

Laboratory Investigation of the Effect of Pre-existing Crack on Hydraulic Fracturing Using Acoustic Emission

Ali Esmaeilzadeh¹, Majid Nikkhah^{1*} and Hamed Shirazi²

1. Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2. Faculty of Engineering, Department of Mining Engineering, Velayat University, Iranshahr, Iran

m.nikkhah@shahroodut.ac.ir

DOI:10.22078/PR.2022.4800.3151

Received: May/17/2022

Accepted: October/08/2022

Introduction

Nowadays, hydraulic fracturing is very useful for producing hydrocarbons from unconventional oil and gas reserves with very low permeability to create a large surface in contact with reserves. In this method, the fracture processes that occur during hydraulic fracturing of rocks are often not fully understood and need further investigation [1,2]. Acoustic emission (AE) is the sudden high-frequency elastic micro-seismic signals that are generated and emitted by the loading of an object. Acoustic emission is a phenomenon in which transient elastic waves are generated through the rapid release of energy into local sources in matter. Acoustic wave propagation test is one of the non-destructive testing methods. When solids are under stress, defects in them cause high-frequency acoustic waves. These waves are propagated in matter and can be received by special sensors, and by analyzing these waves, the type of defect, its location and severity can be determined [3-5].

Materials and Methods

The mix design for providing the artificial concrete specimen includes a combination of sand, cement, lime, and water. The mixing ratio has been based on weight: sand to cement = 3 to 1, sand to lime = 3 to 0.25. Moreover, the water added to this combination has been 0.25 ratio to sand and 0.75 ratio to cement. For exiting bubble and causing vibration while concreting, ASTM standards have been applied in a way that specimens were taken out of the mold

and put in water tank after stirring the materials put in the mold and after the passage of 24 hours since concrete placing. Then, after 7 days since putting the concrete in the mold, the specimens are left in open air to become ready for testing. Concrete placing the cubic specimens and placing them in a pool of water is shown in Figure 1.

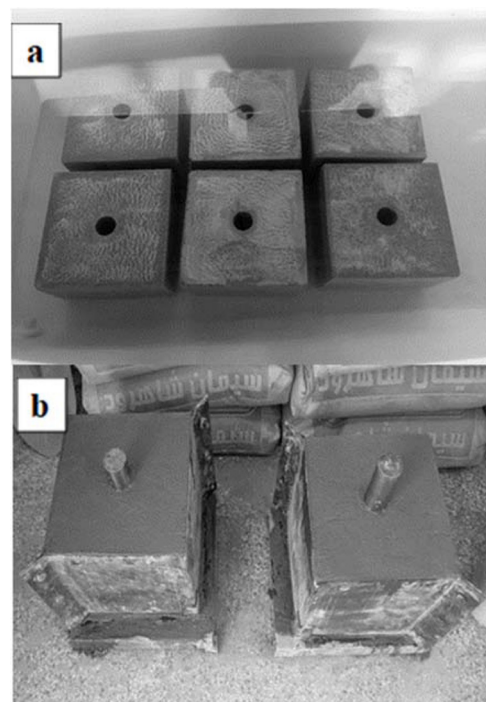


Fig. 1 a) Preparation of cubic specimens, b) Placement of specimens in a pool of water.

To investigate the crack propagation process in the hydraulic fracturing process, 2 cracks were created on 3 concrete specimens, 2 cracks on the cavity wall and in parallel and opposite to each other with a Hack saw. The cracks were placed parallel to the maximum horizontal stress. The aim is to investigate the effect of pre-manufactured crack and its effect on crack propagation, as well as a comparison between non-fissure and fissured specimens in similar stress compositions. The application of horizontal and vertical stresses is loaded in true triaxial stress. At the same time as fluid injection begins, acoustic emission behavior begins, and when fracture occurs in the specimen, the experiment is completed and a pressure drop occurs, which stops fluid injection and acoustic emission at the same time. Figure 2 shows the pre-manufactured crack and the process of its creation. The loading path of the true triaxial stress conditions is shown in Figure 3.

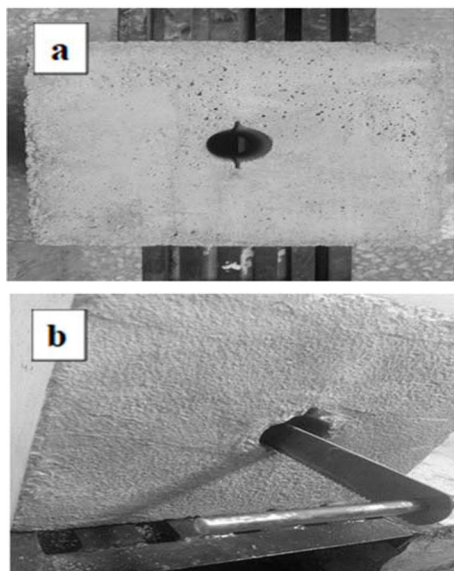


Fig. 2 Preparation of a fissured specimens, a) Pre-manufactured crack b) The process of creating a crack.

