

## کاربرد روش انتشار آوایی در تحلیل و ارزیابی فرآیند شکست هیدرولیکی

محمد حسین عرب نژاد<sup>۱</sup>؛ مرتضی احمدی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲- استاد گروه مکانیک سنگ، بخش معدن دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۷؛ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۳۰

(\*نویسنده مسئول: [Moahmadi@modares.ac.ir](mailto:Moahmadi@modares.ac.ir))

### چکیده

با توجه به کاربرد روزافزون و هزینه بالای عملیات شکست هیدرولیکی، طراحی این فرآیند مستلزم شناسایی و داشتن درک مناسب از میزان و نحوه اثرگذاری پارامترهای مختلف در اجرا است. عوامل مختلفی همچون رژیم تنشهای موثر، خواص مکانیک سنگی سازند، وجود درزه و شکستگیهای طبیعی و همچنین پارامترهای عملیاتی اعم از: رئولوژی سیال (عکس‌العمل یا تغییر فرم سیال در مقابل تنشهای وارد بر آن)، شدت جریان و نحوه تزریق سیال بر روی فشار و هندسه شکست هیدرولیکی تأثیرگذار است. به منظور مطالعه تأثیرات پارامترهای مذکور، بهره‌گیری از روشهای پیشرفته ارزیابی در آزمایشگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مطالعه با مرور مهمترین روشهای ارزیابی و تحلیل آزمایشهای شکست هیدرولیکی، با تشریح روش انتشار آوایی، تقسیم‌بندی کاملی از روشهای تحلیل دادههای آوایی ارائه شده است. جنبه‌های مختلف طراحی، جانمایی سنسورها، تعیین حدود مشخصه امواج و نکات اجرایی برداشت مناسب داده‌ها آوایی در آزمایشهای مختلف مهندسی سنگ را می‌توان طبق توصیه نامه انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ بکار برد. در ادامه نیز با مرور مهمترین مطالعات انجام شده، نتایج خاص بدست آمده از روش انتشار آوایی در تحلیل شکل‌گیری و مکانیزم و فشار شکست، گسترش ترکهای ایجاد شده، مکان‌یابی رخدادهای و تعیین دقیق هندسه شبکه شکستگی‌های و همچنین تحلیل‌های پارامتریک عوامل مختلف موثر، طبقه‌بندی و مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای بسیاری بر نوع مکانیزم رخدادهای آوایی موثرند. نتایج مطالعات نشان داد که در فرآیند شکست هیدرولیکی مود غالب شکست برشی است. این در حالی است که با انجام تحلیل مکان‌یابی و مکانیزم مشخص شد که در مرحله ابتدایی، شکست کششی و در مرحله گسترش شبکه شکست، حالت برش در رخدادهای برداشت شده، غالب است.

### واژگان کلیدی

شکست هیدرولیکی، انتشار آوایی، فشار شکست، گسترش ترک.

### ۱- شکست هیدرولیکی

شکست هیدرولیکی<sup>۱</sup> یکی از پرکاربردترین فرآیندها و موضوع مطالعات در سال‌های گذشته در مهندسی سنگ بوده است. در این روش با بهره‌گیری از فشار ناشی از تزریق سیال درون

سنگ، شکست مورد نیاز ایجاد می‌شود. از نتایج این فرآیند عملیاتی در تعیین تنش‌های برجای سنگ در اعماق زیاد، تحریک مخازن در صنعت نفت و گاز به منظور ازدیاد برداشت، پروژه‌های بهره‌برداری از انرژی زمین گرمایی و همچنین

<sup>1</sup> Hydraulic Fracturing

رفتارنگاری شکست هیدرولیکی در آزمایشگاه به موارد زیر می‌توان اشاره نمود:

- استفاده از افزودنی‌های قابل ردگیری درون سیال تزریق،
- ارسال و برداشت امواج رادیویی حین آزمایش (تموگرافی)،
- اسکن نمونه‌های آزمایش شده با استفاده از رادیوگرافی سه بعدی،
- برش نمونه به مقاطع موازی و آنالیز تصویر ترک‌های ایجاد شده در هر مقطع،
- استفاده از دوربین‌های تصویربرداری سرعت بالا و
- بهره‌گیری از روش‌های بر پایه امواج لرزه‌ای منتشر شده حین آزمایش.

## ۲- انتشار آوایی

انتشار آوایی<sup>۲</sup> (AE)، پدیده انتشار امواج الاستیک ناشی از تغییر شکل‌های مکانیکی و کرنش‌های ایجاد شده در درون مواد اطلاق می‌شود. این امواج دارای مشخصات و محدوده فرکانسی مشخص بوده و در نتیجه آزاد سازی ناگهانی انرژی الاستیک منتشر می‌شوند (ASTM E1۳۱۶ ۲۰۱۰).

