترک را به خود اختصاص می‌دهد و انرژی AE برای ترک‌های برشی بیشتر از ترک‌های کششی است. نتایج این بخش با نتایج بدست آمده توسط مائو^۱ و همکاران (۲۰۱۷) و جیانگ^۲ و همکاران (۲۰۲۰) انطباق داشته و همخوانی دارد [30, 37].

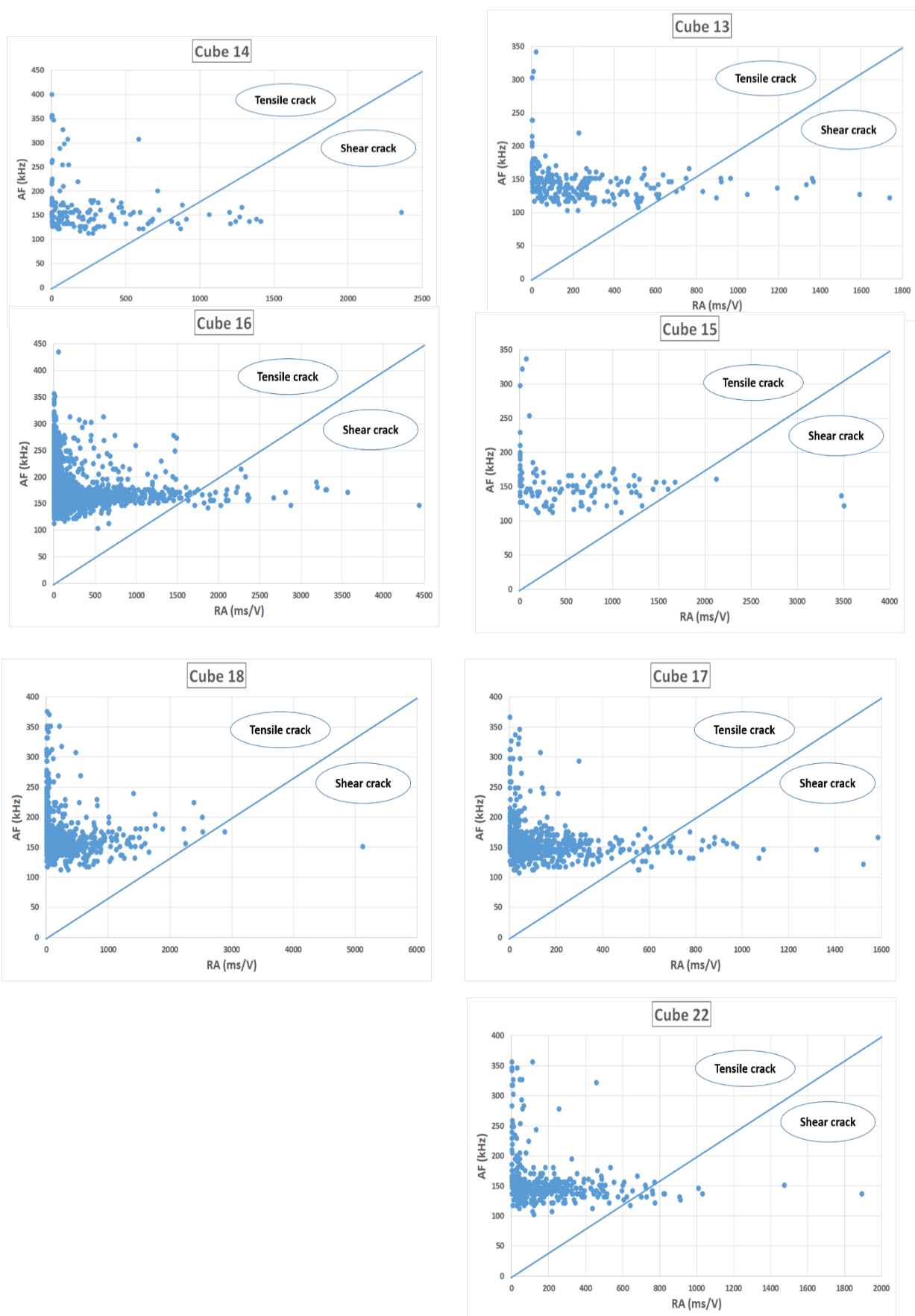
۵-۳-۱۰) طبقه بندی نوع ترک‌ها

چنان چه قبلاً بیان گردید ترک‌های کششی در مقایسه با ترک‌های برشی امواجی با زاویه خیز (RA) پایین و فرکانس متوسط (AF) بالا تولید می‌کنند. در شکل ۵-۱۹ طبقه بندی ترک‌ها با روش AF-RA برای آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت ترکیبات مختلف تنش نشان داده شده است.

¹ Mao

² Jiang





شکل ۱۹-۵) طبقه بندی نوع ترک‌ها در آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت ترکیبات تنش متفاوت

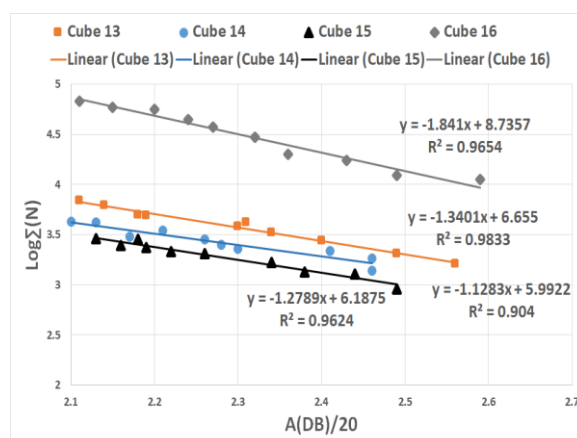
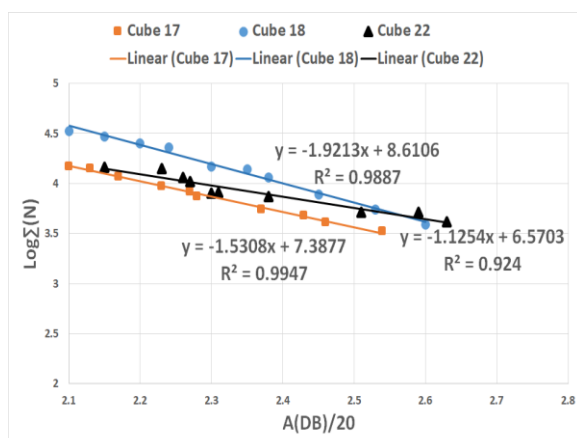
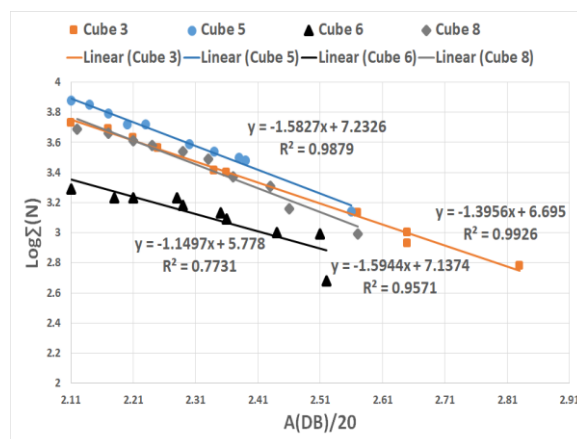
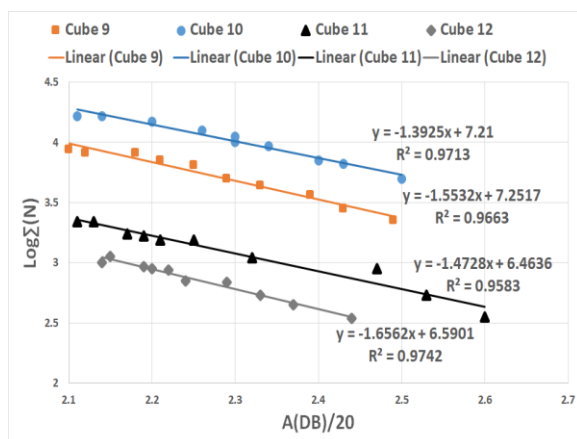
با توجه به شکل ۱۹-۵، ترک‌های کششی در تمامی آزمایش‌ها بیش از ۹۰ درصد ترک‌ها را تشکیل می‌دهند و بقیه آن‌ها ترک‌های برشی هستند. بیشتر بودن ترک‌های کششی نشان می‌دهد که عوامل ایجاد کننده فشار تزریق بیشتر به عنوان تنش کششی در داخل نمونه‌ها اطراف حفره عمل می‌کنند. این نتیجه مطابق با تئوری کششی شکست هیدرولیکی می‌باشد. هنگامی که اختلاف تنش‌های افقی زیاد باشد و تنش-ها در شرایط ناهمسانگرد باشند، سیگنال‌های AE تولید شده عموماً فرکانس متوسط بالا و زاویه خیز پایین دارند، نسبت به زمانی که اختلاف تنش‌های افقی کم باشد و تنش‌ها در شرایط همسانگرد باشند، که در این شرایط عموماً فرکانس متوسط پایین و زاویه خیز بالا می‌باشد. در شرایط تنش ناهمسانگرد مکانیزم شکست عمدتاً ناشی از ریزترک‌های کششی با فرکانس متوسط بالا و زاویه خیز پایین می‌باشد، در حالی که نقش ترک‌های برشی با فرکانس متوسط پایین و زاویه خیز بالا در شکست نمونه‌هایی که در شرایط تنش همسانگرد هستند بیشتر است.

اختلاف کم در تنش‌های افقی باعث می‌شود هندسه شکست نامظم‌تر شود و درصد وقایع ترک‌های برشی را افزایش دهد. انرژی رویدادهای ترک برشی بیشتر از ترک کششی است، بنابراین همین مورد باعث می‌شود که انرژی AE و انرژی تجمعی AE در مواقعی که تنش‌ها در شرایط همسانگرد هستند، بیشتر باشند. ولی بیشتر ترک‌های بوجود آمده در نمونه‌ها از نوع ترک کششی می‌باشند و فشار تزریق تحت تاثیر ترک کششی می‌باشد. قبل از نقطه حداکثر فشار تزریق ترک کششی بیشتر از ترک برشی است و تا لحظه شکست مقدار ترک کششی افزایش یافته است. شکست نمونه‌ها تحت آزمایش شکست هیدرولیکی تحت تاثیر نوع کششی ترک‌ها می‌باشد. اگر چه در شرایط اختلاف تنش‌های افقی کم و شرایط تنش همسانگرد، ترک‌های کششی بیشتر است ولی ترک‌های برشی نسبت به شرایط تنش ناهمسانگرد افزایش یافته است. با توجه به شکل‌ها، هر چه تنش‌های جانبی افزایش بیابند ترک‌های کششی در آزمایش شکست هیدرولیکی سه محوره واقعی بیشتر شده است و در طی فرایند تزریق سیال با افزایش تنش‌های جانبی، ترک‌های کششی بیشتری تولید شده است. مقدار RA نمونه‌ها در سطح پایینی در طول زمان تزریق سیال قرار دارد و در لحظه شکست افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد ترک‌های برشی کمی در نمونه‌ها قبل از مرحله شکست

ایجاد شده است. AF در محدوده ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیلوهرتز توزیع می‌شود که مقدار تراکم AF با افزایش فشار تزریق سیال بیشتر می‌شود، که نشان می‌دهد ترک‌های کششی در نمونه‌ها در طول فرایند تزریق سیال ایجاد شده‌اند، و همچنین میزان تولید ترک‌ها با افزایش تنش قائم، افزایش یافته است.

۵-۳-۱۱) تحلیل b-value

ایجاد ریزترک باعث ترک خوردگی با مقدار b-value بالا می‌شود و ایجاد ماکروترک باعث ترک خوردگی با مقدار b-value کم می‌شود. هنگامی که در نمونه گسترش ترک افزایش یابد و به مرحله شکست نزدیک‌تر شود، روند شکست از حالت میکرو به حالت ماکرو تبدیل می‌شود و مقدار b-value کاهش می‌یابد. b-value برای آزمایش‌ها بر اساس رابطه ۴-۴ محاسبه شده و در شکل ۵-۲۰ نمودار آن برای آزمایش‌های شکست هیدرولیکی نشان داده شده است.



شکل ۲۰-۵) مقادیر b-value برای نمونه‌ها در آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت ترکیبات تنش متفاوت

در نمودار تغییرات b-value حد آستانه متناظر است با نقطه مبدا که برابر (۰ و ۲/۱۰) می‌باشد. از عرض از مبدا خطوط رسم شده می‌توان تعداد رخدادهای منتهی به سیگنال AE را متوجه شد و هر چه عرض از مبدا بیشتر باشد تعداد رخدادها بیشتر است. به طور متوسط تنش‌ها در حالت ناهمسانگرد و اختلاف تنش‌های افقی بالا، عرض از مبدا بیشتری نسبت به زمانی دارد که تنش‌ها همسانگرد و اختلاف تنش‌های افقی کم باشد، و در حالت ناهمسانگرد تعداد رخدادهای منتهی به سیگنال AE بیشتر است.

شیب خط معادله‌های روی خطوط رسم شده مقدار b-value است، که به طور متوسط زمانی که اختلاف تنش‌های افقی کمتر است، مقدار b-value نیز کم است و برای اختلاف تنش‌های افقی بالا این مقدار بیشتر می‌شود. این مورد نشان می‌دهد زمانی که اختلاف تنش‌های افقی بالاتر می‌باشند، نسبت ریزترک‌ها به ماکروترک‌ها افزایش می‌یابد، نسبت به زمانی که اختلاف تنش‌های افقی کمتر است. دلیل آن

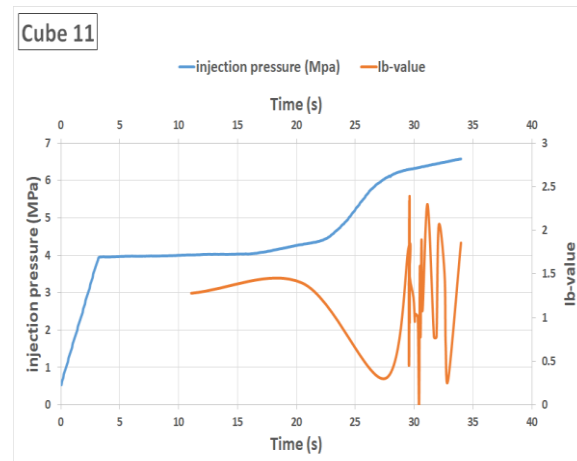
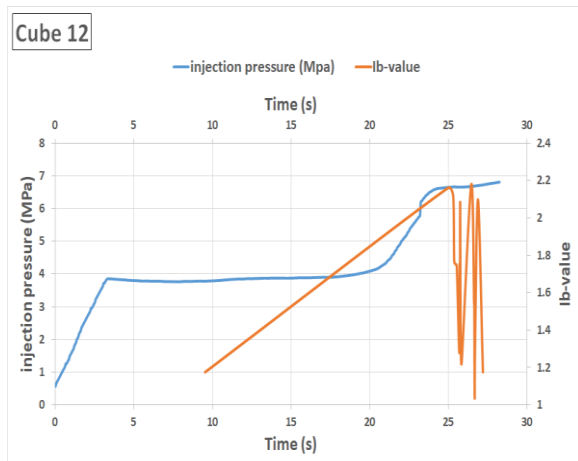
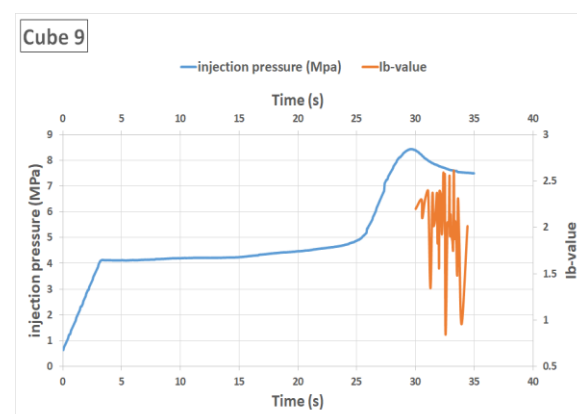
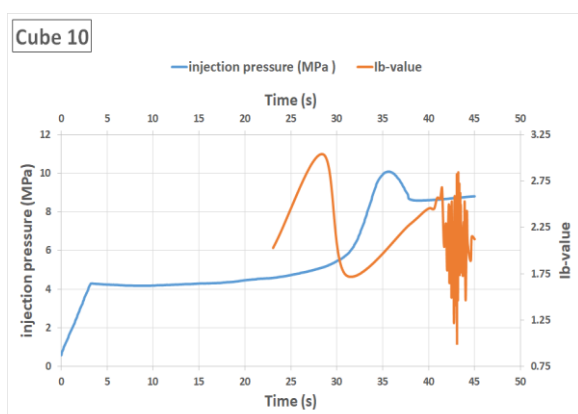
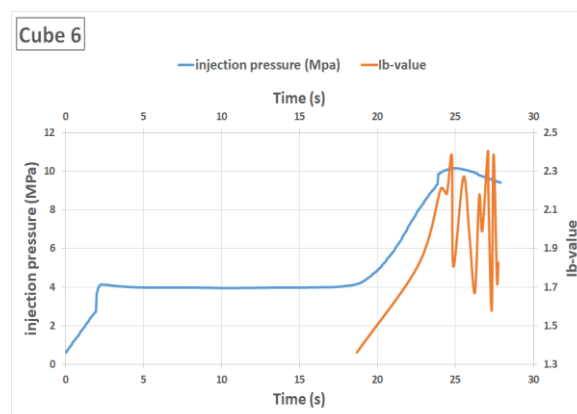
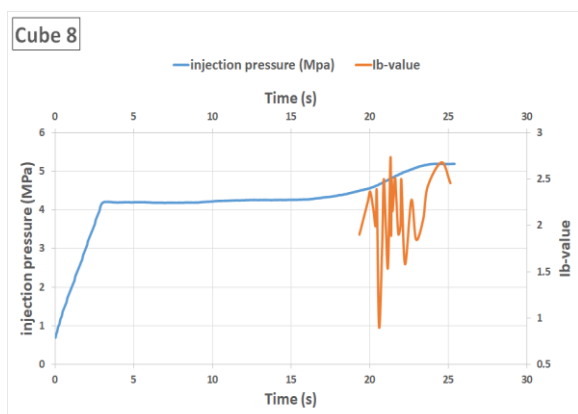
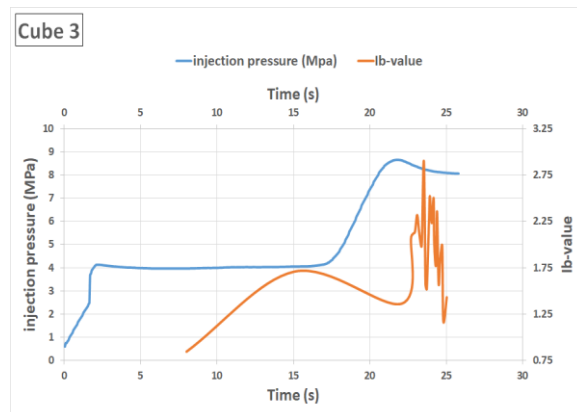
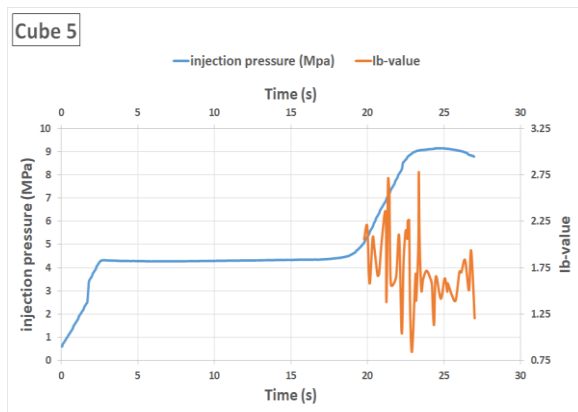
می‌تواند انحراف ترک به سمت تنش افقی حداکثر باشد که تحت تاثیر اختلاف تنش افقی بالاتر ریزترک‌های بیشتری در اثر انحراف ترک و گسترش آن به وجود آمده است. قبلاً نیز اشاره شده است که سطح انرژی امواج تنش تحت اختلاف تنش افقی بالا، افت زیادی دارد و همچنین مقدار b -value هر چقدر بیشتر باشد رخدادهایی با انرژی کمتر در اثر ترک‌های کوچک مقیاس با دامنه کم تولید می‌شوند و مقدار b -value را افزایش می‌دهد.