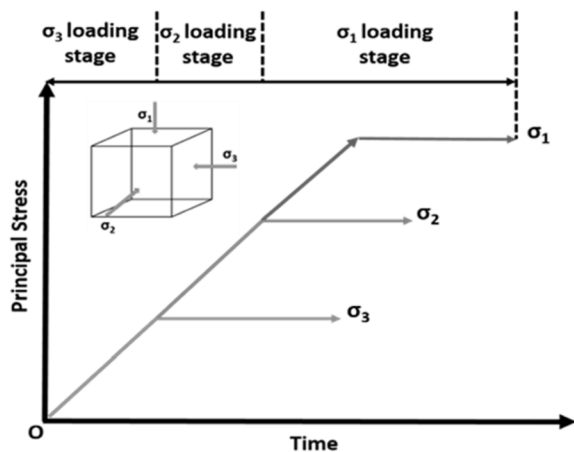


Fig. 3 Loading path of the true triaxial stress conditions

Results and Discussion

The effect of the pre-manufactured crack on the fluid injection pressure at the moment of fracture of the specimens is shown in Figure 4. Due to the pre-manufactured crack, fissured specimens have a lower fracture pressure than non-fissure specimens. Fracture pressure is clearly lower in fissured specimens and can be due to the presence of fissures due to the reduction and elimination of concentrated stresses around the hole, which plays an important role in initiating fracture and reducing the effect of stress conditions around the hole. The pre-manufactured crack relieves the stress concentration around the hole and reduces the fracture pressure. Pre-manufactured cracks provide a starting point for fracture propagation, and yet the fracture geometry changes as the amount of horizontal stress differences changes. This change in fracture geometry includes the difference in low horizontal stresses, which extends only along the pre-manufactured fracture crack, to the difference in high horizontal stresses, which causes the obvious deflection of the fracture to the maximum horizontal stress.

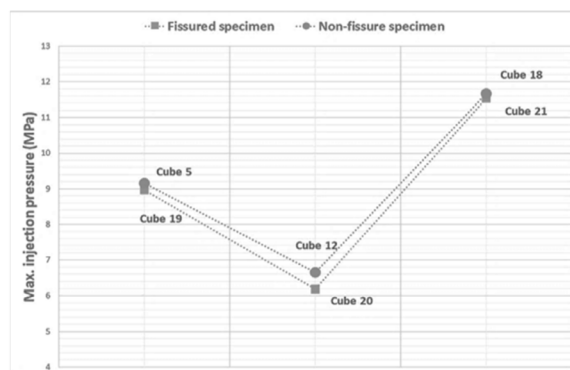


Fig. 4 The effect of the pre-manufactured crack on the fluid injection pressure at the moment of fracture of the specimens.

Acoustic emission parametric analysis method is performed based on acoustic emission signal parameters. The second method is waveform analysis which is based on amplitude - time analysis of acoustic emission waveform and signal spectrum analysis method to obtain acoustic signal waveform spectrum information. The acoustic waveform contains all the information such as stress state, structure, physical and mechanical properties of the specimen [3].

Conclusions

In this study, with the aim of in vitro investigation of the effect of pre-manufactured crack on hydraulic fracturing, hydraulic fracturing tests were performed under true triaxial stress conditions for fissured and non-fissure specimens with acoustic emission behavior. The most important results of this research are stated below.

1. pre-manufactured crack in fissured specimens

reduce the fracture pressure of specimens and the magnitude of the horizontal stresses difference clearly affects the crack propagation path during the hydraulic fracturing test.

2. In fissured specimens, the AE count is higher than that non-fissure specimens, and a large number of AE events and a large count at the moment of maximum injection pressure have been observed. The pre-manufactured crack causes the crack to deflect, which increases the work done on the specimens, resulting in more AE signals being received.

3. During the fluid injection time, tensile and shear cracks in fissured specimens are more than non-fissure specimens. More shear cracks are created in the fissured specimens and consequently they have a higher cumulative energy AE due to the crack deflection and irregular fracture in these specimens.

4. b-value is lower for fissured specimens and more micro cracks are formed in these specimens and the probability of strong events and brittle fractures is less. In fissured specimens, the pre-manufactured crack causes a more continuous b-value fluctuation by eliminating the concentration of stress around the hole and creating more micro cracks and unlike non-fissure specimens, where the sudden burst of crack growth is greater, in fissured specimens the proportion of small

and large AE events is at a more stable level.

References

1. 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.
2. 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.
3. Li Q B (2015) Acoustic emissions in hydraulic fracturing of Barre granite, PhD Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, USA.
4. 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.
5. 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.