در مواد با رفتار ترد و شکننده مانند سنگ که عمدتاً از کانی‌های کریستالی تشکیل شده‌اند، امواج AE در نتیجه انواع رخدادهایی اعم از: ساییش بین دانه‌ها، ایجاد و گسترش ریزترکها، شکست در فضاهای خالی و غیره روی می‌دهد. هر ماده بر اساس خصوصیات رفتاری خود و مکانیزم بار اعمال شده بر آن، تغییر شکل داده و در نتیجه سیگنال‌های AE دریافت و آنالیز شده می‌تواند اطلاعاتی جامع و مهمی در خصوص نوع مکانیزم، محل رخداد و روند رشد تغییر شکل را ایجاد نماید.

## ۲-۱- تحلیل داده‌های آوایی

در سالهای اخیر مطالعات گسترده‌ای در خصوص تحلیل داده‌های حاصل از رفتارنگاری AE صورت پذیرفته که منجر به توسعه روشهای متعدد تحلیل و آنالیز سیگنال‌های ناشی از رخداد‌های AE شده است. بر اساس کاربرد و نوع پدیده تحت بررسی، راهبردهای مختلفی برای آنالیز داده‌های آوایی بکار

افزایش بهره‌وری آن، دفن زباله‌های اتمی در سازندهای عمیق، دفن سیالات و فاضلاب‌های سمی، طراحی سازه‌های مهندسی همانند سدها و تونل‌ها و دیگر کاربردهایی نظیر ژئودینامیک و زمین شناسی مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این گستردگی کاربرد در کنار هزینه بالای اجرای این روش، منجر به انجام طیف وسیعی از مطالعات به منظور بررسی و ارزیابی پارامترهای تاثیرگذار بر فرآیند شکست و در نهایت ارائه الگوی اجرایی فرآیند بهینه، قابل کنترل در گستره مورد نیاز و طراحی شده و با لحاظ کلیه ملاحظات فنی، اقتصادی و محیط زیستی، شده است.

## ۱-۱- پارامترهای موثر بر شکست هیدرولیکی

مطالعات گسترده‌ای توسط محققین به منظور تعیین پارامترهای موثر بر روند شکست هیدرولیکی صورت گرفته است. در نتیجه این مطالعات پارامترهای موثر بر روند شکست هیدرولیکی را می‌توان به ۵ دسته کلی با زیر مجموعه‌های زیر تقسیم‌بندی نمود [۱]:

- خصوصیات و پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ (دانه‌بندی سنگ، تخلخل، مدول الاستیسیته، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و ...)،
- پارامترهای مرتبط با شاخص‌های مکانیک شکست غیر خطی (ناحیه پلاستیک غیر خطی در نوک ترک، انبساط سنگ و تاخیر سیال)،
- پارامترهای موثر توده سنگ (ناپیوستگی‌های بزرگ، هتروژنی توده سنگ، نفوذ پذیری و زونهای چسبنده)،
- پارامترهای مرتبط با تنش (تنش جانبی دربرگیرنده زمین، فشار آب منفذی موثر) و
- پارامترهای مرتبط با سیال تزریق شده (نوع سیال، ویسکوزیته، هندسه مقطع تزریق، الگوی و روند تزریق سیال).