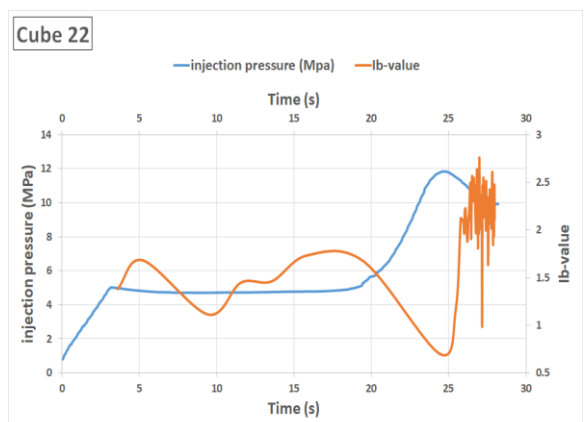
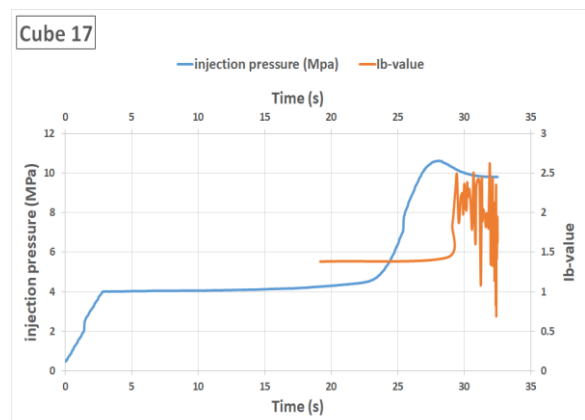
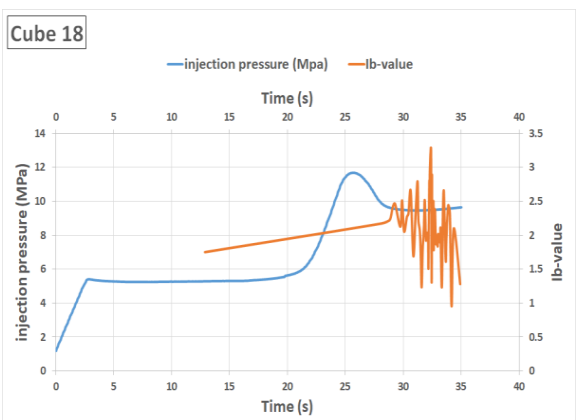
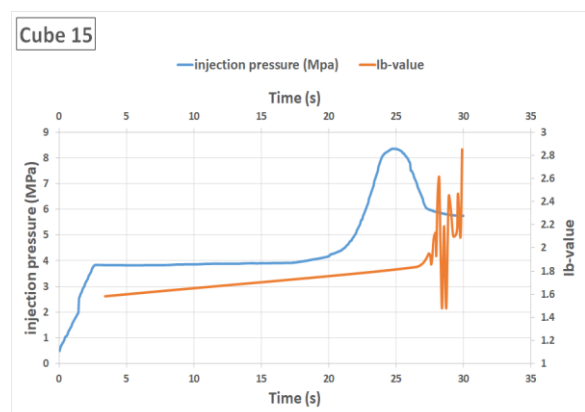
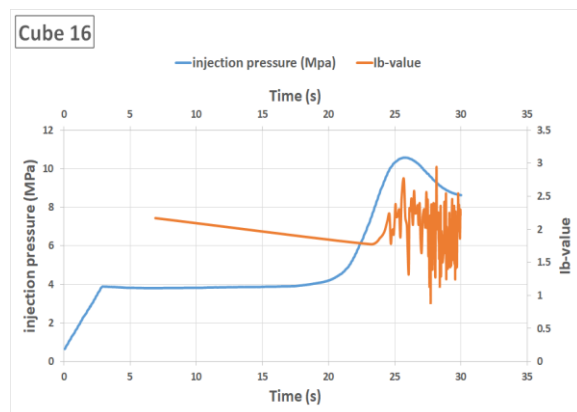
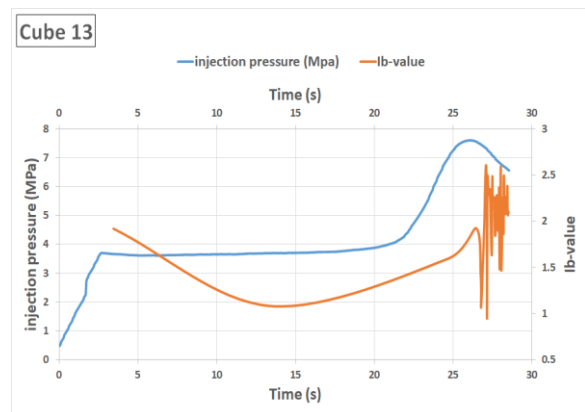
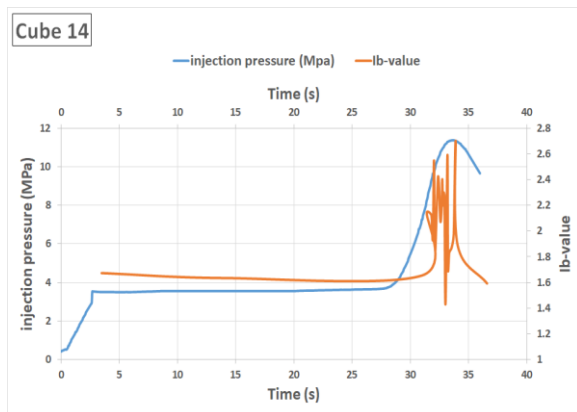
b -value به شکل‌گیری ترک در نمونه‌ها اشاره دارد و در لحظه فشار تزریق حداکثر مقدار آن کاهش یافته است و نشان دهنده تغییر در نوع تشکیل ترک از میکرو به ماکرو است. b -value برای ترکیبات تنش ناهمسانگرد بیشتر از ترکیبات تنش همسانگرد می‌باشد و اختلاف تنش افقی بالاتر به دلیل انحراف ترک به ایجاد ریزترک در نمونه‌ها کمک می‌کند و تعداد ریزترک‌ها را افزایش داده است. هنگامی که ماکروترک رخ می‌دهد انرژی کرنشی ذخیره شده در نمونه‌ها آزاد می‌شود و باعث امواج AE با دامنه‌های بالا و b -value کمتر شده است. ماکروترک باعث ایجاد سیگنال AE با انرژی بالاتر می‌شود و زمانی که اختلاف تنش‌های افقی بالا باشد، نسبت ریزترک‌ها به ماکروترک‌ها افزایش می‌یابد و مقدار b -value را افزایش می‌دهند، در مقابل سیگنال‌های AE با انرژی کمتر بوجود می‌آیند. به همین دلیل باعث انرژی AE کمتر در ترکیبات تنش ناهمسانگرد در نمونه‌ها شده است. تجزیه و تحلیل b -value را می‌توان برای درک ماهیت تشکیل ترک و همچنین شناسایی تشکیل ماکروترک انجام داد.

۵-۳-۱۲) تحلیل Ib -value

Ib -value بهبود یافته از رابطه ۵-۴ برای آزمایش شکست هیدرولیکی نمونه‌ها به دست آمده است. در شکل ۵-۲۱ نمودار تغییرات Ib -value به همراه نمودار فشار-زمان برای آزمایش‌های شکست هیدرولیکی نشان داده شده است. تغییرات Ib -value برای آزمایش‌ها به طور متوسط در حدود ۰/۵ تا ۴ می‌باشد، که طبق ضرایب کران بالا و پایین دامنه تعیین شده است. مقدار Ib -value به سطح آسیب نمونه بستگی دارد و

کاربرد آن در تعیین میزان آسیب نمونه می‌باشد. کاهش ناگهانی Ib-value در لحظات پایانی آزمایش‌ها نشان دهنده وقوع رویدادهای ترک خوردگی بزرگ در نمونه‌ها است.





شکل ۲۱-۵) نمودار تغییرات مقدار Ib-value و فشار تزریق سیال برای نمونه‌ها در آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت ترکیبات تنش متفاوت

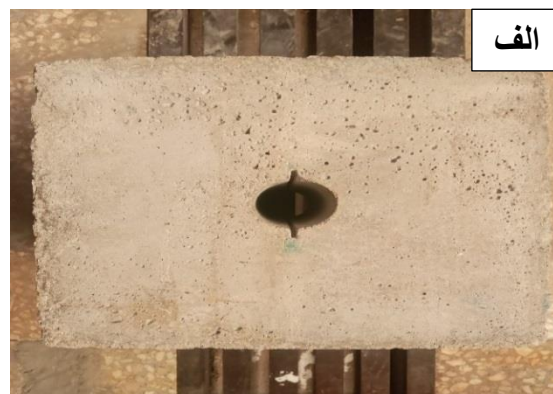
در نمونه Cube 3 پس از تزریق سیال به درون نمونه و پر شدن حفره مرکزی نمونه که باعث افزایش فشار تزریق می‌شود، فشار تزریق تا لحظه شروع شکستگی ثابت باقی می‌ماند. مقدار Ib-value تا ثانیه ۸ آزمایش غیر فعال است و تغییری در مقدار آن مشاهده نشده است، ولی پس از ثانیه ۸ شروع به افزایش می‌کند که دلیل آن ایجاد ریزترک‌ها درون نمونه‌ها است. در ادامه تزریق سیال، فشار سیال ناگهانی شروع به افزایش می‌نماید، در آن لحظه یک افزایش لحظه‌ای در Ib-value مشاهده شده است که در اثر اتصال ریزترک‌ها و ایجاد ترک‌های بزرگتر است. فشار تزریق به حداکثر مقدار خود می‌رسد و شکست در نمونه ایجاد شده است که Ib-value قبل از لحظه شکست، کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد ترک اصلی در حال گسترش بوده است و بعد از شکست نهایی Ib-value به شدت افزایش می‌یابد و در ادامه با کاهش و ثابت شدن مقدار فشار تزریق، Ib-value نیز پس از تجربه نقطه حداکثر خود به شدت کاهش می‌یابد.

همان گونه که از نمودارها مشاهده شده است، در لحظات ابتدایی آزمایش‌ها نوسانات Ib-value در اثر ایجاد ریزترک‌ها پایین است، ولی به صورت ناگهانی نوسانات Ib-value افزایش می‌یابد و مقدار آن کاهش می‌یابد که در اثر ایجاد رویدادهای AE در مقیاس بزرگتر و ایجاد شکست و ترک خوردگی بزرگ می‌باشد. پس از شروع فشار تزریق، ریزترک‌ها در نمونه‌ها تشکیل می‌شوند، این ریزترک‌ها ترک‌های برشی کوچک می‌باشند که باعث نوسان مداوم‌تری در Ib-value شده‌اند. در ادامه تزریق سیال و تبدیل ریزترک‌ها به ماکروترک، رویدادهای بزرگ AE افزایش می‌یابند و ترک‌های کششی بزرگ بوجود می‌آیند که منجر به شروع افزایش فشار تزریق سیال شده‌اند و نوسانات Ib-value به شدت افزایش می‌یابد و مقدار آن کاهش یافته است. تغییرات زیاد در مقادیر Ib-value نشان‌دهنده تغییرات شدید در رشد ترک‌ها است. Ib-value برای نمونه‌ها با ترکیبات تنش همسانگرد به طور مداوم‌تری در نوسان است، یعنی نسبت رویدادهای AE بزرگ و کوچک در سطح پایدارتر قرار دارند و ریزترک‌ها به طور پایدار با مقیاس‌های مختلف گسترش می‌یابند. برای نمونه‌ها با ترکیبات تنش ناهمسانگرد، مقدار Ib-value دارای نوسانات زیاد می‌باشد که نشان دهنده انفجار ناگهانی رشد ترک است. در لحظه شکست نمونه‌ها مقدار Ib-value به صورت ناگهانی با شدت

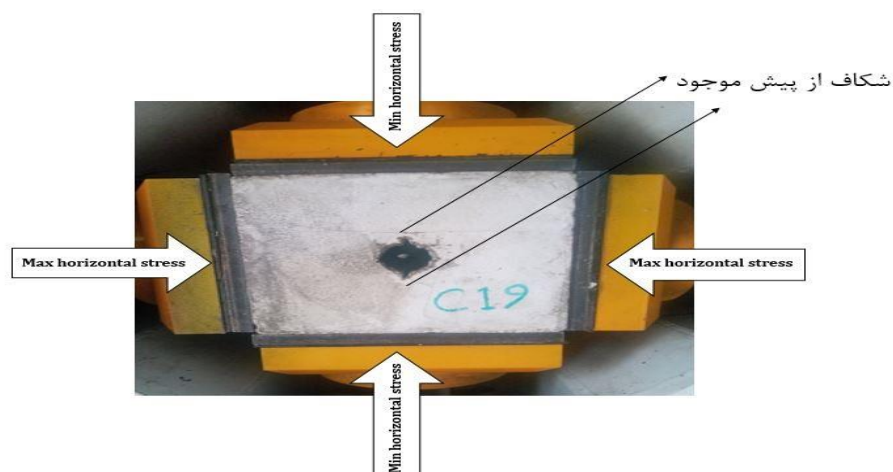
بالا تر کاهش می‌یابد که رویدادهای AE در مقیاس‌های بزرگ‌تر در لحظه شکست نمونه‌های ناهمسانگرد به وجود آمده است.

۴-۵) بررسی تاثیر شکاف از پیش موجود در جداره حفره

برای بررسی بیشتر در خصوص روند گسترش ترک در فرایند شکست هیدرولیکی، به وسیله آره لنگ بر روی ۳ نمونه بتنی، ۲ شکاف بر روی دیواره حفره و به صورت موازی و مقابل هم ایجاد شده‌اند که شکاف-ها موازی با تنش افقی حداکثر قرار گرفته است. هدف بررسی تاثیر شکاف از پیش موجود و تاثیر آن در روند گسترش ترک و همچنین مقایسه‌ای بین نمونه‌های بدون شکاف و شکافدار در ترکیبات تنش مشابه است. عمق این شکاف‌ها ۱۰ میلی‌متر و ضخامت آن‌ها در حدود ۴ میلی‌متر هستند. شکل ۲۲-۵ شکاف از پیش موجود و روند ایجاد آن را نشان می‌دهد. همچنین، در شکل ۲۳-۵ نحوه قرارگیری نمونه شکافدار در داخل دستگاه سه محوره واقعی نشان داده شده است.



شکل ۲۲-۵) تهیه نمونه شکافدار، الف) شکاف از پیش موجود ب) روند ایجاد آن

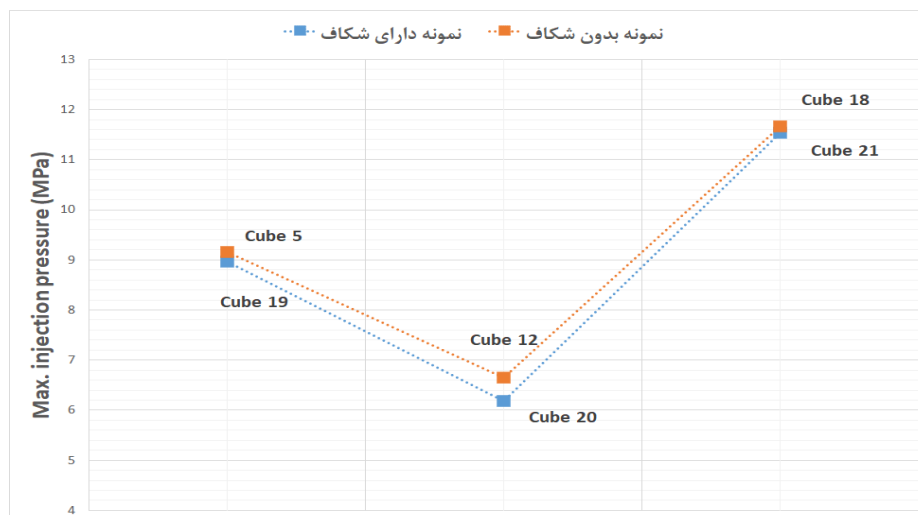


شکل ۲۳-۵) نحوه قرارگیری نمونه شکافدار در داخل دستگاه سه محوره واقعی

برای بررسی تاثیر شکافها بر روی فشار شکست نمونه‌ها، ترکیبات تنش مشابه که در آزمایش‌های قبلی بر روی نمونه‌های بدون شکاف آزمایش شده است، بر روی ۳ نمونه دارای شکاف اعمال شده است. نتایج بدست آمده از آزمایش نمونه‌های شکافدار و بدون شکاف در ترکیبات تنش مشابه در جدول ۳-۵ و همچنین تاثیر شکاف از پیش موجود بر فشار تزریق سیال در لحظه شکست نمونه‌ها در شکل ۲۴-۵ آورده شده است.