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر شکاف از پیش موجود بر شکافت هیدرولیکی با استفاده از انتشار آوایی

علی اسماعیل زاده^۱، مجید نیکخواه^{۲*} و حامد شیرازی^۲

۱- دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

۲- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه ولایت ایرانشهر، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۷/۱۶

چکیده

عملیات شکافت هیدرولیکی به عنوان یکی از متداول ترین روش های ازدیاد برداشت چاه های نفت و گاز برای تولید مخازن نامتعارف و همچنین تولید بیشتر در مخازن، به کار برده می شود. تعیین راستای گسترش شکستگی و هندسه شبکه شکستگی ایجاد شده توسط فرآیند شکافت هیدرولیکی در افزایش نفوذپذیری مخزن نقش مهمی دارد. در این تحقیق به منظور درک بهتر مکانیزم ایجاد و گسترش ترک ها در فرآیند شکافت هیدرولیکی از انتشار آوایی (اکوستیک) استفاده شده است. آزمایش ها بر روی نمونه های بلوکی بتنی تحت شرایط تنش سه محوره واقعی انجام شده و رفتارنگاری انتشار آوایی هم زمان با تزریق سیال به درون نمونه صورت گرفته است. به منظور بررسی رفتارهای انحراف ترک در فرآیند شکافت هیدرولیکی و تأثیر شکستگی های طبیعی سازند بر آن، از نمونه های شکافدار استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می دهند که شکاف از پیش موجود، فشار شکست نمونه ها را کاهش داده و مقدار اختلاف تنش افقی، مسیر انتشار ترک را در طول آزمایش شکافت هیدرولیکی تحت تأثیر قرار می دهد. از رفتارنگاری انتشار آوایی در حین آزمایش های شکافت هیدرولیکی نتیجه و پاسخ مفیدی در تحلیل فرآیند شکافت هیدرولیکی به دست آمده و تحلیل داده های انتشار آوایی نشان می دهند که نوع ترک های ایجاد شده، اغلب ترک های کششی هستند.

کلمات کلیدی: شکافت هیدرولیکی، انتشار آوایی، تنش سه محوره واقعی، شکاف از پیش موجود، ازدیاد برداشت.

مقدمه

ذخایر بسیار کاربردی است. در این روش، فرآیندهای شکستگی که هنگام شکافت هیدرولیکی سنگ ها اتفاق می افتد، اغلب به طور کامل شناخته نشده اند و نیاز به بررسی بیشتر دارند.

امروزه شکافت هیدرولیکی^۱ برای تولید هیدروکربن از ذخایر نفت و گاز غیرمتعارف (نفوذپذیری بسیار کم) برای ایجاد افزایش تراوایی با ایجاد شکستگی در

*مسئول مکاتبات

m.nikkhah@shahroodut.ac.ir

آدرس الکترونیکی

شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4800.3151)

شکستگی در آزمایش‌های شکافت 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 ساز و کار ناپایداری در نزدیکی چاه و نمونه آزمایشگاهی در معرض شکافت هیدرولیکی است [۷]. اولین رفتار شکافت هیدرولیکی غیراسیدی برای تحریک چاه در شهر کانزاس آمریکا در یک چاه گاز در میدان هوگوتون^۲ انجام شد [۸]. از چاه‌های تولیدی حفر شده در شمال آمریکا از سال ۱۹۵۰ تاکنون، حدود ۷۰٪ چاه‌های گاز و ۵۰٪ چاه‌های نفت به روش شکافت هیدرولیکی افزایش ظرفیت یافته‌اند [۷]. در چند دهه‌ای که از عمر این روش می‌گذرد، مطالعات گسترده‌ای بر روی نحوه اجرای روش و مؤلفه‌های تأثیرگذار بر روی نتایج آن به همراه رفتارنگاری انتشار آوایی، توسط محققین و دانشمندان مختلف انجام شده است، که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. استانچیتس و همکاران انتشار آوایی از آغاز شکافت 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 به‌طور قابل توجهی نشانگر روند ادغام ریزترک‌ها در هنگام شکافت هیدرولیکی است [۱۰]. همپتون به خصوصیات شکافت هیدرولیکی آزمایشگاهی با استفاده از انتشار آوایی پرداخت. رفتارنگاری AE در آزمایش‌های شکافت 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 [۶]. علاوه بر بررسی تجربی جنبه‌های ژئومکانیکی سازندهای غیرمتعارف شکافت هیدرولیکی پرداخته است.