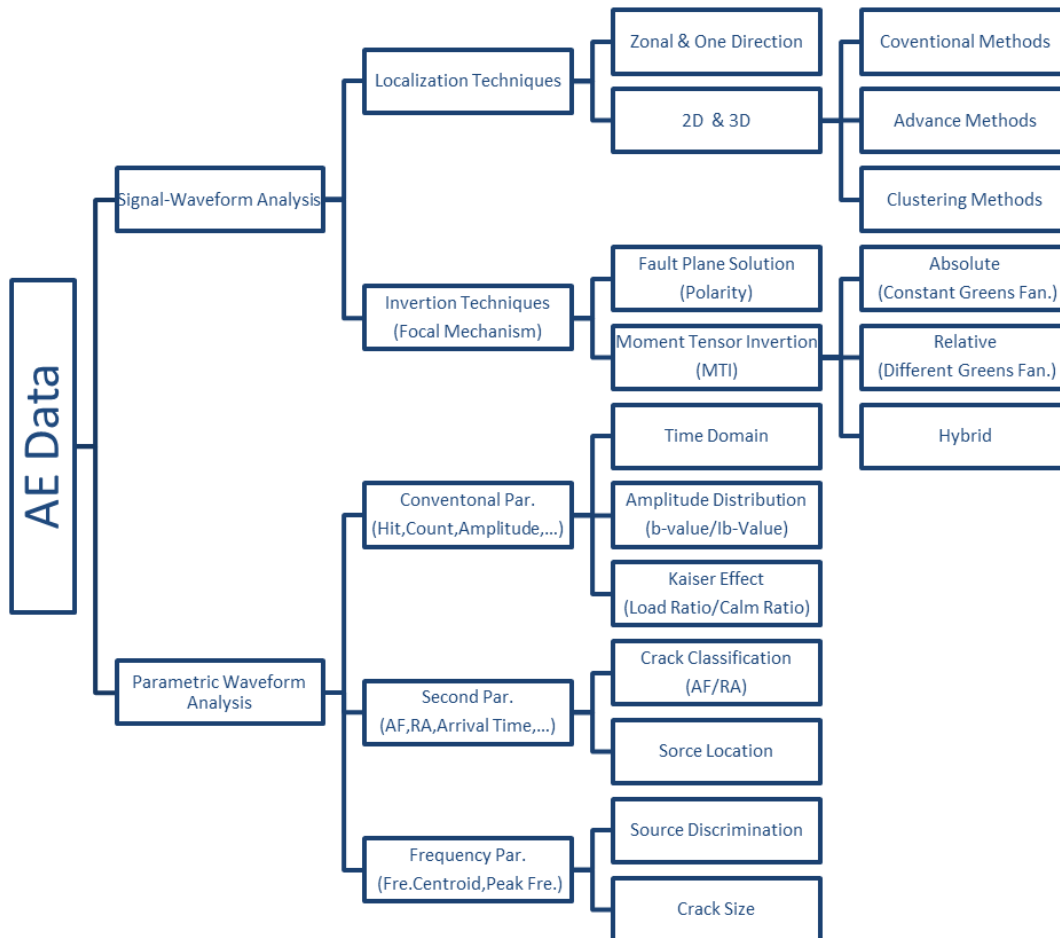
## ۲-۲- روش‌های ارزیابی فرآیند شکست هیدرولیکی

شکست هیدرولیکی به دلیل تاثیر توامان پارامترهای موثر، فرآیند بسیار پیچیده و دارای جنبه‌های مختلف است. به همین دلیل تاثیر تغییرات کم هر پارامتر باعث تاثیر بر دیگر پارامترهای موثر و در نهایت تجمیع تغییرات باعث تاثیر بر کل فرآیند و شکست ایجاد شده می‌شود. از جمله روشهای

<sup>2</sup> Acoustic Emission

در بعضی از کاربردها و تحلیل‌های دقیق نیاز به ارزیابی جامع و دقیق‌تر نوع مکانیزم و محل رخدادها است که این امر نیازمند انجام تحلیل طیف کامل فرکانس شکل موج است. شایان ذکر است با توجه به رشد روزافزون قابلیت برداشت و انجام محاسبات توسط ابزارهای الکترونیکی در سال‌های اخیر، این نوع تحلیل و آنالیزها نیز به صورت یک تحلیل در لحظه به منظور رفتارنگاری روند شکست تبدیل شده است. به منظور تبیین و درک کلیات روشهای مختلف تحلیل و آنالیز، در شکل ۱ این روش‌ها تقسیم بندی و ارائه شده است. هر کدام از پارامترهای مختلف امواج AE بدست آمده از شکل موج چه در حالت پارامتری و همچنین طیف کامل، در دو مبنای زمان و فرکانس قابل تحلیل و ارزیابی است. با لحاظ اثرپذیری و ارتباط هر پارامتر به مکانیزم شکست، از پارامترهای مختلفی در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

گرفته می‌شود. به طور کلی این تحلیل‌ها را می‌توان به دو دسته آنالیز پارامتریک شکل موج و آنالیزهای طیف کامل فرکانس - شکل موج تقسیم‌بندی نمود. در یک ارزیابی و رفتارنگاری شکست AE در مواد با رفتار ترد و شکننده، به دلیل ایجاد رخدادها بسیار و در نتیجه انتشار مداوم و مکرر تکانه‌های اولیه (ناشی از انواع مختلف موج عبوری مستقیم) و ثانویه (امواج بازتاب و منعکس شده موج‌های اولیه) حجم بالایی از داده‌ها برداشت می‌شود. به منظور کاهش داده‌های دریافتی و بالا بردن سرعت محاسبات در تحلیل‌های مختلف، با بهره‌گیری از الگوریتم و شاخص‌های تعریف شده، پارامترهای مورد نیاز از سیگنال‌های دریافتی استخراج و در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. با عنایت به دلایل ذکر شده مبنای توسعه روش‌های تحلیلی پارامتریک، انجام آنالیزهای سریع و در لحظه است.



شکل ۱- روش‌های مختلف تحلیل داده‌های آوایی.