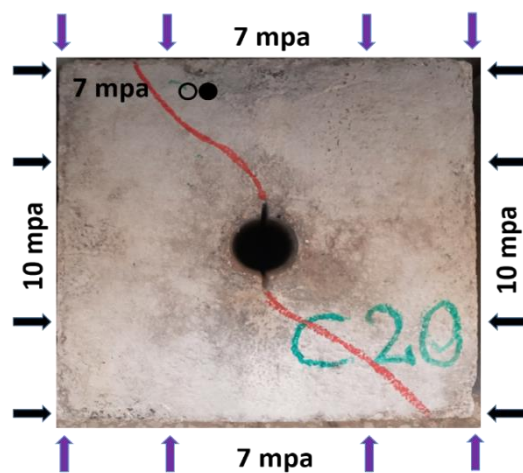
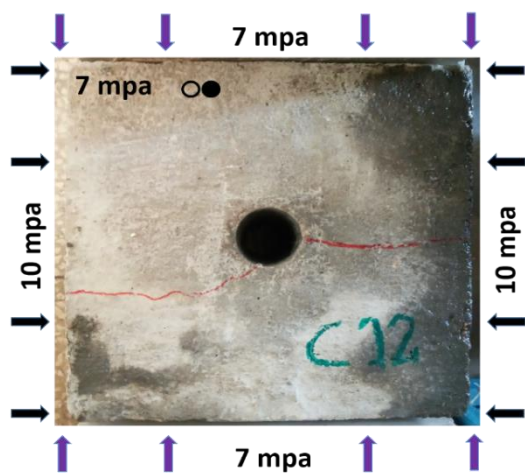
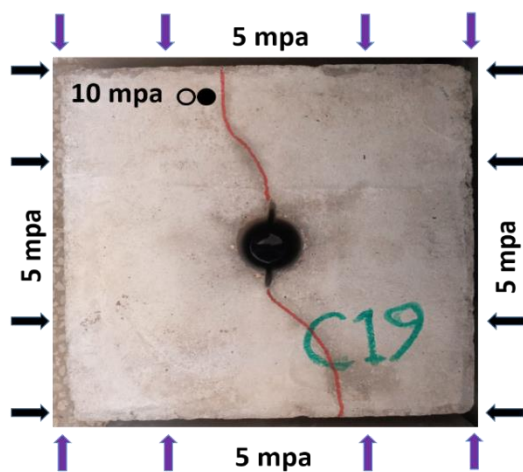
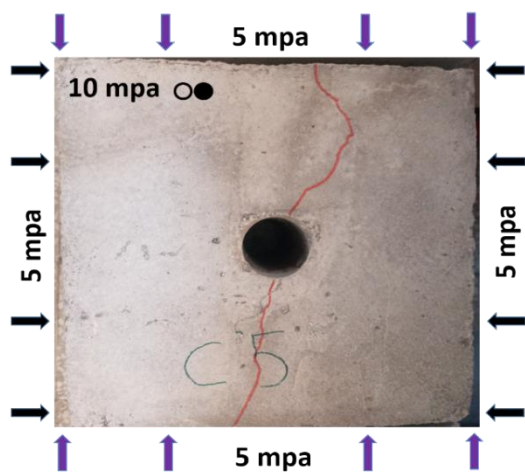
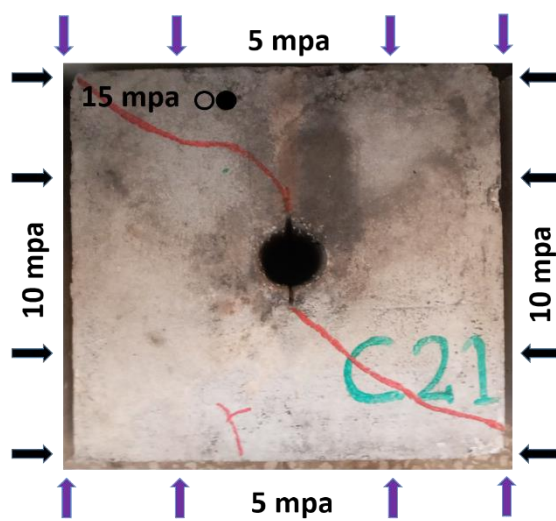
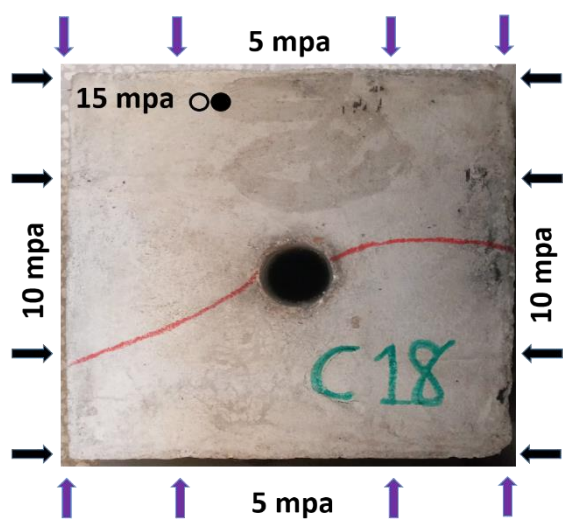
جدول ۳-۵) نتایج بدست آمده از آزمایش نمونه‌های شکافدار و بدون شکاف در ترکیبات تنش مشابه

نوع نمونه	فشار شکست (MPa)	تنش قائم (MPa)	تنش افقی حداکثر (MPa)	تنش افقی حداقل (MPa)	کد نمونه
بدون شکاف	۹/۱۵	۱۰	۵	۵	Cube 5
شکافدار	۸/۹۶	۱۰	۵	۵	Cube 19
بدون شکاف	۶/۶۵	۷	۱۰	۷	Cube 12
شکافدار	۶/۱۹	۷	۱۰	۷	Cube 20
بدون شکاف	۱۱/۶۷	۱۵	۱۰	۵	Cube 18
شکافدار	۱۱/۵۳	۱۵	۱۰	۵	Cube 21



شکل ۲۴-۵) تاثیر شکاف از پیش موجود بر فشار تزریق سیال در لحظه شکست نمونه‌ها جدول ۲-۵ و شکل ۲۴-۵ نشان می‌دهند که آزمایش‌های شکست هیدرولیکی بر روی نمونه‌های شکافدار باعث تغییر فشار شکست می‌شوند و اهمیت شکاف‌های طبیعی را در شروع و گسترش شکست هیدرولیکی نشان می‌دهد. به علت وجود شکاف از پیش موجود، نمونه‌های شکافدار نسبت به نمونه‌های فاقد شکاف، فشار شکست پایین‌تری دارند. فشار شکست در نمونه‌های شکافدار به وضوح پایین‌تر است و می‌تواند به دلیل کاهش دادن و برطرف نمودن تنش‌های متمرکز اطراف چال در اثر وجود شکاف باشد که نقش مهمی در شروع شکست و کاهش اثر شرایط تنش اطراف چال دارد. شکاف از پیش موجود تمرکز تنش اطراف چال را برطرف می‌کند و باعث کاهش فشار شکست شده و شکاف از پیش موجود بر روی هندسه شکست نیز تاثیر دارد و باعث پیچیده شدن هندسه شکست می‌شود. در شکل ۲۵-۵ هندسه شکست نمونه‌های شکافدار و بدون شکاف تحت آزمایش شکست هیدرولیکی سه محوره واقعی نشان داده شده است

ب) نمونه‌های بدون شکاف



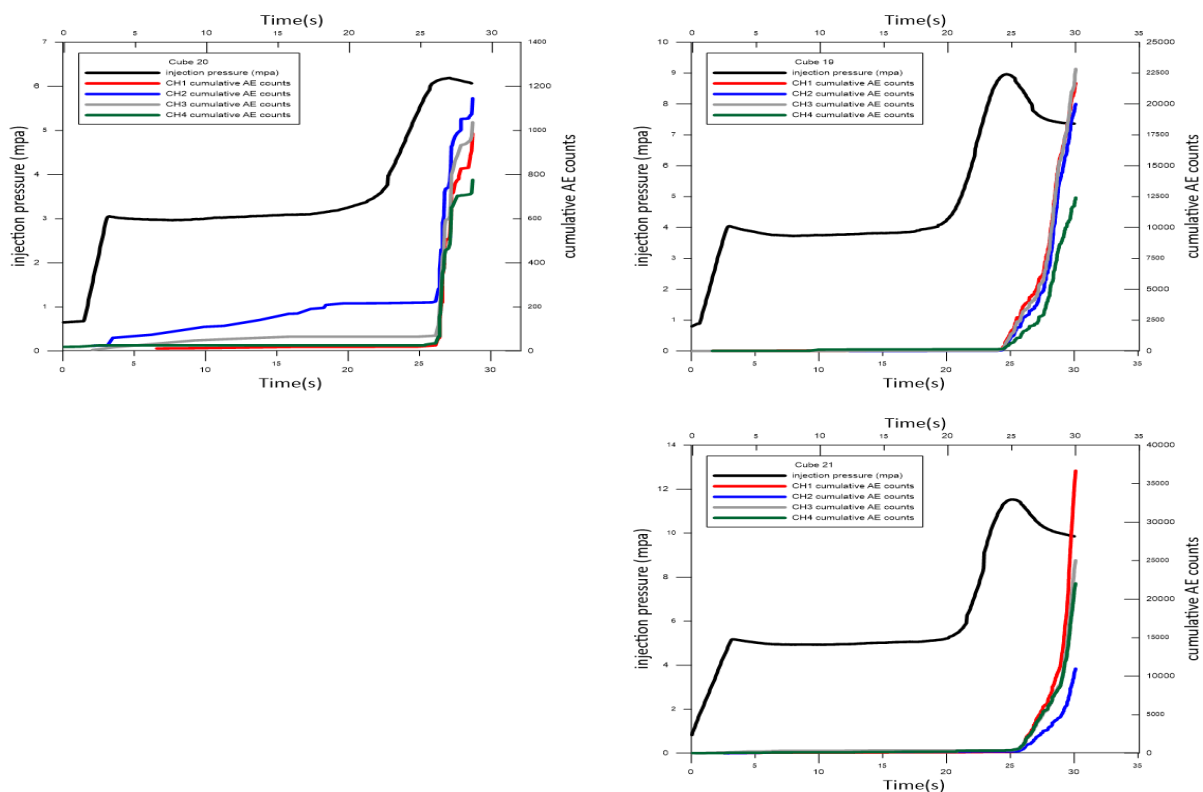
الف) نمونه‌های شکافدار

شکل ۲۵-۵) هندسه شکست هیدرولیکی، الف) نمونه‌های شکافدار ب) نمونه‌های بدون شکاف در ترکیبات تنش مشابه

با توجه به شکل ۲۵-۵، با وجود شکاف از پیش موجود هندسه شکست به کلی تغییر می‌کند به گونه‌ای که در نمونه Cube 19 که اختلاف تنش‌های جانبی صفر است، شکستگی از نوک شکاف از پیش موجود ایجاد شده و در امتداد جهت شکاف گسترش یافته است. بدیهی است که در ترکیبات تنش همسانگرد شکستگی به سمت تنش افقی حداکثر تغییر مسیر نمی‌دهد. این مورد نشان می‌دهد که شکاف از پیش موجود می‌تواند شکستگی را به طور موثر کنترل و هدایت کند و در اختلاف تنش‌های جانبی پایین، شکستگی در امتداد شکاف گسترش پیدا کرده است. در نمونه Cube 20 که اختلاف تنش‌های جانبی اعمال شده به آن ۳ MPa بوده است، مشاهده می‌شود که شکستگی‌ها در دو طرف چال از نوک شکاف از پیش موجود ایجاد شده‌اند و در همین حال یک انحراف جزئی به سمت تنش افقی حداکثر دارند. همچنین در نمونه Cube 21 هنگامی که اختلاف تنش‌های جانبی اعمال شده ۵ MPa می‌باشد، شکستگی‌ها از نوک شکاف‌های از پیش موجود ایجاد شده‌اند و در ادامه به وضوح به سمت تنش افقی حداکثر تغییر مسیر داده‌اند. بنابراین، شکاف‌های از پیش موجود یک نقطه اولیه برای انتشار شکستگی را فراهم می‌کنند و با این حال، هندسه شکستگی همراه با تغییر مقدار اختلاف تنش‌های جانبی تغییر می‌کند. این تغییر هندسه شکستگی شامل اختلاف تنش‌های جانبی پایین که فقط شکست در امتداد جهت شکاف از پیش موجود گسترش می‌یابد تا اختلاف تنش‌های جانبی بالا که باعث انحراف آشکار شکستگی به سمت تنش افقی حداکثر شده است.

۵-۴-۱) پارامتر شمارش (کانت) و انرژی AE

فعالیت انتشار آکوستیک در لحظه حداکثر فشار تزریق سیال، افزایش یافته است. بوسیله AE می‌توان نقطه شکست نمونه‌ها را تعیین و اندازه‌گیری کرد. شکل ۲۶-۵ مقدار شمارش تجمعی چهار سنسور پیزوالکتریک AE استفاده شده در آزمایش نمونه‌های شکافدار به همراه فشار تزریق سیال در طول زمان آزمایش را نشان می‌دهد.

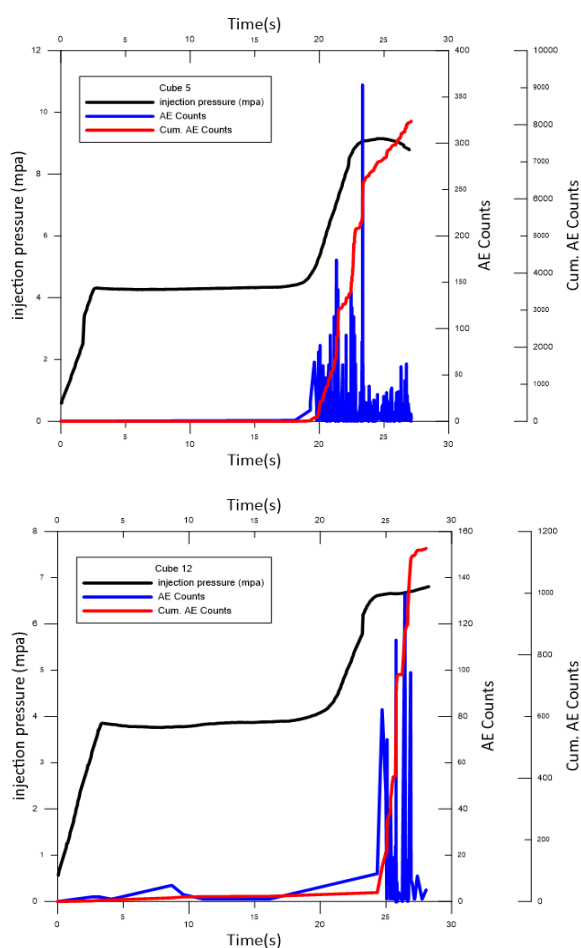


شکل ۲۶-۵) نمودار تغییرات مقدار شمارش تجمعی برای چهار سنسور و فشار تزریق سیال برای آزمایش شکست هیدرولیکی نمونه‌های شکافدار

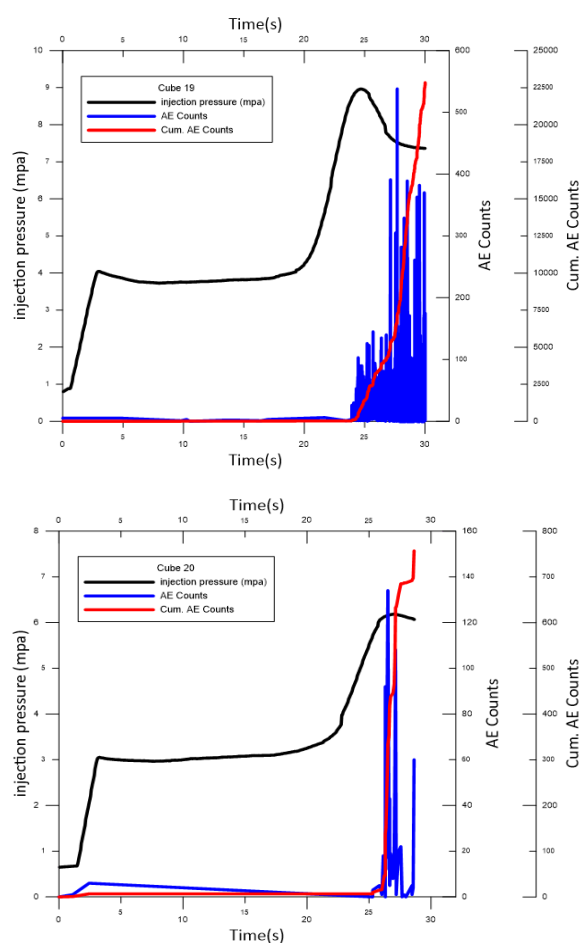
با توجه به شکل ۲۶-۵، شکستگی‌ها به هر سمتی گسترش پیدا کنند، سنسورهایی که نزدیک‌ترین فاصله را به شکستگی دارند یا شکستگی در جهت آن‌ها گسترش یافته است، بیشتر داده اندازه‌گیری را برداشت کرده‌اند. همچنین روند افزایشی شمارش تجمعی AE برای آزمایش‌ها وجود دارد که تغییرات آن برای هر چهار سنسور مشابه تغییرات فشار تزریق سیال است. در لحظه شکست نمونه‌ها فشار تزریق به مقدار حداکثر می‌رسد و همچنین مقادیر شمارش تجمعی AE به سرعت افزایش می‌یابند. با مقایسه داده‌های برداشت شده هر سنسور و با در نظر گرفتن نزدیک بودن مکان قرارگیری سنسور به شکستگی‌ها، می‌توان یک کانال AE که بهترین نتیجه را داده است، انتخاب کرد تا برای بررسی پارامترهای آکوستیک از آن استفاده شود.