هدف اصلی از انجام شکافت هیدرولیکی در پروژه‌های نفت و گاز، 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 ناحیه زهکشی شده یا مقدار تحت تأثیر سازند مرتبط با چاه و همچنین، مرتبط ساختن بخش قائم مخزن به چاه مایل یا افقی است [۱-۳]. تعیین راستای گسترش شکستگی و هندسه شبکه شکستگی‌های ایجاد شده توسط فرآیند شکافت هیدرولیکی در افزایش نفوذپذیری مخزن نقش مهمی دارد. محیط مخزن حاوی شکستگی‌های طبیعی است و اندرکنش شکافت هیدرولیکی با این شکستگی‌ها در تعیین هندسه شبکه شکستگی‌های ایجاد شده اهمیت زیادی دارد. ناپیوستگی‌های قرار گرفته در مسیر ترک و ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر روند پیشروی شکافت هیدرولیکی و هندسه آن شناخته می‌شوند. انتشار آکوستیک (AE)^۱ سیگنال‌های ناگهانی میکرو لرزه‌ای الاستیک با فرکانس بالا است 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 آوایی یکی از روش‌های آزمون‌های غیر مخرب^۲ است. وقتی که ماده‌ای جامد تحت تنش است، عیوب موجود در آن باعث ایجاد امواج آوایی (اکوستیک) 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 [۴-۶]. رفتارنگاری انتشار آوایی در مقیاس آزمایشگاهی قادر به بررسی شکستگی با دامنه کم است و به بررسی مناسب‌تر روند شکافت هیدرولیکی در مقیاس میدانی کمک می‌کند. ترکیبی از فشار شکست و هندسه

1. Acoustic Emission

2. NonDestructive Testing – NDT

3. Hugoton

تعدادی آزمایش شکافت هیدرولیکی بر روی نمونه‌های مصنوعی گچ انجام شده است. هدف از آزمایش‌ها بررسی دقیق تقاطع شکافت هیدرولیکی با شکستگی‌های قبلی با ارزیابی برخی از عوامل حاکم بر نتایج آن است [۱۱]. استوکرت و همکاران به انتشار شکستگی در ماسه‌سنگ، انتشار آوایی و مکانیک شکست پرداخته‌اند. آن‌ها یک سری آزمایش‌های شکستگی کششی تحت بارگذاری تک محوره و سه محوره انجام داده‌اند [۱۲]. استانچیتس و همکاران به آزمایش شکافت هیدرولیکی که توسط انتشار آوایی بررسی می‌شود، پرداخته‌اند. نظارت بر مکان‌یابی‌های انتشار آوایی، نشان‌دهنده منطقه شکستگی ایجاد شده از جمله تقاطع با شکاف‌های از پیش موجود، انتشار سیال در طول شکاف‌ها، عبور از شکاف‌ها و نزدیک شدن به مرزهای بلوک است [۱۳]. ژائو و همکاران مطالعه آزمایشگاهی اثرات بین لایه‌ها در انتشار شکافت 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 [۱۴]. شیرازی و همکاران بر روی تأثیر ویسکوزیته سیال و قطر چال بر شکافت هیدرولیکی مطالعه کردند. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش قطر گمانه، فشار شکست سنگ کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ویسکوزیته سیال، فشار شکست کاهش می‌یابد [۱۵]. مائو و همکاران به آزمایش شکافت هیدرولیکی روی نمونه‌های گرانیته پیش ترک خورده در مقیاس بزرگ پرداخته‌اند. انتشار آوایی در کل فرآیند شکستگی توسط یک سیستم اندازه‌گیری انتشار آوایی ثبت شده است. مقدار اختلاف تنش افقی در طول آزمایش‌ها به وضوح مسیر انتشار ترک را در طول فرآیند شکستگی تحت تأثیر قرار داده است [۱۶]. لی و همکاران تحلیل تجربی رشد شکستگی هیدرولیکی و پاسخ انتشار آوایی در یک سازه لایه‌ای را مورد بررسی قرار