## ۲-۲- برداشت داده‌های آوایی

روش انتشار آوایی (AE) به دلیل داشتن مزایا و قابلیت‌های گسترده نسبت به دیگر روش‌ها و دارا بودن روش‌های مختلف تحلیل و ارزیابی فرآیند شکست سنگ، مورد توجه و استفاده توسط محققین در بررسی و تحلیل فرآیند شکست هیدرولیکی در سال‌های گذشته بوده است. در سال‌های اخیر نیز به دلیل توسعه روزافزون تکنولوژی ابزارهای برداشت و ارائه مدل‌های و الگوهای مختلف محاسبات و تحلیل‌ها، کاربرد پیشرفته این روش در مطالعات این حوزه توسعه و شتاب بیشتری یافته است.

ارزیابی و رفتارنگاری روش انتشار آوایی اساساً شامل سه جزء اصلی: دریافت، ثبت و تفسیر امواج است. اصولاً در این روش ارسال امواج صورت نمی‌گیرد و تنها سیگنال امواج AE منتشر شده درون مواد را دریافت و مورد تحلیل قرار می‌گیرد. به همین دلیل روش AE جزء روش‌های غیرفعال است. درک کامل ویژگی‌ها و محدوده فرکانسی امواج AE منتشر و دریافت شده، خصوصاً برای جداسازی اطلاعات ناخواسته و نویزها محیطی بسیار مهم و ضروری است.

طی سالیان متمادی بهره‌گیری از روش انتشار آوایی در ارزیابی‌های شکست سنگ در کاربردهای مختلف، در سال ۲۰۱۷ انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ روش پیشنهادی خود را که مشتمل بر ارائه مروری کلی از کاربردهای روش AE، مشخصات سنسورها، نحوه، جزئیات رفتارنگاری با این روش و در نهایت نحوه و موارد الزامی ارائه نتایج و تحلیل‌ها تحت نظر جمعی از محققین شاخص در این حوزه ارائه نمود [۲].

## ۳- مطالعات آزمایشگاهی

بیرلی و لوکنر<sup>۳</sup> (۱۹۷۷) اولین آزمایشات تزریق سیال درون سنگ دارای تخلخل تحت شرایط بارگذاری سه محوره و ارزیابی شکست با بکارگیری از رفتارنگاری AE را انجام دادند. این محققین با انجام تحلیل مکان‌یابی مشاهده کردند: که نرخ رخدادها در مناطقی که ترک جدید شکل گرفته است نسبت به دیگر مناطق بالا بوده و در نتیجه این نواحی دارای تمرکز تنش بالاتری می‌باشند [۳]. این محققین در راستای مطالعه قبل و با انجام تحلیل‌های پارامتری بر روی نتایج آزمایشات

نتیجه گرفتند که ایجاد ترک جدید انرژی AE منتشر شده بالاتری نسبت به ترک‌های موجود و اصطکاک مابین آن‌ها داشته است [۴].

ویکس<sup>۴</sup> و همکاران (۱۹۷۸) با استفاده از دستگاه آزمایش مطالعات اشاره شده قبلی و انجام آزمایشات متعدد به ارزیابی امکان بهره‌گیری از رابطه بزرگی - فرکانسی در ارزیابی شکست هیدرولیکی پرداختند. در نتیجه این مطالعه، این محققین بر امکان بکارگیری تغییرات b-value امواج دریافتی اشاره داشته و همچنین بر قابلیت بکارگیری روش AE و تحلیل‌های پارامتریک بر مبنای زمان، در ارزیابی شکست‌های کنترل شده به منظور تعیین مناسب تغییرات پارامترهای موثر در شکست تاکید کردند [۵].

لوک فراش<sup>۵</sup> (۲۰۰۷) در طی مطالعات پایان نامه دوره کارشناسی ارشد خود در دانشگاه MIT، آزمایش شکست هیدرولیکی را بر روی نمونه‌های مکعبی ۳۰ سانتیمتری دارای گمانه تزریق مرکزی ساخته شده از پلیمر اکریلیک، بتن، گرانیت و سنگ آهک مطابق شکل ۲ نشان داده شده، پرداخته است [۶]. او شرایط مختلف بارگذاری به دو صورت تک محوره و سه محوره واقعی را با تزریق چهار سیال: آب، آب نمک، نفت و اپوکسی و همچنین فراهم نمودن شرایط دمایی واقعی در بعضی آزمون‌ها انجام داد.



شکل ۲- نمونه‌ی مکعبی مورد استفاده به همراه

سنسورهای AE نصب شده [۶].