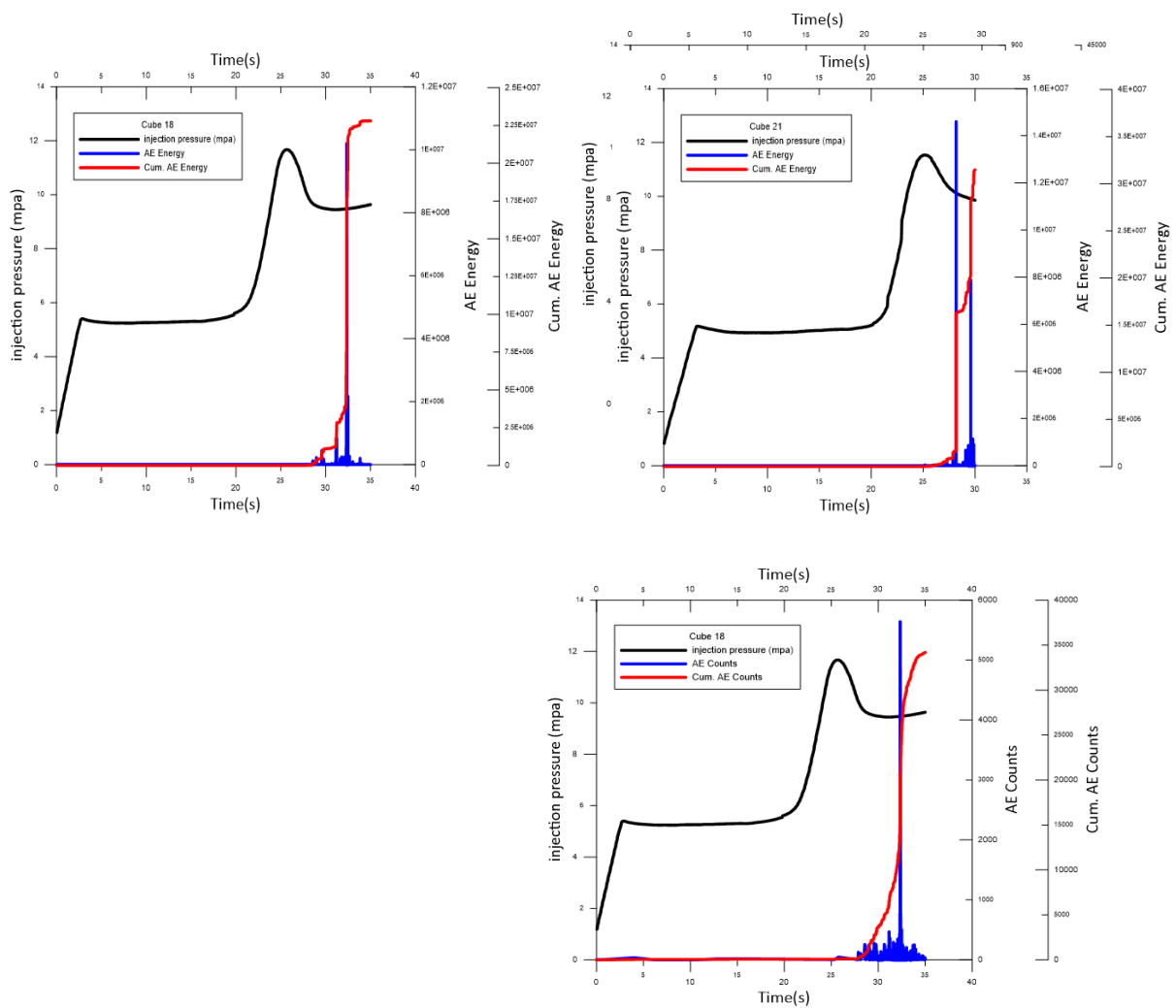
نتایج آزمایش مقدار شمارش و تجمعی شمارش AE در شکل ۲۷-۵، همچنین مقدار انرژی و تجمعی انرژی AE در شکل ۲۸-۵، همراه با فشار تزریق سیال در طول زمان آزمایش ذکر شده است. با توجه به شکل‌ها فعالیت انتشار آکوستیک در دوره اولیه تزریق سیال پایین بوده است و در ادامه پس از ایجاد ریزترک‌ها در نمونه‌ها افزایش یافته است تا لحظه‌ای که به مقدار حداکثر خود برسد و سپس کاهش بیابد. حداکثر مقدار فشار تزریق در لحظه ایجاد شکستگی از نوک شکاف از پیش موجود رخ داده است، سپس شکستگی‌ها به سرعت به سطح نمونه گسترش یافته‌اند. پس از نقطه حداکثر فشار تزریق، مقدار انرژی AE نیز کاهش می‌یابد. همچنین مقدار تجمعی انرژی AE تا زمان ایجاد شکست، متناسب با مقدار اختلاف تنش‌های جانبی است.

ب) نمونه‌های بدون شکاف

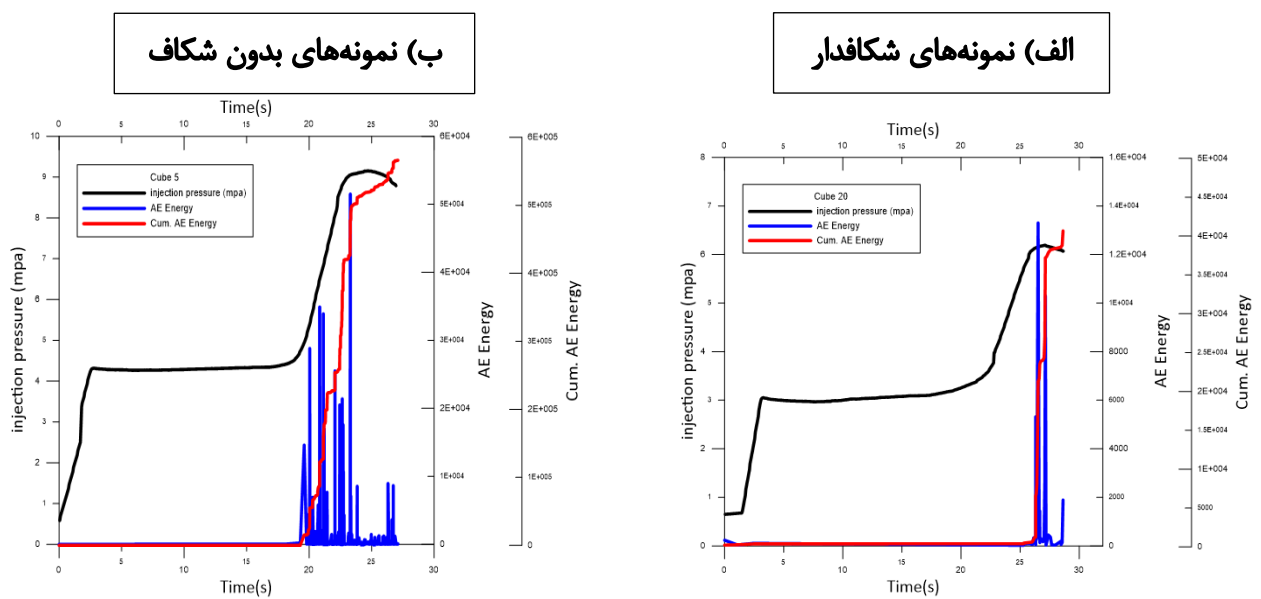


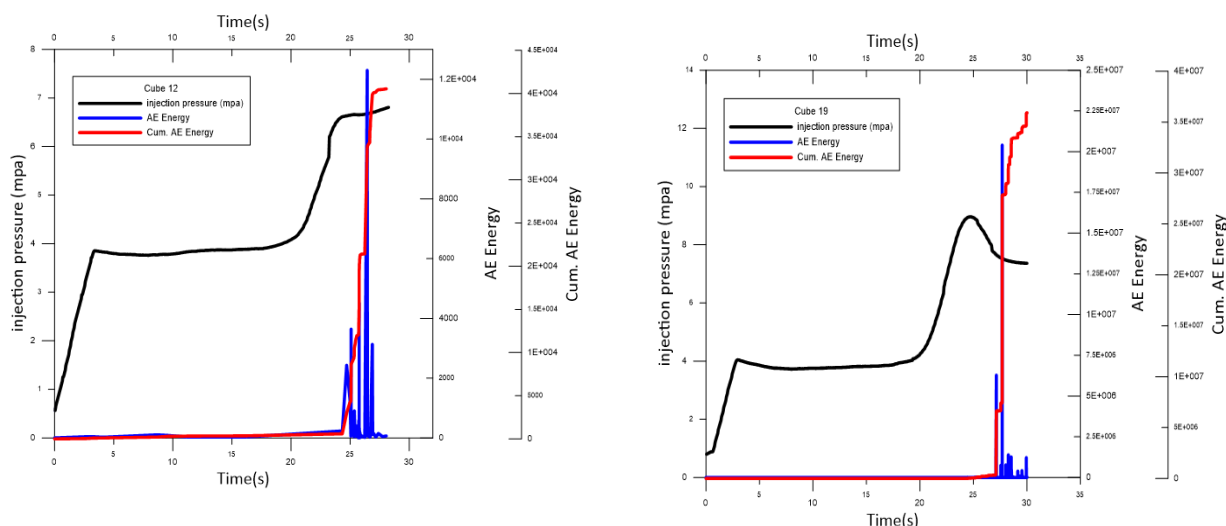
الف) نمونه‌های شکافدار





شکل ۲۷-۵) نمودار تغییرات مقدار شمارش، شمارش تجمعی و فشار تزریق سیال برای آزمایش شکست هیدرولیکی، الف) نمونه‌های شکافدار ب) نمونه‌های بدون شکاف





شکل ۲۸-۵) نمودار تغییرات مقدار انرژی، انرژی تجمعی و فشار تزریق سیال برای آزمایش شکست هیدرولیکی، الف) نمونه- های شکافدار ب) نمونه‌های بدون شکاف

مقدار انرژی AE و تجمعی انرژی AE برای ترکیب تنش همسانگرد بیشترین مقدار است. در نمونه- های دارای شکاف، مقدار انرژی بالاتر است نسبت به نمونه‌های بدون شکاف و تعداد زیادی رویداد AE و مقدار شمارش زیادی در لحظه حداکثر فشار تزریق مشاهده شده است. مقدار انرژی در شرایط مختلف تنش بسیار متفاوت می‌باشد و از آن‌جا که مقدار انرژی AE نشان دهنده سطح انرژی امواج تنش تولید شده توسط فعالیت انتشار آکوستیک است، همچنین مقدار انرژی AE مشخص کننده سطح فعالیت انتشار ترک در نمونه‌ها است. با مشاهده مقدار انرژی AE در لحظه شروع شکست، افزایش انرژی تحت اختلاف تنش جانبی کمتر در نمونه Cube 19، بیشترین مقدار را داشته است و کمترین مقدار نیز مربوط به نمونه‌های Cube 20 و Cube 21 می‌باشد که اختلاف تنش‌های جانبی بالاتر بوده است.

با توجه به بحث بالا، سطح انرژی امواج تنش تحت اختلاف تنش‌های جانبی صفر، بالاترین مقدار بوده و در اختلاف تنش‌های جانبی بالا، سطح انرژی کاهش شدیدی داشته است. مقدار تجمعی انرژی AE تا زمان شروع شکستگی همراه با فشار تزریق سیال افزایش می‌یابد. هر چقدر مقدار اختلاف تنش‌های جانبی بالاتر باشد، رویدادهای انتشار آکوستیک تولید شده توسط انتشار شکستگی کمتر فعالیت می‌کنند. به این ترتیب کار انجام شده و قدرت امواج تنش آزاد شده کاهش می‌یابد و همچنین انرژی رویدادهای AE و

حداکثر فشار تزریق کاهش می‌یابد. مقدار انرژی تجمعی AE در طول زمان آزمایش قبل از حداکثر فشار تزریق، انرژی لازم برای ایجاد شکست را نشان می‌دهد و مقدار انرژی AE نیز نشان دهنده قدرت امواج تنش تولید شده است. دلیل کاهش انرژی در نمونه‌های با ترکیبات تنش ناهمسانگرد انحراف شکستگی است که باعث کاهش انرژی در فرایند شکست هیدرولیکی می‌شود و نتیجه کار انجام شده در طول مسیر انتشار شکستگی به جای غلبه بر محدودیت تنش افقی حداکثر عمدتاً صرف غلبه بر مقاومت بلورها و دانه‌های داخل نمونه‌ها شده است.

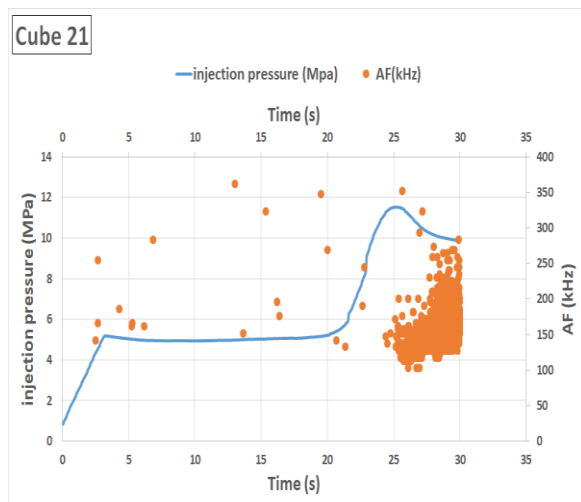
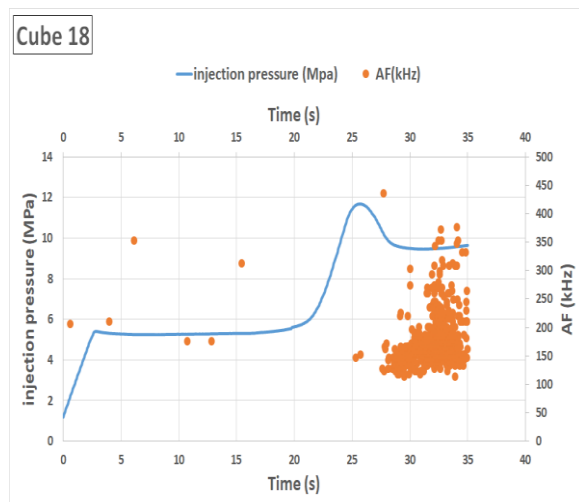
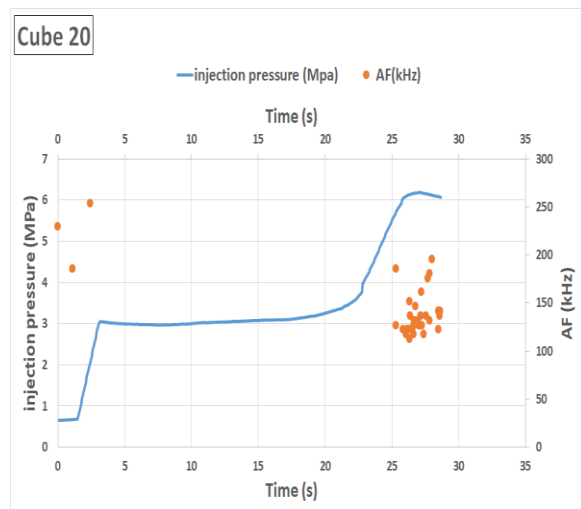
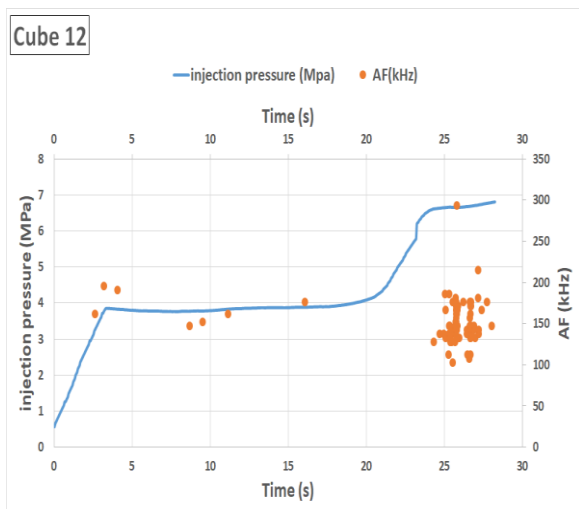
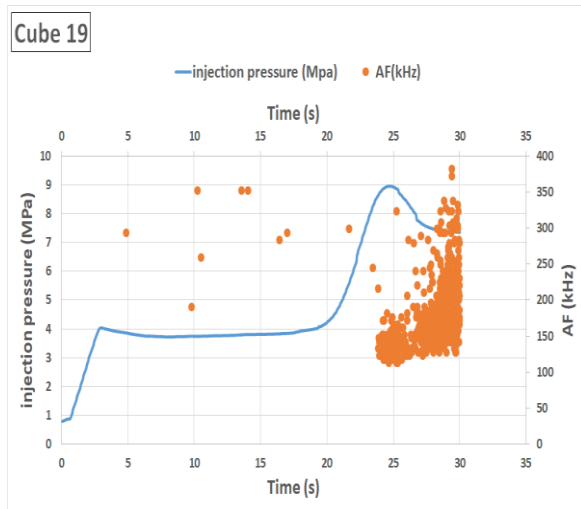
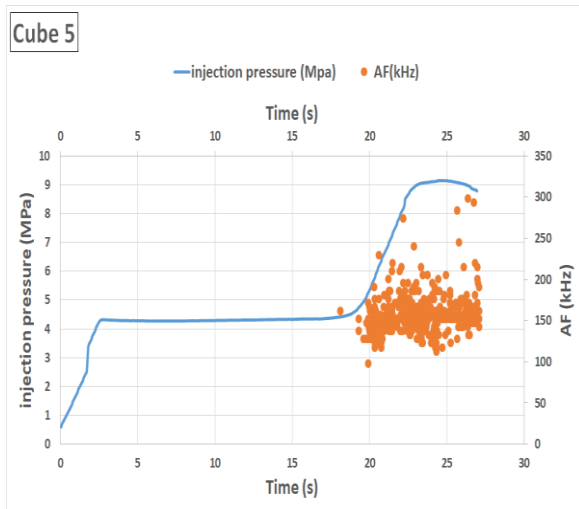
تغییرات مقدار شمارش AE در مرحله اول تزریق سیال به بسته شدن ریزترک‌ها و تشکیل آن‌ها در مرز ذرات ساختار نمونه‌ها اشاره دارد، که با بوجود آمدن ترک‌های ناپایدار و اتصال ترک‌های موجود باعث افزایش شدید شمارش می‌شوند. افزایش فشار تزریق تا مقدار حداکثر نشان می‌دهد ترک از نوک شکاف از پیش موجود شروع شده و باعث می‌شود سنگ دانه‌های نمونه‌های بتنی از هم جدا شده و باعث ایجاد شکست در نمونه شود و افزایش ناگهانی در مقدار سیگنال‌های AE و شمارش AE مشاهده شده است. بعد از نشت سیال و کاهش مقدار فشار تزریق، مقدار شمارش AE نیز کاهش می‌یابد.