داده‌اند. نتایج تجربی نشان داد که اغلب شکست برشی در نمونه‌های شیل وجود دارد و شکست برشی و کششی در مناطق شکافت هیدرولیکی ایجاد شده است [۱۷]. فانگ و همکاران یک تفسیر هندسی گسترش شکستگی هیدرولیکی و انتشار آوایی را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که AE در مکانی که هندسه شکافت هیدرولیکی پیچیده‌تر و متراکم‌تر است وجود دارد [۱۸]. لیانگ و همکاران ویژگی‌های پاسخ زغال‌سنگ در معرض شکافت هیدرولیکی با رفتارنگاری انتشار آوایی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد می‌توان از پاسخ انتشار آوایی برای شناسایی جهت شکستگی در حین شکافت هیدرولیکی استفاده کرد [۱۹]. لی و همکاران پاسخ انتشار آوایی آزمایش شکافت هیدرولیکی در شیل لایه‌ای را بررسی کرده‌اند [۲۰]. ناوی و همکاران رابطه بین وقایع لرزه‌ای و شکستگی ناشی از شکافت هیدرولیکی را در آزمایش‌های آزمایشگاهی تحت شرایط بارگذاری تک محوره با رفتارنگاری انتشار آوایی را بررسی کرده‌اند [۲۱]. جیوانگ و همکاران به شکافت هیدرولیکی چرخشی مغزه‌های گرانیته و تأثیر آن بر فشار شکست، دامنه‌های انتشار آوایی و نرخ تزریق پرداخته‌اند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد تزریق چرخشی آب، فشار شکست را تقریباً تا ۲۰٪ کاهش می‌دهد و حداکثر دامنه انتشار آوایی به‌طور متوسط ۱۴ dB کاهش می‌یابد [۲۲]. وانگ و همکاران بررسی تجربی شکافت هیدرولیکی در سازند شیل لایه‌ای را انجام داده‌اند. آن‌ها نشان دادند که شکافت هیدرولیکی از لایه‌های تحت اختلاف تنش بالا عبور می‌کند، درحالی‌که همراه با لایه‌های تحت اختلاف تنش کم گسترش می‌یابد [۲۳]. جیانگ و همکاران به ویژگی‌های انتشار آوایی در شکافت هیدرولیکی براساس یک مطالعه آزمایشگاهی پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد ترک کششی در تمام آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی بیشتر است [۲۴].

بتن ریزی براساس استانداردهای ASTM عمل شده است، به طوری که پس از هم زدن مصالح ریخته شده در قالب و گذشت ۲۴ h از بتن ریزی، میله فولادی را از مرکز نمونه ها خارج کرده و نمونه ها را نیز از قالب ها خارج کرده و در حوضچه آب قرار داده شدند. سپس بعد از گذشت ۷ روز از بتن ریزی، نمونه ها در محیط آزاد قرار گرفته تا برای انجام آزمایش آماده شوند. بتن ریزی نمونه های مکعبی و قرار دادن آن ها در حوضچه آب در **شکل ۱** آورده شده است. مراحل بتن ریزی و طرح اختلاط برای همه نمونه ها یکسان در نظر گرفته شده است. متوسط مقاومت فشاری نمونه ها $24/94 \text{ MPa}$ و متوسط مقاومت کششی نمونه ها $3/20 \text{ MPa}$ بوده است.

برای بررسی در خصوص روند گسترش ترک در فرآیند شکافت هیدرولیکی، به وسیله آره لنگ بر روی ۳ نمونه بتنی، ۲ شکاف بر روی دیواره حفره و به صورت موازی و مقابل هم ایجاد شده اند که شکاف ها موازی با تنش افقی حداکثر قرار گرفته است. هدف بررسی تأثیر شکاف از پیش موجود و تأثیر آن در روند گسترش ترک و همچنین مقایسه ای بین نمونه های بدون شکاف و شکاف دار در ترکیبات تنش مشابه است. عمق این شکاف ها 10 mm و ضخامت آن ها در حدود 4 mm هستند. **شکل ۲** شکاف از پیش موجود و روند ایجاد آن را نشان می دهد.

در پژوهش حاضر مطالعه آزمایشگاهی بر روی نمونه های بلوکی بتنی تحت شرایط تنش سه محوره واقعی انجام شده و رفتارنگاری انتشار آوایی هم زمان با تزریق سیال به درون نمونه برای شبیه سازی آزمایش شکافت هیدرولیکی صورت گرفته است. به منظور بررسی توسعه ترک خوردگی در فرآیند شکافت هیدرولیکی تحت تأثیر شکستگی های طبیعی سازند بر آن، از نمونه های شکاف دار استفاده شده است. در راستای نیل به اهداف تحقیق، تأثیر شکاف موجود در نمونه بر میزان فشار شکافت هیدرولیکی همراه با تحلیل داده های رفتارنگاری انتشار آوایی هم زمان با انجام آزمایش های شکافت هیدرولیکی صورت پذیرفته است.

آماده سازی و روش کار

تهیه نمونه

طرح اختلاط برای تهیه نمونه مصنوعی پایه بتنی 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 $0/25$ در نظر گرفته شده است. همچنین مقدار آب اضافه شده به این ترکیب نیز $0/25$ واحد نسبت به ماسه و $0/75$ واحد نسبت به سیمان است. برای خروج حباب و ایجاد ارتعاش در حین