رفتارنگاری رخدادهای AE نیز در کل فرآیند شکست که در

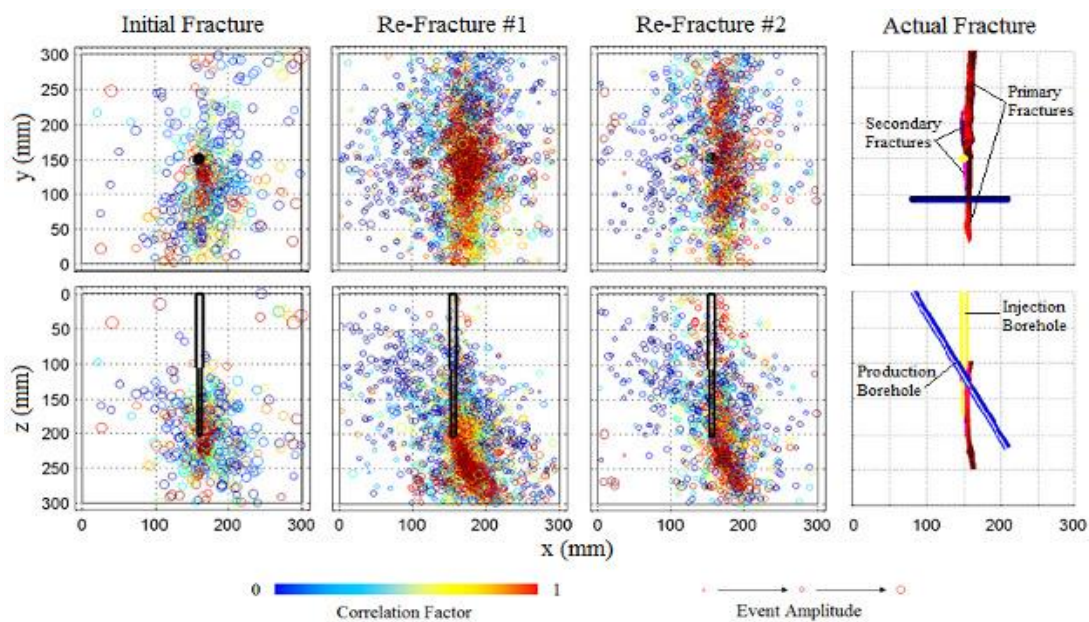
<sup>5</sup> Luck Frash

<sup>3</sup> Byerlee and Lockner

<sup>4</sup> Weeks

شکستگی‌ها می‌شود. طیف وسیعی از آزمایشات و در شرایط مختلف انجام گرفت و تحلیل مکان یابی صورت گرفته نشان از توانایی ایجاد شبکه‌ای از شکستگیها با بارگذاری و ایجاد فشار مجدد در سیکل بارگذاری می‌باشد که این مطلب بسیار در طراحی فرآیند انجام شکست هیدرولیکی در عمل مفید و تأثیرگذار است [۷].

بعضی از آنها بارگذاری به صورت سیکلی بوده، انجام گرفته است. رخدادهای ایجاد شده در این آزمایشات در دو دسته کلی شکستگی اولیه و مرحله بازشکست ثانویه در شکل ۳ نشان داده شده است. یکی از مهمترین مشاهدات او این است که رخدادهای مکان یابی شده در دور از گمانه تزریق به صورت کامل مرتبط با مرحله بارگذاری مجدد بوده و تحریک شکستگی ایجاد شده و منجر به رشد آنها و توسعه شبکه



شکل ۳- نتایج تحلیل مکان یابی و تقسیم بندی شکست‌های اولیه و ثانویه [۶].

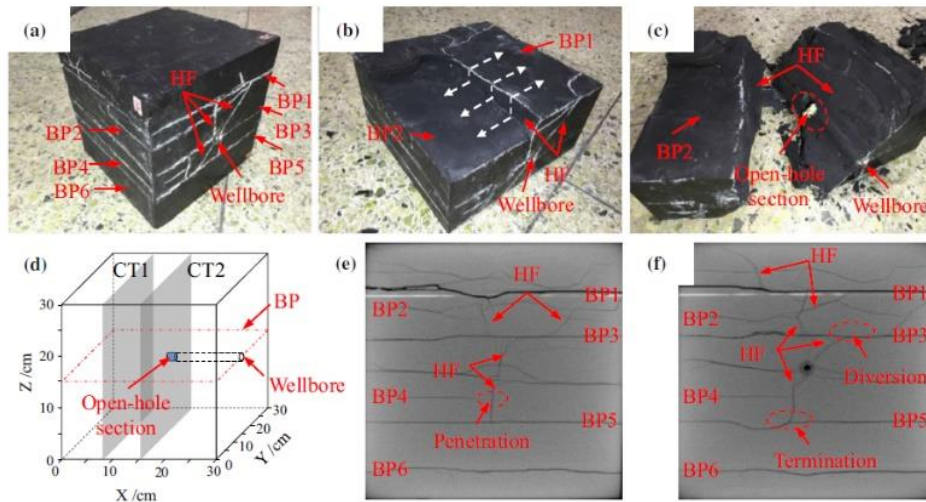
از انواع مختلف پروپانت و تأثیر آنها بر فرآیند شکست مورد بررسی قرار گرفت. مشاهدات و تحلیل‌های مکان یابی و تحلیل توامان مکانیزم منابع رخداد AE (شکل ۵) نشان داد که: رخدادهای برشی در نمونه‌های لایه بندی غالب بوده و بیشتر مربوط به تمرکز تنش در محل لایه بندی و لغزش لایه بندی می‌باشد. در نتیجه گستره شکست و پیچیدگی آن تطابق کاملی با نتایج AE در نمونه‌ها دارای لایه بندی نمی‌باشد. همچنین آنها نشان دادند که در تزریق با نرخ ثابت، رخدادهای AE مشاهده شده با دامنه پایین بوده و مرتبط با نفوذ سیال به درون شکستگی‌ها است. همچنین در تزریق با نرخهای مختلف، منجر به ایجاد شکست با بازشدگی دهانه مختلف شده و استفاده از پروپانت در هر حالت منجر به افزایش و توسعه شبکه شکست می‌شود [۸]، [۹].