در مقایسه بین نمونه‌های شکافدار و بدون شکاف مقدار تجمعی شمارش AE در نمونه‌های شکافدار بیشتر است و با سرعت بیشتری در لحظه حداکثر فشار تزریق، افزایش می‌یابد. دلیل این مورد می‌تواند در اثر وجود شکاف از پیش موجود باشد که باعث انحراف ترک می‌شود و این منحرف شدن ترک باعث می‌شود کار بیشتری در نمونه‌ها انجام شود و به دنبال آن سیگنال‌های AE بیشتری دریافت شود. همچنین وجود شکاف از پیش موجود که نقش یک سطح آزاد اولیه برای ایجاد شکست دارد، باعث می‌شود قبل از شکست رویدادهای کوچک AE در اثر ایجاد ریزترک‌ها بیشتر شود و باعث افزایش مقدار تجمعی شمارش AE در نمونه‌های شکافدار شود. این رویدادهای کوچک با انرژی کمتری همراه هستند، ولی به دلیل تعداد زیاد آن‌ها باعث افزایش مقدار تجمعی انرژی AE نمونه‌های شکافدار نسبت به نمونه‌های بدون شکاف شده است.

۵-۴-۲) فرکانس متوسط، زاویه خیز و طبقه بندی نوع ترک‌ها

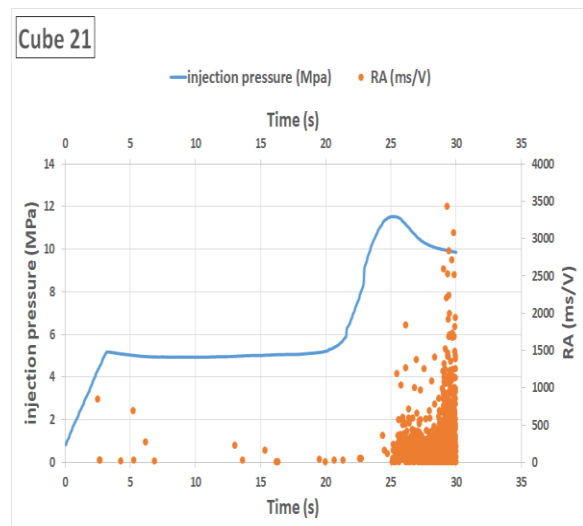
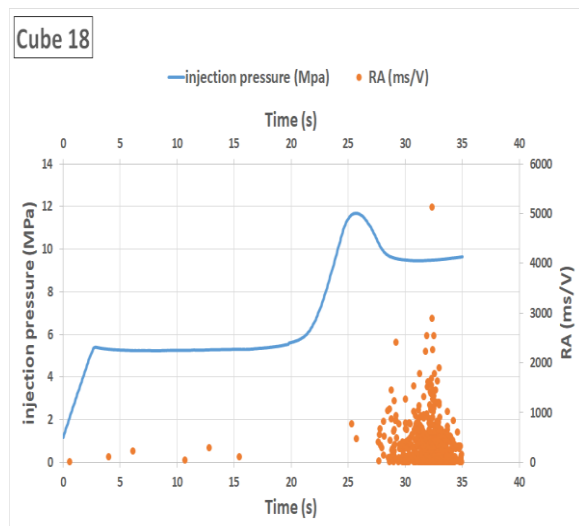
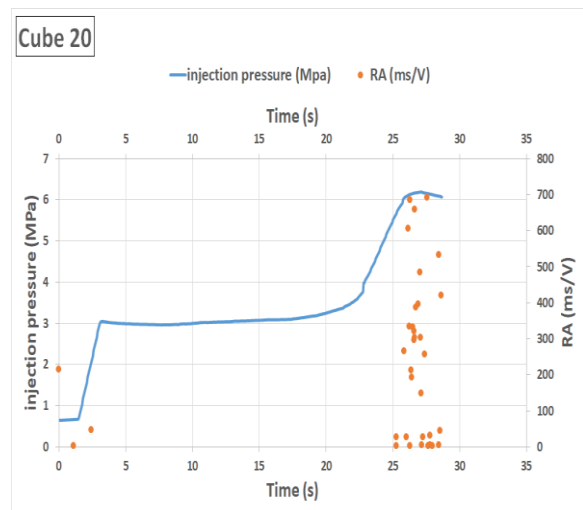
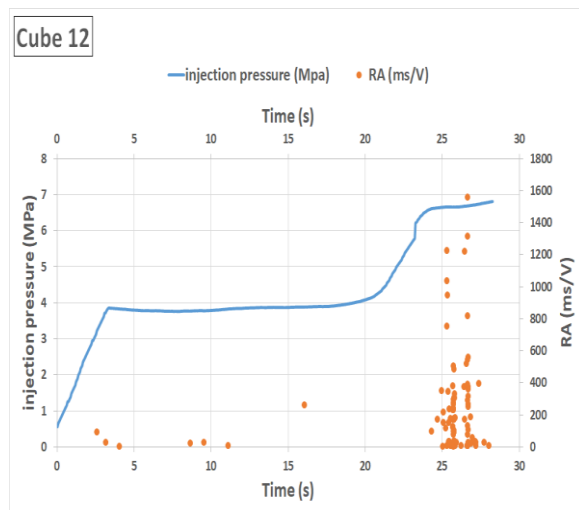
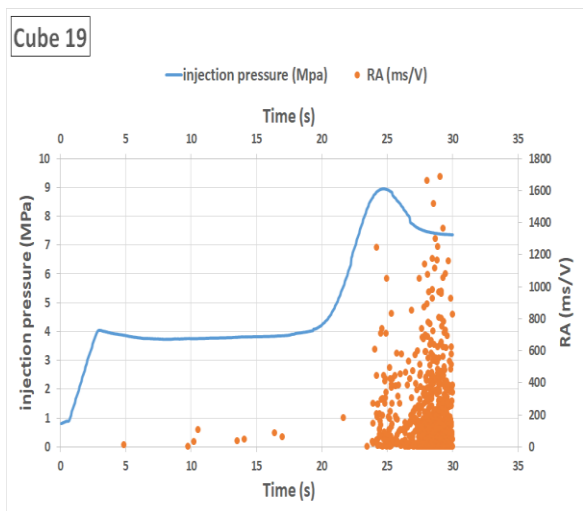
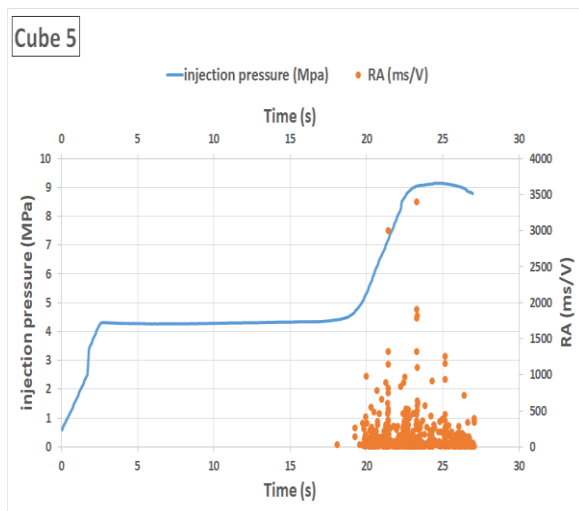
فرکانس متوسط (AF) و زاویه خیز (RA) نمونه‌های شکافدار در کنار نمونه‌های بدون شکاف به ترتیب در شکل ۵-۲۹ و ۵-۳۰ به همراه فشار تزریق سیال در طول زمان آزمایش نشان داده شده است.

ب) نمونه‌های بدون شکاف



شکل ۲۹-۵) نمودار تغییرات مقدار فرکانس متوسط و فشار تزریق سیال برای آزمایش شکست هیدرولیکی، الف) نمونه‌های شکافدار ب) نمونه‌های بدون شکاف

ب) نمونه‌های بدون شکاف

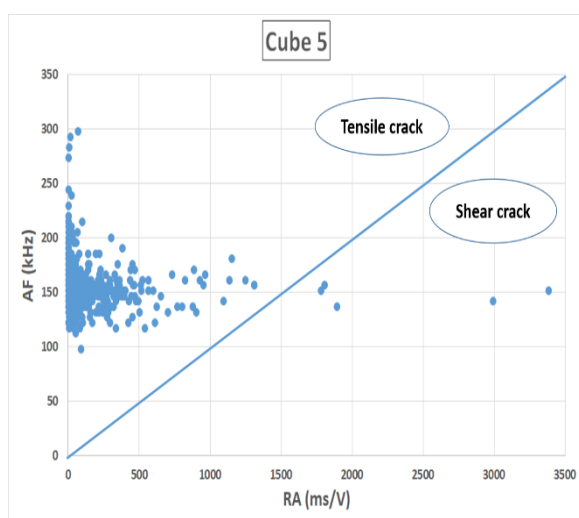


شکل ۳۰-۵) نمودار تغییرات مقدار زاویه خیز و فشار تزریق سیال برای آزمایش شکست هیدرولیکی، الف) نمونه‌های شکافدار
ب) نمونه‌های بدون شکاف

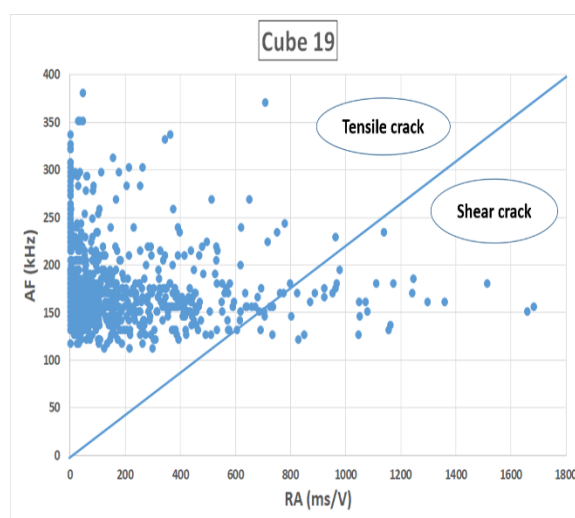
به طور کلی RA در مرحله اول شکستگی که در اثر تزریق سیال باعث توسعه ریزترکها شده است، کاهش می‌یابد و در همین مرحله AF افزایش می‌یابد. بعد از این مرحله RA افزایش می‌یابد و AF کاهش می‌یابد تا پایان مرحله دوم که شامل ایجاد ماکروترکها در اثر تزریق سیال می‌باشد این روند باقی می‌ماند. در مرحله آخر لحظه‌ای که فشار تزریق نقطه حداکثر خود را سپری کرده است، سیال نشت می‌کند و باعث افت فشار تزریق می‌شود، نمونه به شکست می‌رسد و ماکروترکها در حال باز شدن از یکدیگر هستند. در این مرحله RA کاهش می‌یابد ولی AF در این لحظه افزایش می‌یابد.

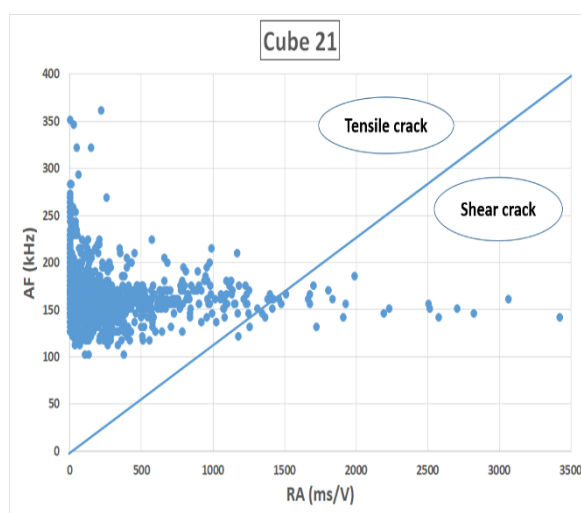
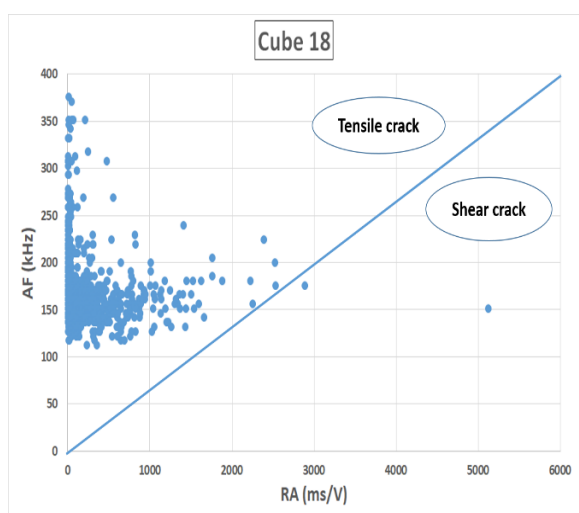
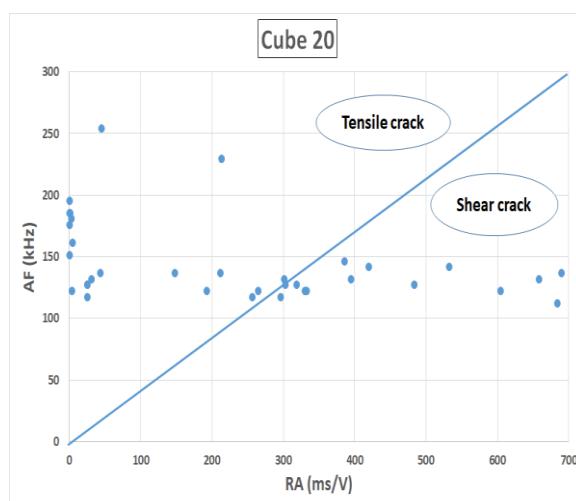
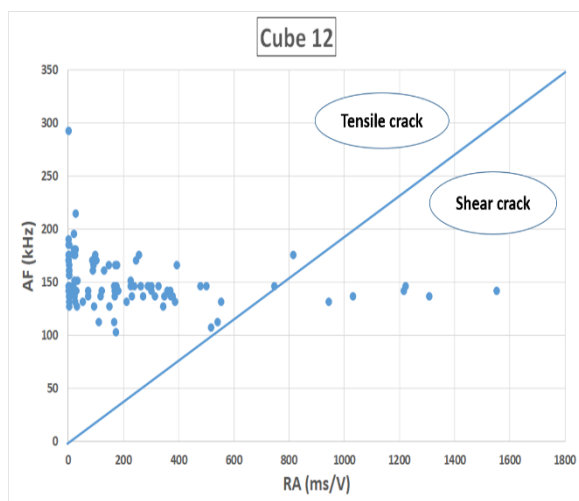
مقدار فرکانس متوسط برای نمونه‌های شکافدار و بدون شکاف تفاوت زیادی ندارد ولی همچنان می‌توان مشاهده کرد که فرکانس متوسط برای نمونه‌های بدون شکاف بالاتر از نمونه‌های شکافدار است. RA این گونه نیست و به وضوح مشاهده می‌شود که RA نمونه‌های بدون شکاف در سطح بالاتری نسبت به نمونه‌های شکافدار قرار دارد. در طول زمان تزریق سیال ترکهای کششی و برشی در نمونه‌های شکافدار بیشتر از نمونه‌های بدون شکاف است. همچنین ترکهای برشی بیشتری در نمونه‌های شکافدار ایجاد شده است. با توجه به این دو پارامتر مختلف، می‌توان ترکها را به ترکهای کششی و برشی طبقه بندی کرد. شکل ۳۱-۵ طبقه بندی نوع ترکها بر اساس AF-RA را نشان می‌دهد.

ب) نمونه‌های بدون شکاف



الف) نمونه‌های شکافدار





شکل ۳۱-۵) طبقه بندی نوع ترک‌ها برای آزمایش شکست هیدرولیکی، الف) نمونه‌های شکافدار ب) نمونه‌های بدون شکاف

شکست در طی فرایند شکست هیدرولیکی دارای دو مدل ترک است، ترک کششی و ترک برشی که انرژی AE در ترک‌های برشی معمولاً بیشتر از ترک‌های کششی است. در نمونه‌های شکافدار هنگامی که فشار تزریق به مقدار حداکثر خود می‌رسد، شکست از نوک شکاف از پیش موجود شروع شده و سپس در مدت زمان کوتاهی به سطح نمونه گسترش می‌یابد. پس از تجزیه و تحلیل ویژگی‌های مدل شکست و رویدادهای AE، مقدار درصد رویدادهای ترک برشی در لحظه شروع شکست برای نمونه‌های شکافدار به ترتیب به صورت $\text{Cube 19} > \text{Cube 21} > \text{Cube 20}$ می‌باشد و مقدار انرژی تجمعی AE رویدادهای برشی نیز به ترتیب برای نمونه‌های شکافدار $\text{Cube 19} > \text{Cube 21} > \text{Cube 20}$ می‌باشد.