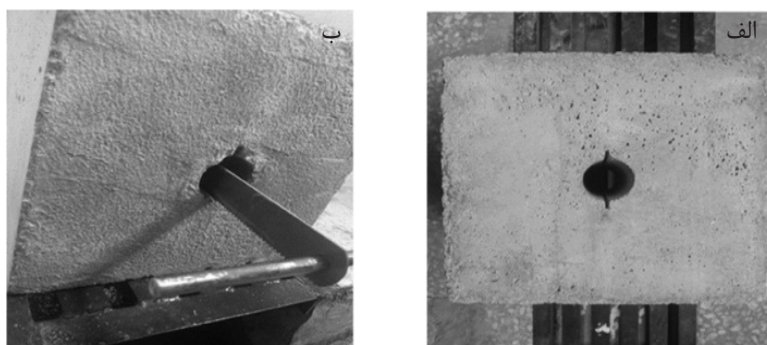


ب



الف

شکل ۱ الف) تهیه نمونه های مکعبی و ب) قرار دادن نمونه ها در حوضچه آب



شکل ۲ تهیه نمونه شکاف دار: الف) شکاف از پیش موجود و ب) روند ایجاد شکاف

تجهیزات

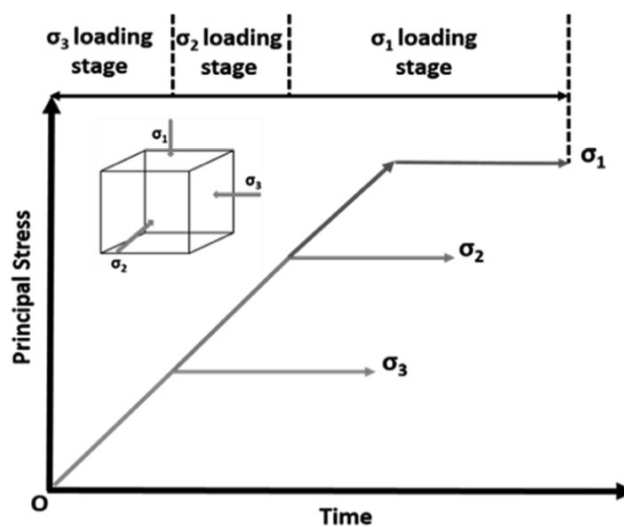
برای انجام آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی از دستگاه سه محوره واقعی با قابلیت شبیه‌سازی ایجاد شکستگی هیدرولیکی استفاده شده است. این دستگاه شامل محفظه اعمال فشار، واحد تزریق، واحد هیدرولیک و واحد جمع‌آوری و نظارت بر داده‌ها است [۱۵]. شکل ۳ اجزای مختلف دستگاه سه محوره واقعی را نشان می‌دهد. در این تحقیق برای رفتارنگاری انتشار آوایی از دستگاه AMSY-6 مدل MB2 ساخت شرکت Vallen کشور آلمان استفاده شده است. سنسور استفاده شده به نام VS900-M یک سنسور پیزوالکتریک AE است که دارای محدوده فرکانسی ۱۰۰ تا ۹۰۰ kHz و فرکانس حداکثر آن ۳۵۰ kHz است. نرم‌افزار Vallen AE-Suite برای دستیابی به داده‌ها و پردازش داده‌های اندازه‌گیری AE ارائه شده است [۲۵]. در آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی برای سیال تزریقی، از روغن هیدرولیک ۶۸ h در همه آزمایش‌ها استفاده شده است. برای آب‌بندی انتهای حفره موجود در نمونه‌های مکعبی، از چسب سنگ استفاده شده است. در آزمایش شکافت هیدرولیکی، از ۴ سنسور پیزوالکتریک انتشار آوایی استفاده شده است. به منظور نصب سنسورها، صفحه‌های فلزی طراحی شد که بین نمونه و جک‌های هیدرولیکی دستگاه قرار می‌گیرد و سنسور درون این صفحات جانمایی شده است. یک محفظه نیز برای سنسور ایجاد شده است که در آن قرار می‌گیرد و در اطراف دیواره‌های جانبی سنسور از فوم استفاده شده است.

روش کار

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. مسیر بارگذاری شرایط تنش سه محوره واقعی در شکل ۴ آورده شده است. 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 آوایی 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 آوایی متوقف می‌شوند. برای بررسی تأثیر شکاف‌ها برروی فشار شکست نمونه‌ها، ترکیبات تنش مشابه که برروی نمونه‌های بدون شکاف آزمایش شده است، برروی ۳ نمونه دارای شکاف اعمال شده است. شکاف‌ها برروی دیواره حفره و به صورت موازی و مقابل هم ایجاد شده‌اند که در داخل دستگاه به صورت موازی با تنش افقی حداکثر قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از آزمایش نمونه‌های شکاف دار و بدون شکاف در ترکیبات تنش مشابه در جدول ۱ آورده شده است.