در سالهای اخیر مطالعات گسترده‌ای در خصوص کاربرد روش AE در ارزیابی پارامترهای موثر بر شکست هیدرولیکی در دانشگاه نفت پکن صورت گرفته است.

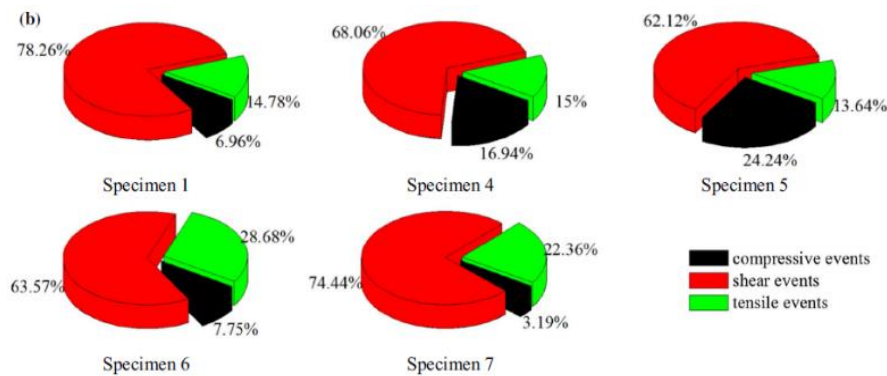
از مهمترین نتایج ارائه شده توسط نینگ<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۸) است [۹]، [۸]. در این مطالعه که به بررسی تأثیر لایه بندی نمونه‌های مکعبی شیل حین شکست هیدرولیکی و با بهره‌گیری از روش رفتارنگاری AE و تخمین گستره شکست بر اساس نتایج تحلیل مکان یابی AE صورت گرفته است. همچنین کنترل نتایج با تموگرافی و اسکن نمونه‌ها پس از شکست (شکل ۴) نیز صورت پذیرفته است. در این مقاله مرور بسیار جامعی از مطالعات اخیر صورت گرفته در این حوزه مطالعاتی ارائه شده است.

همچنین تأثیر پارامترهای نرخ‌های مختلف تزریق و استفاده

<sup>6</sup> Ning



شکل ۴- نمونه‌های مکعبی آزمایش شده و نتایج شکست منطبق و متاثر از لایه‌بندی [۹]، [۸].



شکل ۵- نتایج تحلیل مکانیزم رخدادهای AE و غالب بودن مود برش در آن‌ها [۹]، [۸].

- مکانیزم غالب شکست در مود برشی مشاهده شده است.
- فشار اولیه شکست، با افزایش تنش انحرافی، افزایش می‌یابد.
- کاهش مدول یانگ منجر به افزایش تغییر شکل‌پذیری و گسترش ناحیه شکست می‌شود، همچنین با افزایش در مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی منجر به افزایش فشار شکست می‌شود.
- تأثیر نواحی گسلش و ناپیوستگی‌های بزرگ بر روی فرآیند شکست هیدرولیکی بسیار زیاد بوده و در بعضی موارد منجر به توقف رشد ترک یا جهت دهی به مسیر رشد ترک می‌شود.
- ناحیه پلاستیک ایجاد شده در نوک شکست انتشار

توانایی روش انتشار آوایی در ارزیابی بهتر فرآیند شکست، منجر به دستیابی به نتایج متفاوت با روشهای تحلیل و عددی شده و رویکرد متفاوتی در ارزیابی فرآیند شکست هیدرولیکی را ایجاد نموده است. از نتایج ویژه بدست آمده در مطالعات و بررسی‌ها می‌توان موارد زیر را ذکر نمود:

- در تنشهای بالا، شکستگی‌ها دارای طول کوتاه و به صورت ترکیبی و پر پیچ و خم می‌باشند. در حالی که در تنش جانبی کم شکست ایجاد شده صفحه‌ای و طولی‌تر می‌باشد.
- ویسکوزیته و نوع سیال بر شکست بسیار تأثیرگذار است. سیال با ویسکوزته بالا، فشار شکست بالاتر و شکستگی دارای انشعابات بیشتری را منجر می‌شود.