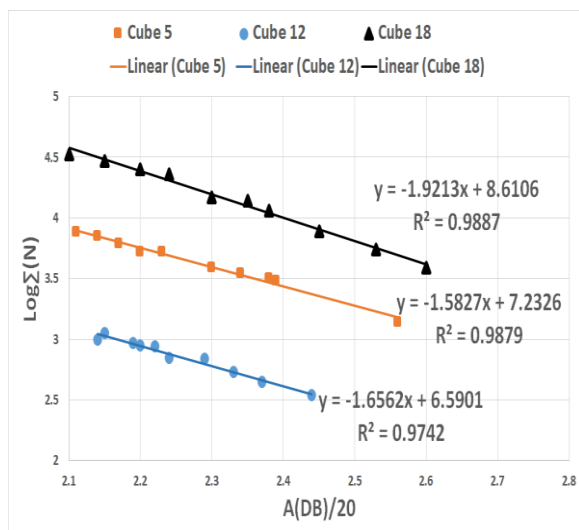
مقاومت کششی تاثیر زیادی در فشار شکست هیدرولیکی دارد و برای نمونه‌ها به طور متوسط برابر $\frac{3}{2}$ مگاپاسکال می‌باشد. اگر این مقدار به عنوان مقدار مبنا در نظر گرفته شود، هنگامی که اختلاف تنش-های جانبی کمتر یا بیشتر از این مقدار باشند، مسیرهای انتشار ترک نامنظم‌تر می‌باشد و درصد رویدادهای ترک برشی نیز بیشتر شده است. نسبت انرژی ترک‌های برشی بیش از ۵۰ درصد بوده است و بیشترین قسمت انرژی شکل‌های موج تنش تولید شده توسط انتشار ترک را به خود اختصاص داده است. دلیل این که در نمونه‌های شکافدار ترک برشی بیشتری ایجاد شده است و به دنبال آن دارای انرژی تجمعی AE بالاتری می‌باشند، می‌تواند به انحراف ترک مربوط باشد که باعث افزایش درصد رویدادهای ترک برشی می‌شود که هر چه هندسه شکست نامنظم‌تر باشد، درصد وقوع ترک‌های برشی افزایش می‌یابد.

با توجه به هندسه شکستگی‌ها و طبقه‌بندی نوع ترک‌ها بر اساس روش RA-AF مدل اصلی شکست، ترک‌های کششی هستند که در طول فرایند تزریق سیال ایجاد شده‌اند. ترک‌های برشی باعث انحراف شکستگی می‌شوند و معمولاً نامنظم هستند، اما با انحراف شکستگی کار انجام شده در امتداد مسیر شکست کاهش یافته است. بنابراین شکست برشی در حین گسترش شکستگی در نتیجه انتخاب بهترین مسیرهای گسترش ایجاد می‌شوند. شکست برشی می‌تواند شرایط مناسب را برای گسترش شکست‌های بعدی ایجاد کند، همچنین می‌توان در فرایند شکست با انتخاب زاویه مناسب بین شکاف‌های از پیش موجود و تنش افقی حداکثر با استفاده از ترک‌های برشی، ترک‌های مناسب در اطراف حفره تزریق در فرایند شکست هیدرولیکی ایجاد کرد.

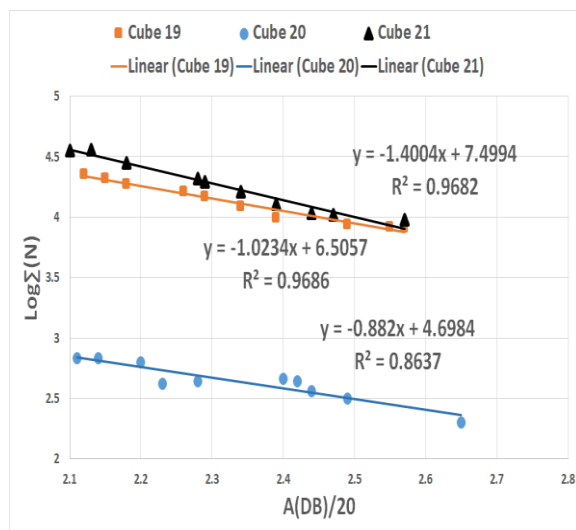
۵-۴-۳) تحلیل b-value و Ib-value

مقادیر b-value برای نمونه‌های شکافدار در مقابل نمونه‌های بدون شکاف در شکل ۳۲-۵ ذکر شده است. همچنین مقادیر Ib-value به همراه فشار تزریق سیال در طول زمان آزمایش در شکل ۳۳-۵ برای نمونه‌های بدون شکاف و شکافدار نشان داده شده است.

ب) نمونه‌های بدون شکاف

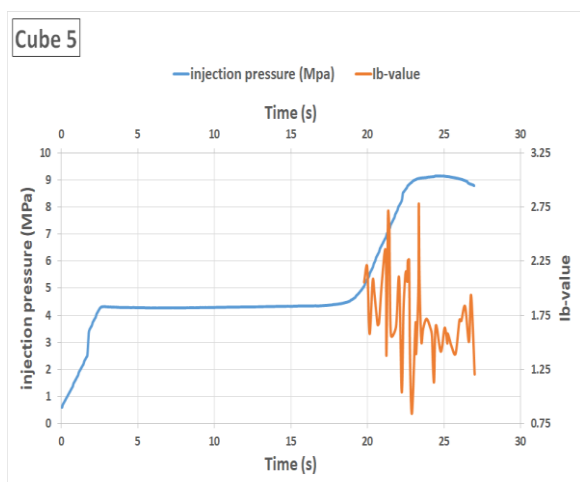


الف) نمونه‌های شکافدار

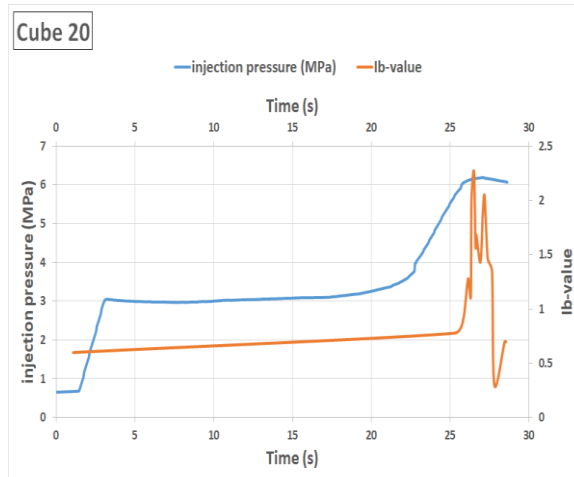
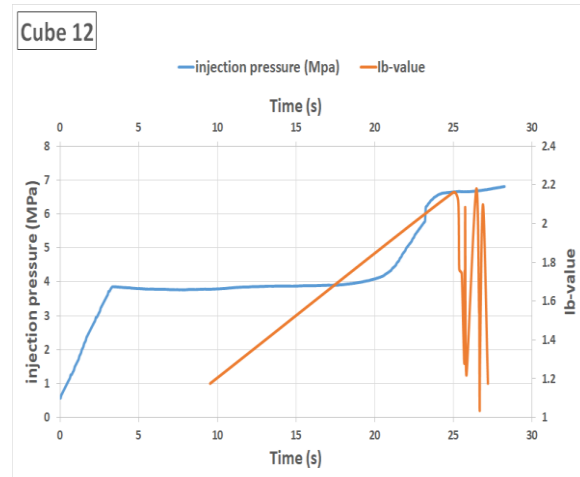
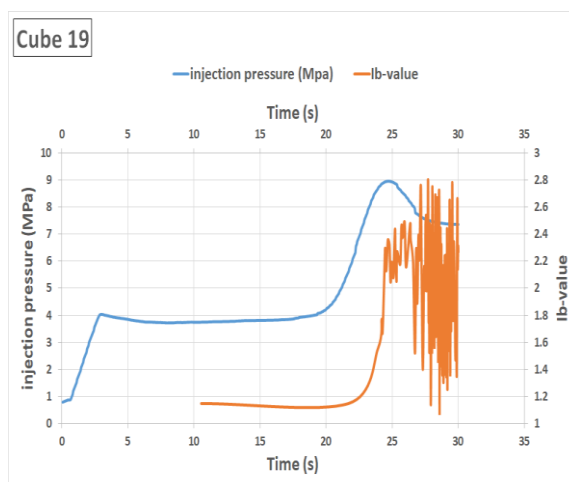


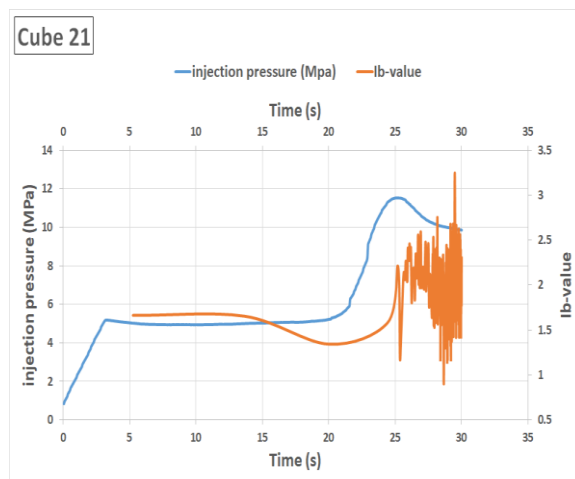
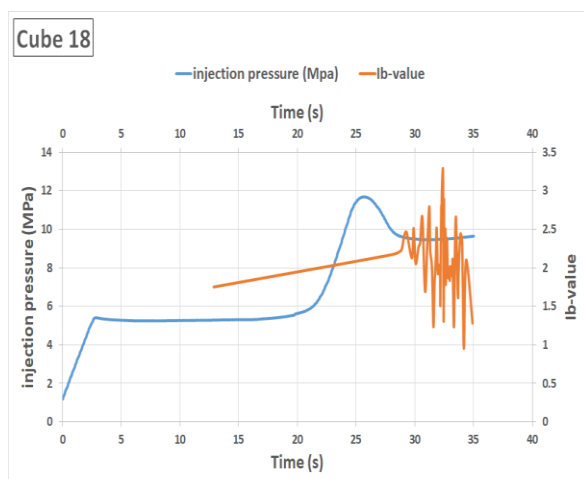
شکل ۳۲-۵) مقادیر b-value برای آزمایش شکست هیدرولیکی، الف) نمونه‌های شکافدار ب) نمونه‌های بدون شکاف

ب) نمونه‌های بدون شکاف



الف) نمونه‌های شکافدار





شکل ۳۳-۵) نمودار تغییرات مقدار Ib-value و فشار تزریق سیال برای آزمایش شکست هیدرولیکی، الف) نمونه‌های شکافدار
ب) نمونه‌های بدون شکاف

دامنه حداکثر AE مربوط به بزرگی ترک‌های ایجاد شده در حین شکستگی است. ریزترک‌ها رویدادهای AE با دامنه پایین ایجاد می‌کنند، در حالی که ماکروترک‌ها رویدادهای AE با دامنه بالاتر ایجاد می‌کنند. برای تعیین شکستگی کلی بر اساس دامنه حداکثر، از مقدار b-value استفاده می‌شود و به عنوان مقدار مطلق شیب توزیع تجمعی دامنه رویدادهای AE تعریف می‌شود. نمودارهای رسم شده معیار گتنبِرگ-ریشتر در شکل ۳۲-۵ نشان می‌دهند که عرض از مبدا خطوط برای نمونه‌های شکافدار کمتر از نمونه‌های بدون شکاف می‌باشد. عرض از مبدا خطوط نشان دهنده تعداد رخدادهایی است که به سیگنال AE منتهی شده‌اند. بنابراین نمونه‌های شکافدار تعداد رخدادهای منتهی به سیگنال AE کمتری نسبت به نمونه‌های بدون شکاف دارند. در اثر وجود شکاف‌های از پیش موجود، شکنندگی نمونه‌های شکافدار کمتر شده است و این به دلیل ریزترک‌هایی است که در اثر ایجاد شکاف‌های از پیش موجود ایجاد شده‌اند و رخدادهای AE را در طول آزمایش کاهش داده‌اند. شیب خطوط برای نمونه‌های شکافدار کمتر از نمونه‌های بدون شکاف است. پایین بودن b-value نمونه‌های شکافدار نشان می‌دهد که ریزترک‌های بیشتری در این نمونه‌ها بوجود آمده است. ریزترک‌ها دارای انرژی کمتری هستند ولی تعداد زیاد آن‌ها باعث بالا بودن انرژی تجمعی AE در نمونه‌های شکافدار می‌شود. در نمونه‌های شکافدار ماکروترک‌های کمتری نسبت به نمونه‌های بدون شکاف بوجود آمده است و احتمال بوجود آمدن حوادث قوی و شکست‌های شکننده کمتر است.

شکاف از پیش موجود فشار شکست نمونه‌ها را کاهش داده و هندسه شکست نمونه‌های شکافدار با نمونه‌های بدون شکاف کاملاً متفاوت است. برای نمونه‌های بدون شکاف فرایند شکستگی تحت تاثیر رویدادهای ریزترک قبل از حداکثر فشار تزریق است و شکست شکننده به طور ناگهانی در لحظه حداکثر فشار تزریق رخ داده است. برای نمونه‌های شکافدار ریزترک‌ها از مراحل ابتدایی تزریق سیال شروع شده و در لحظه شکست، ماکروترک‌ها ایجاد می‌شوند که منجر به آزاد شدن انرژی کرنش ذخیره شده و کاهش فشار شکست شده‌اند. قبل از حداکثر فشار تزریق سیال، ترک کششی بر میدان تنش در نمونه‌ها غالب است و در لحظه حداکثر فشار تزریق ترک‌های برشی در نمونه‌ها افزایش می‌یابند تا زمانی که شکست نمونه رخ بدهد و ترک برشی در شکست نمونه‌ها تاثیر زیادی دارد. قبل از ایجاد ماکروترک‌ها در نمونه‌ها، رویدادهای AE با دامنه‌های پایین وجود دارد و مقدار b-value نسبتاً بالا است. هنگامی که ماکروترک رخ می‌دهد، رویدادهای AE با دامنه بالا و b-value پایین ظاهر می‌شوند و انرژی کرنش ذخیره شده آزاد می‌شود که منجر به انتشار امواج الاستیک با دامنه‌های بالا و مقدار b-value پایین شده است. در نمونه‌های بدون شکاف زمانی که فشار تزریق به مقدار حداکثر می‌رسد، رویدادهای ترک خوردگی ماکرو با آزاد شدن سریع انرژی ذخیره شده رخ می‌دهند و مقدار b-value به شدت کاهش می‌یابد. شکاف از پیش موجود در دیواره حفره مرکزی نمونه‌های شکافدار به شدت بر فرایند تغییرات b-value تاثیر می‌گذارد. مقدار b-value بر اساس پارامترهای AE می‌تواند برای پیش بینی رویدادهای بزرگ مقیاس در طول فرایند شکست هیدرولیکی نمونه‌های شکافدار استفاده شود.

اگر شکستگی‌های کوچک مقیاس بر شکستگی‌های بزرگ مقیاس برتری داشته باشند، مقدار I_b -value افزایش می‌یابد، در مقابل اگر شکستگی‌های بزرگ مقیاس نسبت به شکستگی‌های کوچک مقیاس برتری داشته باشند، مقدار I_b -value کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۳۳-۵، مقدار I_b -value در نزدیکی حداکثر فشار تزریق کاهش می‌یابد و سپس در ناحیه پس از نقطه حداکثر فشار تزریق به شدت نوسان می‌کند. بنابراین شکستگی در مقیاس کوچک با فرکانس‌های بالا عمدتاً تا نقطه حداکثر فشار تزریق ایجاد می‌شود، سپس شکستگی‌های مقیاس بزرگ با فرکانس پایین‌تر در نزدیکی حداکثر فشار تزریق ایجاد می‌شوند.

مقدار Ib-value برای نمونه‌های شکافدار در زمان کمتری فعال شده است و در مراحل اولیه تزریق سیال Ib-value شروع شده است. برای نمونه‌های بدون شکاف Ib-value در مراحل میانی تزریق سیال شروع به فعالیت کرده است که دلیل آن می‌تواند حضور ریزترک‌ها باشد که در نمونه‌های شکافدار به دلیل وجود شکاف از پیش موجود به محض شروع تزریق سیال ریزترک‌هایی در نمونه‌ها ایجاد شده و باعث شروع نوسان Ib-value شده‌اند. برای نمونه‌های شکافدار زودتر شروع به نوسان کرده است، ولی نوسانات آن برای نمونه‌های بدون شکاف بالاتر است و نوسانات زیادتر Ib-value برای نمونه‌های بدون شکاف انفجار ناگهانی رشد ترک را نسبت به نمونه‌های شکافدار نشان داده است. در نمونه‌های شکافدار، شکاف از پیش موجود با حذف تمرکز تنش اطراف چال و ایجاد ریزترک‌های بیشتر باعث می‌شود Ib-value به طور پیوسته-تری نوسان کند و نسبت رویدادهای AE کوچک و بزرگ در سطح پایدارتری حفظ شوند.

۵-۵) جمع بندی

در این بخش، آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت شرایط تنش سه محوره واقعی در ترکیبات تنش متفاوت به همراه رفتارنگاری انتشار آکوستیک انجام شده است. با افزایش تنش افقی حداقل، فشار شکست افزایش یافته و با افزایش تنش قائم و تنش افقی حداکثر، فشار شکست یک روند افزایشی و کاهشی نشان می‌دهد. با افزایش تنش قائم و تنش افقی حداکثر، ترک‌های شاخه‌ای در نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در ترکیبات تنش همسانگرد هندسه شکست تصادفی و شعاعی است و در ترکیبات تنش ناهمسانگرد شکست در راستای تنش افقی حداکثر رشد کرده است. از نتایج آزمایش‌های نمونه‌های شکافدار می‌توان پی برد که شکاف از پیش موجود، فشار شکست نمونه‌ها را کاهش داده و مقدار اختلاف تنش افقی، مسیر انتشار ترک را در طول آزمایش شکست هیدرولیکی تحت تاثیر قرار داده است. ترک‌های برشی باعث هندسه شکست نامنظم می‌شوند، انحراف شکست باعث افزایش ترک برشی شده است. این نتایج می‌تواند به درک مناسب‌تر انحراف شکستگی در فرایند شکست هیدرولیکی کمک کند، و ترک‌های جهت‌دار می‌توانند در اطراف حفره با کارایی بیشتر ایجاد شوند. رفتارنگاری انتشار آکوستیک در طول آزمایش‌های شکست هیدرولیکی پاسخ

بسیار مناسبی داده است. رخدادهای انتشار آکوستیک در لحظه شکست نمونه‌ها و حداکثر فشار تزریق افزایش یافته است و در فرایند شکست هیدرولیکی بیشتر ترک‌های کششی ایجاد شده است.