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



شکل ۴ مسیر بارگذاری شرایط تنش سه محوره واقعی

جدول ۱ نتایج به‌دست آمده از آزمایش نمونه‌های شکاف‌دار و بدون شکاف در ترکیبات تنش مشابه

نوع نمونه	فشار شکستگی (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

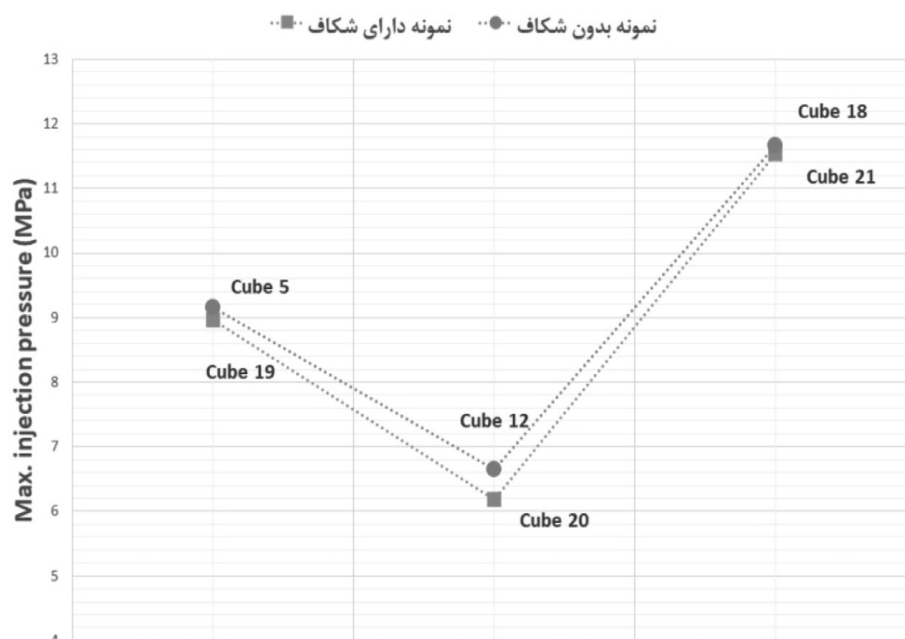
نتایج و بحث

تأثیر شکاف از پیش موجود برروی فشار شکافت هیدرولیکی

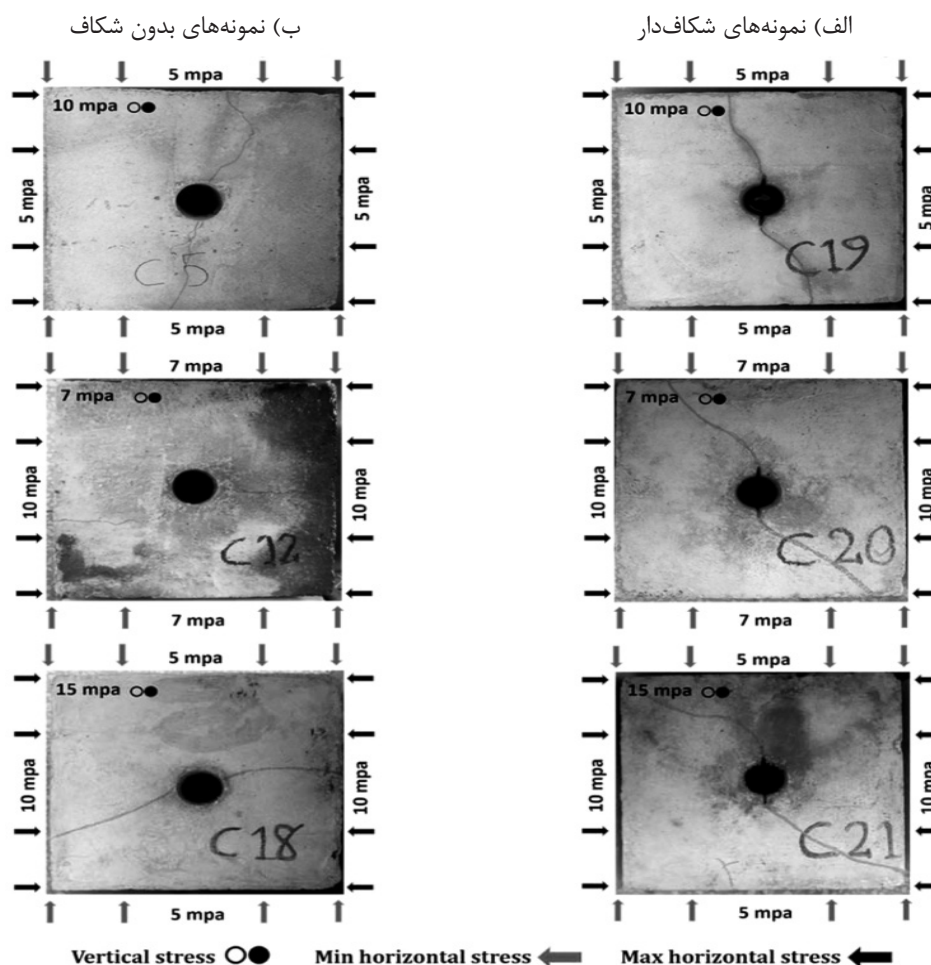
تأثیر شکاف از پیش موجود بر فشار تزریق سیال در لحظه شکست نمونه‌ها در شکل ۵ آورده شده است. آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی برروی نمونه‌های شکافدار باعث تغییر فشار شکست می‌شوند و اهمیت شکاف‌های طبیعی را در شروع و گسترش شکافت هیدرولیکی نشان می‌دهد. به‌علت وجود شکاف از پیش موجود، نمونه‌های شکافدار نسبت به نمونه‌های فاقد شکاف، فشار شکست پایین‌تری دارند. فشار شکستگی در نمونه‌های شکافدار به‌وضوح پایین‌تر است و می‌تواند به‌دلیل 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 شکستگی و شکاف از پیش موجود برروی هندسه شکست نیز تأثیر دارد و باعث پیچیده شدن هندسه شکستگی می‌شود.