- ۱ این مطالعه ارائه شده است.
- پارامترهای بسیاری بر نوع مکانیزم رخدادهای AE موثراند. نتایج آزمایشات نشان داد که در فرآیند شکست هیدرولیکی مود غالب شکست برشی است. این در حالی است که با انجام تحلیل مکان‌یابی و مکانیزم دقیقتر مشخص شد که در مرحله ابتدایی شکست کششی و در مرحله گسترش شکست مود برش در رخدادهای برداشت شده مشاهده خواهد شد.
  - فضای ابرگونه در نتیجه تحلیل مکان‌یابی رخدادهای AE دارای تطابق بسیار خوبی در مقیاس آزمایشگاهی با گستره شبکه شکستگی‌های ایجاد شده می‌باشد. از این نتیجه در تعیین گستره شکستگی‌ها در عملیات صحرایی استفاده می‌شود.
  - به منظور کاهش سطح فشار شکست، بارگذاری و تزریق سیکی با نرخهای مختلف انجام گرفته و نتایج نشان‌دهنده کاهش قابل توجه فشار لحظه شکست و در نتیجه زلزله‌های ایجاد شده می‌باشد. همچنین گستره شبکه شکستگی‌های ایجاد شده نیز در این حالت بزرگتر بوده که نفوذپذیری بیشتری را نیز ایجاد می‌نماید.
- بر اساس نتایج مطالعات صورت گرفته و کاربرد بالای روش تحلیل انتشار آوایی، می‌توان از این روش برداشت در مطالعات آزمایشگاهی بررسی اثر پارامترهای مختلف دسته بندی شده اعم از مقاومت، سطح تنش، پارامترهای مربوط به سطح ناپیوستگی و همچنین مکانیزم توسعه شبکه شکست هیدرولیکی در الگوهای مختلف تزریق استفاده کرد.
- یکی دیگر از جنبه‌های خوب مطالعاتی با استفاده از این روش، ارزیابی اثر توامان پارامترهای موثر در آزمایشگاه و ایجاد بانک داده بزرگتر جهت بهره‌گیری از روش‌ها نوین تحلیلی مانند: تحلیل‌های آماری و توسعه الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق است.

یافته، باعث ایجاد یک سپر موثر و مقاوم در برابر رشد ترک می‌شود. مقدار نیروی بسیار بالا جهت انتشار و توسعه شکست در ناحیه پلاستیک ایجاد شده، منجر به ایجاد بازشدگی ترک خواهد شد. در نتیجه اتساع زیاد سنگ باعث توسعه ناحیه پلاستیک و در نتیجه مقاومت بالاتر ترک در برابر رشد می‌شود. تاثیر تاخیر سیال نیز در ایجاد ناحیه با رفتار پلاستیک کم و قابل اغماض است. افزایش تنش برجا موجب افزایش ناحیه با رفتار پلاستیک خواهد شد که این نکته بسیار از پارامترهای مقاومت سنگ، مدول الاستیسیته، گرانروی سیال را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

- نتایج این مطالعه، نشان از کارایی بالای روش‌های ارزیابی لرزه‌ای خصوصاً تحلیل‌های مکان‌یابی و تعیین مکانیزم رخدادهای AE در ارزیابی فرآیند شکست هیدرولیکی و پارامترهای موثر بر آن در آزمایشگاه و همچنین تعیین گستره شکستگی‌های ایجاد شده و مکانیزم رخدادهای در فرآیند عملیاتی این روش است. اهم نتایج را میتوان به صورت زیر ذکر نمود.
- پارامترهای مختلف بر فرآیند شکست هیدرولیکی موثر بوده که می‌توان این پارامترهای را در پنج دسته تقسیم بندی نمود. هر کدام این پارامترها دارای تاثیر خاصی بر فرآیند شکست بوده اما نکته مهم در نظر داشتن تاثیر توامان تغییر یک پارامتر و اثر آن بر دیگر پارامترها و در نتیجه بر کل فرآیند می‌باشد.
  - روش انتشار آوایی (AE) به دلیل مزایا و قابلیت‌های آن، دارای کاربرد گسترده‌ای در ارزیابی فرآیند شکست است. روش‌های تحلیل و ارزیابی این روش را می‌توان به دو دسته تحلیل طیف کامل شکل موج و تحلیل‌های پارامتری تقسیم بندی کرد. هر کدام از این دو نوع تحلیل دارای روش‌های مختلف ارزیابی بوده که مهمترین آنها تحلیل‌های مکان‌یابی و تعیین مکانیزم رخدادهای است. تقسیم‌بندی روش‌های مختلف در شکل