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۶-۱) نتیجه گیری

در این تحقیق، با هدف بررسی آزمایشگاهی توسعه ترک خوردگی در آزمایش شکست هیدرولیکی با استفاده از انتشار آکوستیک، آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت شرایط تنش سه محوره واقعی در ترکیبات تنش متفاوت و همچنین برای نمونه‌های دارای شکاف از پیش موجود به همراه رفتارنگاری انتشار آکوستیک انجام شده است. همچنین، آزمون‌های اولیه تعیین ویژگی‌های نمونه آزمایش با رفتارنگاری انتشار آکوستیک همراه بوده است. در ادامه اهم نتایج این تحقیق بیان شده است.

۶-۱-۱) آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوره و کششی برزیلی

۱) ترک‌های کوچک مقیاس با دامنه کم در آزمایش‌های برزیلی بیشتر رخ داده است. مقدار b -value بر اساس پارامترهای AE می‌تواند برای پیش‌بینی وقوع آسیب در مقیاس بزرگ در طول فرایند شکست در نمونه‌ها استفاده شود. هنگامی که فرایند توسعه ترک به گسیختگی نمونه نزدیکی می‌شود، مقدار Ib -value به حداقل مقدار خود می‌رسد. تغییرات Ib -value نشان دهنده تغییرات شدید در رشد ترک و کاهش مقدار ناگهانی آن نشان دهنده وقوع رویدادهای ترک خوردگی بزرگ است.

۲) فعالیت‌های AE برای نمونه‌های تحت آزمایش برزیلی در مرحله قبل از شکست (مرحله توسعه ریزترک‌ها)، در مقایسه با نمونه‌های تحت آزمایش فشاری تک محوره بسیار کمتر بوده است.

۶-۱-۲) آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت ترکیبات تنش متفاوت

۱) با افزایش تنش افقی حداقل، فشار شکست افزایش می‌یابد و با افزایش تنش قائم و تنش افقی حداکثر، فشار شکست یک روند افزایش و کاهشی نشان می‌دهد. شکستگی ایجاد شده به صورت قائم است و در ترکیبات تنش ناهمسانگرد افقی، در راستای تنش افقی حداکثر و در ترکیبات تنش همسانگرد، به صورت تصادفی شعاعی ایجاد شده است. تاثیر تنش‌های جانبی بر روی فشار شکست به خصوص تنش افقی حداقل، نسبت به تاثیر تنش قائم بر روی فشار شکست بیشتر است. افزایش تنش قائم ترک‌های شاخه‌ای ایجاد کرده

و راستای اولیه گسترش ترک را تغییر می‌دهد، ولی در ادامه گسترش ترک به تدریج در راستای تنش افقی حداکثر قرار می‌گیرد. افزایش تنش افقی حداکثر، ترک‌های شاخه‌ای با طول کم را افزایش می‌دهد و باعث می‌شود شکست در راستای تنش افقی حداکثر رشد کند. کاهش اختلاف میان تنش‌های جانبی، هندسه شکست را پیچیده کرده و ریزترک‌ها و ترک‌های شاخه‌ای با طول کم در نمونه‌ها ایجاد می‌کند.

۲) هنگامی که نوسان فشار تزریق شدیدتر و افزایش شمارش AE سریع‌تر باشد، اندازه ترک ایجاد شده بزرگتر و رشد ناگهانی آن نشان‌دهنده ترک‌هایی در مقیاس بزرگ است. سطح انرژی امواج تنش تحت اختلاف تنش جانبی کم، بیشترین بوده و هر چه مقدار اختلاف تنش جانبی بیشتر باشد، قدرت انرژی رویدادهای AE و حداکثر فشار تزریق سیال کاهش یافته است.

۳) ترک‌های کششی در تمامی آزمایش‌ها عامل ایجاد شکستگی بوده است و با افزایش تنش‌های جانبی، ترک‌های کششی بیشتری تولید شده است. نوع ترک‌های برشی بیشترین قسمت انرژی شکل‌های موج تنش تولید شده انتشار ترک را به خود اختصاص می‌دهند.

۴) در حالت ناهمسانگرد تنش‌ها رخدادهایی با انرژی کمتر در اثر ترک‌های کوچک مقیاس با دامنه کم تولید شده است. Ib-value برای نمونه‌ها با ترکیبات تنش همسانگرد به طور مداوم‌تری در نوسان است و رویدادهای AE بزرگ و کوچک در سطح پایدارتری نسبت به نمونه‌ها با ترکیبات تنش ناهمسانگرد قرار دارند که در این نمونه‌ها Ib-value بالا است و انفجار ناگهانی رشد ترک وجود دارد.

۶-۱-۳) آزمایش‌های شکست هیدرولیکی نمونه‌های دارای شکاف از پیش موجود

۱) شکاف از پیش موجود در نمونه‌های شکافدار فشار شکست نمونه‌ها را کاهش داده و مقدار اختلاف تنش‌های جانبی به وضوح مسیر گسترش ترک را در طول آزمایش شکست هیدرولیکی تحت تاثیر قرار داده است.

۲) در نمونه‌های دارای شکاف، مقدار انرژی AE نسبت به نمونه‌های بدون شکاف بالاتر است و تعداد زیادی رویداد AE و مقدار شمارش زیادی در لحظه حداکثر فشار تزریق مشاهده شده است. شکاف از پیش

موجود باعث انحراف ترک شده و این انحراف ترک باعث افزایش کار انجام شده در نمونه‌ها می‌شود و به دنبال آن سیگنال‌های AE بیشتری دریافت شده است.

۳) در طول زمان تزریق سیال ترک‌های کششی و برشی در نمونه‌های شکافدار بیشتر از نمونه‌های بدون شکاف است. ترک‌های برشی بیشتری در نمونه‌های شکافدار ایجاد شده است و به دنبال آن دارای انرژی تجمعی AE بالاتری هستند و دلیل آن انحراف ترک و شکست نامنظم در این نمونه‌ها است.

۴) b-value برای نمونه‌های شکافدار پایین‌تر است و ریزترک‌های بیشتری در این نمونه‌ها بوجود آمده و احتمال حوادث قوی و شکست‌های شکننده کمتر است. در نمونه‌های شکافدار، شکاف از پیش موجود با حذف تمرکز تنش اطراف چال و ایجاد ریزترک‌های بیشتر، باعث نوسان پیوسته‌تر Ib-value می‌شود و برخلاف نمونه‌های بدون شکاف که انفجار ناگهانی رشد ترک بیشتر است، در نمونه‌های شکافدار نسبت رویدادهای AE کوچک و بزرگ در سطح پایداری قرار دارند.

۶-۲) پیشنهادها

۱) پارامترهای دیگری مانند نرخ جریان سیال تزریق، مشبک کاری، دانه‌بندی نمونه‌ها و درجه حرارت به همراه رفتارنگاری انتشار آکوستیک بررسی شوند و تاثیر آن‌ها بر روی فشار شکست و هندسه شکست هیدرولیکی مورد مطالعه قرار گیرد.

۲) دستگاه شکست هیدرولیکی سه محوره واقعی با قابلیت استفاده از انتشار آکوستیک، اعمال حرارت بر روی نمونه‌ها در زمان آزمایش و انجام عملیات تزریق با شدت جریان‌های متفاوت بر روی نمونه‌ها طراحی و ساخته شود تا مطالعات گسترده‌تری در رابطه با روش شکست هیدرولیکی صورت پذیرد.

۳) مکان‌یابی AE با روش جدید و قابل اعتماد ارائه شود تا پاسخ‌های لرزه‌ای شروع و گسترش شکست هیدرولیکی در مکان‌یابی AE و مقیاس آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گیرد.

مراجع

مراجع

- [1] هفت آبادی، ا. (۱۳۹۸). پایان نامه کارشناسی ارشد. مطالعه آزمایشگاهی تاثیر نرخ تزریق، ویسکوزیته و فشار سیال در روش آزمایش شکست هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [2] Haimson, B. C., & Cornet, F. H. (2003). ISRM suggested methods for rock stress estimation-part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(7-8), 1011-1020.
- [3] شیرازی، ح. (۱۳۹۵). رساله دکتری. مدلسازی آزمایشگاهی فرایند شکست هیدرولیکی در شرایط تنش سه محوره واقعی، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [4] Ma, Z. (2000). Experimental studies of rock fracture behavior related to hydraulic fracture. University of Illinois at Chicago.
- [5] مرادی، ا. و تخم چی، ب. و رسولی، و. و فاتحی مرجی، م. (۱۳۹۵). تحلیل المان مرزی غیر مستقیم اندرکنش شکست هیدرولیکی و شکست طبیعی در مخازن هیدروکربنی درزه دار. روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۶(۱۱)، ۷۷-۸۸.
- [6] Hossain, M. M., Rahman, M. K., & Rahman, S. S. (2000). Hydraulic fracture initiation and propagation: roles of wellbore trajectory, perforation and stress regimes. *Journal of petroleum science and engineering*, 27(3-4), 129-149.
- [7] Reinicke, A., Rybacki, E., Stanchits, S., Huenges, E., & Dresen, G. (2010). Hydraulic fracturing stimulation techniques and formation damage mechanisms—Implications from laboratory testing of tight sandstone–proppant systems. *Geochemistry*, 70, 107-117.
- [8] چیتی، ن. (۱۳۹۶). پایان نامه کارشناسی ارشد. بررسی میزان تاثیر پارامترهای ژئومکانیکی بر شکافت هیدرولیکی در مخازن نفت با مدلسازی عددی. دانشگاه صنعتی شریف تهران.
- [9] Wang, J., Guo, Y., Zhang, K., Ren, G., & Ni, J. (2019). Experimental investigation on hydraulic fractures in the layered shale formation. *Geofluids*, 2019.
- [10] Hubbert, M. K., & Willis, D. G. (1957). Mechanics of hydraulic fracturing. *Transactions of the AIME*, 210(01), 153-168.
- [11] Haimson, B., & Fairhurst, C. (1967). Initiation and extension of hydraulic fractures in rocks. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 7(03), 310-318.
- [12] Pine, R., Ledingham, P., & Merrifield, C. M. (1983, April). In-situ stress measurement in the Carnmenellis granite—II. Hydrofracture tests at Rosemanowes quarry to depths of 2000 m. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 20, No. 2, pp. 63-72). Pergamon.

- [13] Hampton, J. C. (2012). Laboratory hydraulic fracture characterization using acoustic emission. Colorado School of Mines.
- [14] Grosse, C. U., & Ohtsu, M. (Eds.). (2008). Acoustic emission testing. Springer Science & Business Media.
- [15] نیکخواه، م. (۱۳۹۲). رساله دکتری. مطالعه و مدلسازی عددی تاثیر بارگذاری سه محوره بر پدیده اثر کایزر. دانشگاه تربیت مدرس تهران.
- [16] Li, Q. B. (2015). Acoustic emissions in hydraulic fracturing of Barre granite (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- [17] Thirumalaiselvi, A., Sindu, B. S., & Sasmal, S. (2020). Crack propagation studies in strain hardened concrete using acoustic emission and digital image correlation investigations. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-28.
- [18] The Working Group for estimating the primary state of stress in a rock mass using the acoustic emission technique. (2002). Suggested method for in-situ stress measurement from a rock core using the acoustic emission technique. in *Proc. 5th International workshop on application of Geophysics in Rock Engineering*, Toronto, Canada.
- [19] Lehtonen, A., Cosgrove, J. W., Hudson, J. A., & Johansson, E. (2012). An examination of in situ rock stress estimation using the Kaiser effect. *Engineering Geology*, 124, 24-37.
- [20] Sagar, R. V. (2021). A probabilistic model of acoustic emissions generated during compression test of cementitious materials for crack mode classification. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences (IJEMS)*, 27(3), 537-553.
- [21] Zhang, H., Wang, Z., Song, Z., Zhang, Y., & Zhao, W. (2021). Acoustic emission characteristics of different brittle rocks and its application in brittleness evaluation. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 7(2), 1-14.
- [22] عبدالهی پور، ا.، سلطانیان، ح.، فاتحی مرجی، م.، و مرتضوی، س. ع. (۱۳۹۶). طراحی میدانی عملیات شکست هیدرولیکی در سازند ماسه سنگی (مطالعه موردی: چاه قائم در میدان گازی هیوگوتون آمریکا). نشریه علمی پژوهشی ژئومکانیک نفت، ۱(۲)، ۱-۲۱.
- [23] Fan, C. (2014). Analysis of microseismic events associated with hydraulic fracture propagation. Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College.
- [24] Stanchits, S., Surdi, A., Edelman, E., & Suarez-Rivera, R. (2012, June). Acoustic emission and ultrasonic transmission monitoring of hydraulic fracture propagation in heterogeneous rock samples. In *46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. OnePetro.
- [25] Guo, T., Zhang, S., Qu, Z., Zhou, T., Xiao, Y., & Gao, J. (2014). Experimental study of hydraulic fracturing for shale by stimulated reservoir volume. *Fuel*, 128, 373-380.

- [26] Alabbad, E. A. (2014). Experimental investigation of geomechanical aspects of hydraulic fracturing unconventional formations. The University of Texas at Austin.
- [27] Stoeckhert, F., Molenda, M., Brenne, S., & Alber, M. (2015). Fracture propagation in sandstone and slate—Laboratory experiments, acoustic emissions and fracture mechanics. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(3), 237-249.
- [28] Stanchits, S., Burghardt, J., & Surdi, A. (2015). Hydraulic fracturing of heterogeneous rock monitored by acoustic emission. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(6), 2513-2527.
- [29] Zhao, Z., Li, X., Wang, Y., Zheng, B., & Zhang, B. (2016). A Laboratory study of the effects of interbeds on hydraulic fracture propagation in shale formation. *Energies*, 9(7), 556.
- [30] Mao, R., Feng, Z., Liu, Z., & Zhao, Y. (2017). Laboratory hydraulic fracturing test on large-scale pre-cracked granite specimens. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 44, 278-286.
- [31] Ning, L., Shicheng, Z., Yushi, Z., Xinfang, M., Shan, W., & Yinuo, Z. (2017). Experimental analysis of hydraulic fracture growth and acoustic emission response in a layered formation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(4), 1047-1062.
- [32] Xinfang, M. A., Ning, L. I., Congbin, Y. I. N., Yanchao, L., Yushi, Z., Shan, W., ... & Tong, Z. H. O. U. (2017). Hydraulic fracture propagation geometry and acoustic emission interpretation: A case study of Silurian Longmaxi Formation shale in Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 44(6), 1030-1037.
- [33] Liang, Y., Cheng, Y., Zou, Q., Wang, W., Ma, Y., & Li, Q. (2017). Response characteristics of coal subjected to hydraulic fracturing: An evaluation based on real-time monitoring of borehole strain and acoustic emission. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 38, 402-411.
- [34] Li, N., Zhang, S., Zou, Y., Ma, X., Zhang, Z., Li, S., ... & Sun, Y. (2018). Acoustic emission response of laboratory hydraulic fracturing in layered shale. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(11), 3395-3406.
- [35] Naoi, M., Chen, Y., Nishihara, K., Yamamoto, K., Yano, S., Watanabe, S., ... & Ishida, T. (2018). Monitoring hydraulically-induced fractures in the laboratory using acoustic emissions and the fluorescent method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 104, 53-63.
- [36] Zhuang, L., Kim, K. Y., Jung, S. G., Diaz, M., Min, K. B., Zang, A., ... & Hofmann, H. (2019). Cyclic hydraulic fracturing of pocheon granite cores and its impact on breakdown pressure, acoustic emission amplitudes and injectivity. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 122, 104065.
- [37] Jiang, Z., Li, Q., Hu, Q., Liang, Y., Xu, Y., Liu, L., ... & Ling, F. (2020). Acoustic emission characteristics in hydraulic fracturing of stratified rocks: a laboratory study. *Powder Technology*, 371, 267-276.
- [38] Ishida, T. (2001). Acoustic emission monitoring of hydraulic fracturing in laboratory

- and field. *Construction and Building Materials*, 15(5-6), 283-295.
- [39] King, M. S., Al-Harthy, S., & Jing, X. D. (2001, June). Petrophysical studies of sandstones under true-triaxial stress conditions. In 63rd EAGE Conference & Exhibition (pp. cp-15). European Association of Geoscientists & Engineers.
- [40] Lhomme, T. P., De Pater, C. J., & Helfferich, P. H. (2002, October). Experimental study of hydraulic fracture initiation in Colton sandstone. In SPE/ISRM Rock Mechanics Conference. OnePetro.
- [41] Unander, T. E. (2002). Acoustic emission measurements in petroleum-related rock mechanics. The Norwegian University of Science and Technology Trondheim.
- [42] Rao, M. V. M. S., & Lakshmi, K. P. (2005). Analysis of b-value and improved b-value of acoustic emissions accompanying rock fracture. *Current science*, 1577-1582.
- [43] Carpinteri, A., & Lacidogna, G. (Eds.). (2008). Acoustic emission and critical phenomena: from structural mechanics to geophysics. CRC Press.
- [44] Cheng, Y., & Zhang, Y. (2012). Hydraulic Fracturing Experiment Investigation for the Application of Geothermal Energy Extraction. *ACS omega*, 5(15), 8667-8686.
- [45] Farhidzadeh, A., Salamone, S., Luna, B., & Whittaker, A. (2013). Acoustic emission monitoring of a reinforced concrete shear wall by b-value-based outlier analysis. *Structural Health Monitoring*, 12(1), 3-13.
- [46] Chitrala, Y., Moreno, C., Sondergeld, C., & Rai, C. (2013). An experimental investigation into hydraulic fracture propagation under different applied stresses in tight sands using acoustic emissions. *Journal of petroleum Science and Engineering*, 108, 151-161.
- [47] Lichun, J., Mian, C., Liangtian, S., Zhiyu, S., Zhang, W., Qianqian, Z., ... & Yan, J. (2013). Experimental study on propagation of hydraulic fracture in volcanic rocks using industrial CT technology. *Petroleum Exploration and Development*, 40(3), 405-408.
- [48] Carpinteri, A., Lacidogna, G., Accornero, F., Mpalaskas, A. C., Matikas, T. E., & Aggelis, D. G. (2013). Influence of damage in the acoustic emission parameters. *Cement and Concrete Composites*, 44, 9-16.
- [49] Chen, L. H., Chen, W. C., Chen, Y. C., Benyamin, L., & Li, A. J. (2014). Investigation of hydraulic fracture propagation using a post-peak control system coupled with acoustic emission. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(3), 1233-1248.
- [50] دهقان، ع. ن.، گشتاسبی، ک.، آهنگری، ک. (۱۳۹۳). مکانیسم شروع و گسترش شکست با استفاده از یک سیستم آزمایش شکافت هیدرولیکی سه محوره بر روی نمونه‌هایی از بلوک‌های سیمانی. پژوهش نفت، ۲۵(۲-۸۵)، ۱۸۰-۱۸۹.
- [51] Li, Q., Li, X. Y., & Lei, X. L. (2015, May). Effects of confining pressure on hydraulic fracturing of shales by acoustic emission monitoring and X-ray computed tomography.