#### ۵-منبع‌ها

- [۱] ابراهیم قربانی، پارامترهای موثر بر نتیجه عملیات شکست هیدرولیکی، "اکتشاف و تولید نفت و گاز، شماره ۱۳۹۴ (۱۲۳-۱)

- 
- [2] T. Ishida *et al.*, "ISRM Suggested Method for Laboratory Acoustic Emission Monitoring," *Rock Mech Rock Eng*, vol. 50, no. 3, 2017, doi: 10.1007/s00603-016-1165-z.
- [3] J. D. Byerlee, "Acoustic emission during fluid injection into rock," in *Proceedings of the 1st Conference on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials*, 1977, pp. 87–98.
- [4] D. Lockner and J. D. Byerlee, "Hydrofracture in Weber sandstone at high confining pressure and differential stress," *J Geophys Res*, vol. 82, no. 14, pp. 2018–2026, 1977.
- [5] J. Weeks, D. Lockner, and J. Byerlee, "Change in b-values during movement on cut surfaces in granite," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 68, no. 2, pp. 333–341, 1978.
- [6] L. P. Frash, "Laboratory-scale study of hydraulic fracturing in heterogeneous media for enhanced geothermal systems and general well stimulation," *ProQuest Dissertations and Theses*, p. 155, 2014.
- [7] L. P. Frash, "Laboratory simulation of an enhanced geothermal reservoir." Colorado School of Mines. Arthur Lakes Library, 2012.
- [8] L. Ning, Z. Shicheng, Z. Yushi, M. Xinfang, W. Shan, and Z. Yinuo, "Experimental Analysis of Hydraulic Fracture Growth and Acoustic Emission Response in a Layered Formation," *Rock Mech Rock Eng*, vol. 51, no. 4, pp. 1047–1062, 2018.
- [9] N. Li *et al.*, "Acoustic Emission Response of Laboratory Hydraulic Fracturing in Layered Shale," *Rock Mech Rock Eng*, vol. 51, no. 11, pp. 3395–3406, 2018.



## The application of acoustic emission methods in the analysis and evaluation of hydraulic fracturing processes.

Mohammad Hossein Arabnejad<sup>1</sup>; Morteza Ahmadi<sup>2\*</sup>

1- PhD student in Rock Mechanics, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Professor of Rock Mechanics, Mining Department, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Received: 07. October. 2023

Accepted: 22. December. 2023

(Corresponding author: Moahmadi@modares.ac.ir)

---

### Keywords

Hydraulic Fracture  
Acoustic Emission  
Fracture Breakdown Pressure  
Crack Propagation

---

### Final English Extended Abstract

#### Summary

This paper investigates the complex dynamics of hydraulic fracturing within the context of rock mechanics, aiming to clarify the underlying mechanisms and implications for geological formations. The primary objective is to advance the understanding of how hydraulic fractures influence rock behavior, utilizing a combination of empirical observations and theoretical frameworks. The research employs a rigorous scientific methodology to analyze acoustic emissions associated with hydraulic fracturing, leading to significant findings that enhance both practical applications and theoretical knowledge in the field.

### Introduction

The introduction establishes the critical relevance of hydraulic fracturing in modern geological engineering and resource extraction. It emphasizes the necessity for a comprehensive understanding of fracture mechanics to optimize resource recovery while minimizing environmental repercussions. This study seeks to address existing gaps in the literature by providing a detailed examination of hydraulic fracturing dynamics, including the challenges posed by geological heterogeneity and prediction accuracy. The research sets forth ambitious objectives, aiming to not only clarify the mechanisms of hydraulic fractures but also to propose future directions for better monitoring and predictive modeling techniques.

### Methodology and Approaches

The research employs a multifaceted methodology, integrating both field experiments and controlled laboratory simulations to investigate hydraulic fracturing processes. Key tools include advanced acoustic emission method, which capture real-time data during fracturing events. The study utilizes finite element analysis to simulate fracture propagation under various conditions, allowing for a comprehensive assessment of the factors influencing fracture behavior. Statistical methods are employed to rigorously analyze the collected data, ensuring that the conclusions drawn are robust and scientifically valid.

### Results and Conclusions

The results indicate that the acoustic emissions generated during hydraulic fracturing provide valuable insights into fracture initiation and propagation. Key findings suggest that the characteristics of acoustic signals correlate strongly with the fracture patterns observed in both laboratory and field settings. The study concludes that understanding these relationships can lead to improved predictive models for hydraulic fracturing outcomes and inform best practices in geological engineering. Practical recommendations include the integration of acoustic monitoring techniques in routine assessments of fracturing operations to enhance safety and efficiency. Future research directions are proposed, emphasizing the need for further exploration of the interactions between hydraulic fracturing and geological formations, particularly in complex environments.

---