In 13th ISRM International Congress of Rock Mechanics. OnePetro.

- [52] Khazaei, C., Hazzard, J., & Chalaturnyk, R. (2015). Damage quantification of intact rocks using acoustic emission energies recorded during uniaxial compression test and discrete element modeling. *Computers and Geotechnics*, 67, 94-102.
- [53] Paul, S. C., Pirskawetz, S., Van Zijl, G. P. A. G., & Schmidt, W. (2015). Acoustic emission for characterising the crack propagation in strain-hardening cement-based composites (SHCC). *Cement and concrete research*, 69, 19-24.
- [54] Stoeckhert, F., Molenda, M., Brenne, S., & Alber, M. (2015). Fracture propagation in sandstone and slate—Laboratory experiments, acoustic emissions and fracture mechanics. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(3), 237-249.
- [55] Behnia, A., Chai, H. K., Ranjbar, N., & Jumaat, M. Z. (2015). Damage detection of SFRC concrete beams subjected to pure torsion by integrating acoustic emission and Weibull damage function. *Structural Control and Health Monitoring*, 23(1), 51-68.
- [56] Zaki, A., Chai, H. K., Aggelis, D. G., & Alver, N. (2015). Non-destructive evaluation for corrosion monitoring in concrete: A review and capability of acoustic emission technique. *Sensors*, 15(8), 19069-19101.
- [57] Sagar, R. V., Prasad, B. R., & Singh, R. K. (2015). Kaiser effect observation in reinforced concrete structures and its use for damage assessment. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 15(2), 548-557.
- [58] Saliba, J., Loukili, A., Regoin, J. P., Grégoire, D., Verdon, L., & Pijaudier-Cabot, G. (2015). Experimental analysis of crack evolution in concrete by the acoustic emission technique. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 9(34).
- [59] خدایار، ا. (۱۳۹۵). پایان نامه کارشناسی ارشد. بررسی تاثیر ریزترک‌های القایی بر مکانیسم شکست نمونه‌های سنگی. دانشگاه تربیت مدرس تهران.
- [60] ناظری، ا.، و نجاتی، ح.، و قزوینیان، ع. (۱۳۹۵). بررسی تاثیر نانو ذرات سیلیس بر مقاومت و مکانیزم شکست مواد پایه سیمانی با استفاده از انتشار آوایی. *مهندسی معدن*، ۱۱(۳۲)، ۹-۲۱.
- [61] Mpalaskas, A. C., Matikas, T. E., Van Hemelrijck, D., Papakitsos, G. S., & Aggelis, D. G. (2016). Acoustic emission monitoring of granite under bending and shear loading. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16(3), 313-324.
- [62] Rodríguez, P. (2016). Applications of acoustic emission monitoring to the assessment of structural integrity of rocks. in *Proceedings of the 22nd International Congress on Acoustics*, Buenos Aires, Argentina.
- [63] Zhao, Z., Li, X., Wang, Y., Zheng, B., & Zhang, B. (2016). A Laboratory study of the effects of interbeds on hydraulic fracture propagation in shale formation. *Energies*, 9(7), 556.
- [64] Negi, P., & Chakraborty, T. (2016). Acoustic emission monitoring on Delhi quartzite under compressive loading. *Recent Advances in Rock Engineering (RARE 2016)*.

- [65] دهقان، ع.، و خدایی، م. (۱۳۹۶). مطالعه آزمایشگاهی تاثیر شکاف از پیش موجود بر گسترش شکافت هیدرولیکی تحت تنش‌های سه محوری واقعی. پژوهش نفت، ۲۷(۹۵)، ۷۱-۸۰.
- [66] Ishida, T., Labuz, J. F., Manthei, G., Meredith, P. G., Nasser, M. H. B., Shin, K., ... & Zang, A. (2017). ISRM suggested method for laboratory acoustic emission monitoring. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(3), 665-674.
- [67] Yan, X., Jun, L., Gonghui, L., & Xueli, G. (2017). Mechanical properties and acoustic emission properties of rocks with different transverse scales. *Shock and Vibration*, 2017.
- [68] Zhang, Y., Wang, G., Jiang, Y., Wang, S., Zhao, H., & Jing, W. (2017). Acoustic emission characteristics and failure mechanism of fractured rock under different loading rates. *Shock and Vibration*, 2017.
- [69] Wu, J., Wang, E., Ren, X., & Zhang, M. (2017). Size effect of concrete specimens on the acoustic emission characteristics under uniaxial compression conditions. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017.
- [70] Chen, D., Wang, E. Y., & Li, N. (2017). Analyzing the rules of fracture and damage, and the characteristics of the acoustic emission signal of a gypsum specimen under uniaxial loading. *Journal of Geophysics and Engineering*, 14(4), 780-791.
- [71] Koumoudeli, T. (2017). Acoustic emissions and variation of ac-conductivity in porous sandstone samples subjected to uniaxial loading. *Technological Education Institute of Crete*.
- [72] Zhou, Z. L., Zhou, J., Dong, L. J., Cai, X., Rui, Y. C., & Ke, C. T. (2017). Experimental study on the location of an acoustic emission source considering refraction in different media. *Scientific reports*, 7(1), 1-13.
- [73] Lacidogna, G., Piana, G., & Carpinteri, A. (2017). Acoustic emission and modal frequency variation in concrete specimens under four-point bending. *Applied Sciences*, 7(4), 339.
- [74] Prem, P. R., & Murthy, A. R. (2017). Acoustic emission monitoring of reinforced concrete beams subjected to four-point-bending. *Applied Acoustics*, 117, 28-38.
- [75] لکی روحانی، ع.، و فرخنده، س. (۱۳۹۷). پارامترهای مؤثر بر فشار شکست در آزمون شکست هیدرولیکی، مدل‌سازی به روش تفاضل محدود. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۰(۳)، ۵۵۷-۵۶۶.
- [76] Muñoz- Ibáñez, A., Delgado- Martín, J., & Grande- García, E. (2018). Acoustic emission processes occurring during high- pressure sand compaction. *Geophysical Prospecting*, 67(4-Rock Physics: from microstructure to seismic signatures), 761-783.
- [77] Damani, A., Sondergeld, C. H., & Rai, C. S. (2018). Experimental investigation of in situ and injection fluid effect on hydraulic fracture mechanism using acoustic emission in Tennessee sandstone. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 171, 315-324.
- [78] Dexing, L., Enyuan, W., Xiangguo, K., Xiaoran, W., Chong, Z., Haishan, J., ... & Jifa,

- Q. (2018). Fractal characteristics of acoustic emissions from coal under multi-stage true-triaxial compression. *Journal of Geophysics and Engineering*, 15(5), 2021-2032.
- [79] Hampton, J., Gutierrez, M., Matzar, L., Hu, D., & Frash, L. (2018). Acoustic emission characterization of microcracking in laboratory-scale hydraulic fracturing tests. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(5), 805-817.
- [80] Zhang, J. (2018). Investigation of Relation between Fracture Scale and Acoustic Emission Time-Frequency Parameters in Rocks. *Hindawi, Shock and Vibration*, 1-14.
- [81] داربر، م.، و شاکری، ه.، و فرامرزی، ل. (۱۳۹۸). بررسی آزمایشگاهی تاثیر مشبک کاری بر شکست هیدرولیکی، تحت شرایط تنش سه محوره با استفاده از مدلسازی فیزیکی. روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۹(۲۰)، ۸۹-۱۰۴.
- [82] Li, B. Q., & Herbert, E. (2019). Laboratory Hydraulic Fracturing of Granite: Acoustic Emission Observations and Interpretatio. *Engineering Fracture Mechanics*, 36-63.
- [83] Jia, S. Q., Wong, R. C. K., & Eaton, D. W. (2019, August). Acoustic Emission Monitoring of a Laboratory Hydraulic Fracturing Experiment on Montney Shale. In 53rd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.
- [84] Xing, Y., Zhang, G., Luo, T., Jiang, Y., & Ning, S. (2019). Hydraulic fracturing in high-temperature granite characterized by acoustic emission. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 178, 475-484.
- [85] Shu, B., Zhu, R., Zhang, S., & Dick, J. (2019). A qualitative prediction method of new crack-initiation direction during hydraulic fracturing of pre-cracks based on hyperbolic failure envelope. *Applied Energy*, 248, 185-195.
- [86] Lei, X. (2019). Evolution of b-value and fractal dimension of acoustic emission events during shear rupture of an immature fault in granite. *Applied Sciences*, 9(12), 2498.
- [87] Niu, Y., Zhou, X. P., & Zhou, L. S. (2020). Fracture damage prediction in fissured red sandstone under uniaxial compression: acoustic emission b- value analysis. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 43(1), 175-190.
- [88] Ha, S. J., & Yun, T. S. (2020). Experimental and numerical investigation of time-delayed pressurization for the manipulation of breakdown pressure and acoustic emissions during hydraulic stimulation. *Engineering Fracture Mechanics*, 231, 107005.
- [89] Zhai, H., Chang, X., Wang, Y., Lei, X., & Xue, Z. (2020). Analysis of acoustic emission events induced during stress unloading of a hydraulic fractured Longmaxi shale sample. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 189, 106990.
- [90] Du, K., Li, X., Tao, M., & Wang, S. (2020). Experimental study on acoustic emission (AE) characteristics and crack classification during rock fracture in several basic lab tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 133, 104411.
- [91] Dadi-givshad, A., Ahmadi, M., & Nejati, H. R. (2020). Study of Damaged Zone around Circular Opening Using Acoustic Emission Technique. *Journal of Mining and*

Environment, 11(2), 433-451.

- [92] Wei, J., Huang, S., Hao, G., Li, J., Zhou, X., & Gong, T. (2020). A multi-perforation staged fracturing experimental study on hydraulic fracture initiation and propagation. *Energy Exploration & Exploitation*, 38(6), 2466-2484.
- [93] Guo, L., Wang, Z., Zhang, Y., Wang, Z., & Jiang, H. (2020). Experimental and Numerical Evaluation of Hydraulic Fracturing under High Temperature and Embedded Fractures in Large Concrete Samples. *Water*, 12(11), 3171.
- [94] Wei, C., Zhang, B., Zhu, W., Wang, S., Li, J., Yang, L., & Lin, C. (2020). Fracture Propagation of Rock like Material with a Fluid-Infiltrated Pre-existing Flaw Under Uniaxial Compression. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(2), 875-891.
- [95] Zhu, X. Y., Chen, X. D., & Dai, F. (2020). Mechanical properties and acoustic emission characteristics of the bedrock of a hydropower station under cyclic triaxial loading. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53(11), 5203-5221.
- [96] Zhang, Y., Ma, J., Sun, D., Zhang, L., & Chen, Y. (2020). AE characteristics of rockburst tendency for granite influenced by water under uniaxial loading. *Frontiers in Earth Science*, 8, 55.
- [97] Chen, G., Sun, X., Wang, J., Wang, D., & Zhu, Z. (2020). Detection of cracking behaviors in granite with open pre-cut cracks by acoustic emission frequency spectrum analysis. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(6), 1-13.
- [98] Bayane, I., & Brühwiler, E. (2020). Structural condition assessment of reinforced-concrete bridges based on acoustic emission and strain measurements. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 10(5), 1037-1055.
- [99] Jung, D., Yu, W. R., & Na, W. (2020). Use of acoustic emission b (Ib)-values to quantify damage in composites. *Composites Communications*, 22, 100499.
- [100] Zhang, X., Cui, X., Tang, Q., & Sun, Y. (2021). Acoustic Emission Investigation on Crack Propagation Mode of Sandstone During Brazil Splitting Process. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(4), 2863-2870.
- [101] Lu, J., Yin, G., Zhang, D., Li, X., Huang, G., & Gao, H. (2021). Mechanical properties and failure mode of sandstone specimen with a prefabricated borehole under true triaxial stress condition. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 25, 100207.
- [102] Du, K., Liu, M., Yang, C., Tao, M., Feng, F., & Wang, S. (2021). Mechanical and acoustic emission (AE) characteristics of rocks under biaxial confinements. *Applied Sciences*, 11(2), 769.
- [103] Mpalaskas, A. C., Matikas, T. E., Aggelis, D. G., & Alver, N. (2021). Acoustic Emission for Evaluating the Reinforcement Effectiveness in Steel Fiber Reinforced Concrete. *Applied Sciences*, 11(9), 3850.
- [104] Tan, P., Hu, X., Jin, Y., & Fu, S. (2021). Observation of Hydraulic Fracture Morphology for Laboratory Experiments by Using Multiple Methods. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1-9.

- [105] Ren, Q., Jiang, Y., Wang, P., Wu, G., & Noraei Danesh, N. (2021). Experimental and Numerical Simulation Study of Hydraulic Fracture Propagation during Coalbed Methane Development. *Geofluids*, 2021.
- [106] Li, Q. C., Zhou, L., Li, Z. M., Liu, Z. H., Fang, Y., Zhao, L., & Han, Y. (2021). Factors affecting reorientation of hydraulically induced fracture during fracturing with oriented perforations in shale gas reservoirs. *Frattura e Integrità Strutturale*, 15(58).
- [107] Zhai, M., Wang, D., Li, L., Zhang, Z., Zhang, L., Huang, B., ... & Zhang, Q. (2022). Investigation on the mechanism of hydraulic fracture propagation and fracture geometry control in tight heterogeneous glutenites. *Energy Exploration & Exploitation*, 40(1), 246-278.
- [108] Vallen Systeme, GmbH. (2020). <http://www.vallen.de>, Wolfratshausen, Germany: The Acoustic Emission Company.
- [109] <http://bitlab.shahroodut.ac.ir/Lab/ViewTool/7316>.
- [110] <http://bitlab.shahroodut.ac.ir/Lab/ViewTool/7309>.
- [111] عرب نژاد، م.، و احمدی، م. (۱۳۹۴). بررسی کارائی روش انتشار آوایی در رفتارنگاری شکست مواد ترد. *مهندسی معدن*، ۱۰(۲۹)، ۱۱۹-۱۲۷.
- [112] Shiotani, T. (2001). Application of the AE Improved b-Value to Quantitative Evaluation of Fracture Process in Concrete-Materials. *Journal of acoustic emission*, 19, 118-133.
- [113] Pan, P. Z., Wu, Z. H., Yan, F., Ji, W. W., Miao, S. T., & Wang, Z. (2020). Effect of the intermediate principal stress on hydraulic fracturing in granite: an experimental study. *Environmental Earth Sciences*, 79(1), 1-18.
- [114] Doe, T. W., & Boyce, G. (1989, December). Orientation of hydraulic fractures in salt under hydrostatic and non-hydrostatic stresses. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 26, No. 6, pp. 605-611). Pergamon.
- [115] Bohlooli, B., & De Pater, C. J. (2006). Experimental study on hydraulic fracturing of soft rocks: Influence of fluid rheology and confining stress. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 53(1-2), 1-12.
- [116] Damani, A., Sharma, A., Sondergeld, C., & Rai, C. (2012, October). Mapping of hydraulic fractures under triaxial stress conditions in laboratory experiments using acoustic emissions. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. OnePetro.

Abstract

Hydraulic fracturing is known as one of the most important methods of stimulating oil and gas reservoirs. Extensive studies have been performed on its influential parameters such as the effect of horizontal and vertical stresses, stress regime, mechanical properties of the formation, natural fractures of the formation. However, there are some ambiguities about hydraulic fracturing and therefore the need for analysis in this area is felt. In this research, in order to better understand the mechanism of formation and expansion of cracks in the process of hydraulic fracturing and laboratory study of crack development, acoustic emission has been used. Experiments were performed on concrete block specimens with dimensions of 30 cm³ with a central cavity with a diameter of 50 mm under true triaxial stress conditions and acoustic emission monitoring was performed simultaneously with the injection of fluid into the specimen. Experiments were performed under different stresses applied to the specimens to investigate the effect of horizontal and vertical stresses. In order to investigate the crack deflection behaviors in the hydraulic fracturing process and the effect of natural fractures on the formation, pre-cracked specimens have been used. The results of the experiments showed that with increasing the minimum horizontal stress, the fracture pressure increases and with increasing the vertical stress and the maximum horizontal stress, the fracture pressure shows an increasing and decreasing trend. The fractures in anisotropic stress compounds are in the direction of maximum horizontal stress and in isotropic stress compounds are radially random. The pre-manufactured crack in the pre-cracked specimens reduce the fracture pressure of the specimens and the magnitude of the difference in horizontal stresses during the experiments clearly affects the crack propagation path during the hydraulic fracturing process. Also, various acoustic emission parameters have been analyzed and the results show a good relationship between cracking behavior in hydraulic fracturing tests and acoustic emission parameters.

keywords: hydraulic fracturing, acoustic emission, true triaxial stress, hydrocarbon reservoirs, in situ stress



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics

Thesis Submitted for the Degree of M.Sc.

**Laboratory investigation of crack propagation in
hydraulic fracturing test using acoustic emission**

Supervisor

Dr. Majid Nikkhah

Advisor

Dr. Hamed Shirazi

By

Ali Esmaeilzadeh

February 2022