تحلیل هندسه شکافت هیدرولیکی

شکستگی‌های هیدرولیکی در جهت عمود بر تنش افقی حداقل ایجاد می‌شوند. معمولاً شکستگی‌های هیدرولیکی در یک مسیر پرپیچ و خم که به‌طور 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 به‌همراه مقاومت کششی، کمتر از تنش قائم ناشی از وزن روباره شود. این مورد مربوط به شکست دیواره گمانه است که در یک صفحه شکافت هیدرولیکی قائم، ایجاد می‌شود. در شکل ۶ هندسه شکست نمونه‌های شکافدار و بدون شکاف تحت آزمایش شکافت هیدرولیکی سه محوره واقعی نشان داده شده است. هنگامی که تنش‌های افقی متفاوت هستند و به عبارتی دیگر، حالت ناهمسان‌گرد در تنش‌ها باشند، شکستگی‌های هیدرولیکی در راستای تنش افقی حداکثر گسترش می‌یابند و هنگامی که تنش‌های افقی برابر باشند و حالت همسانگرد در تنش‌ها برقرار باشد، شکستگی‌های هیدرولیکی به‌صورت تصادفی شعاعی گسترش می‌یابند.



شکل ۵ تأثیر شکاف از پیش موجود بر فشار تزریق سیال در لحظه شکست نمونه‌ها



شکل ۶ هندسه شکستگی هیدرولیکی: الف) نمونه‌های شکاف‌دار و ب) نمونه‌های بدون شکاف در ترکیبات تنش مشابه

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 است، 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.

با توجه به شکل ۶، 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

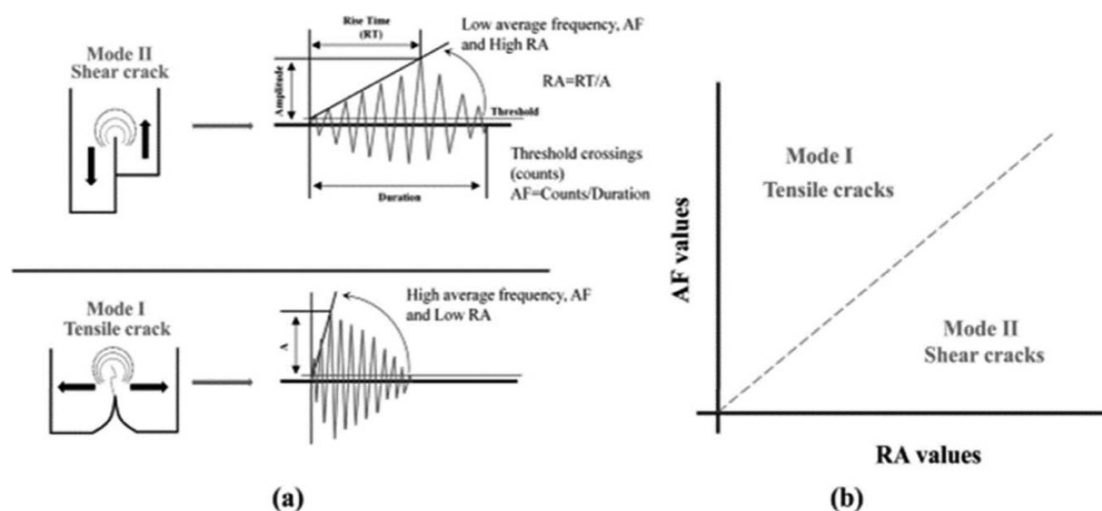
متوسط و زاویه خیز برای ترک‌های کششی و برشی در شکل ۷ مشاهده می‌شود [۲۸].

پارامتر شمارش (کانت) AE

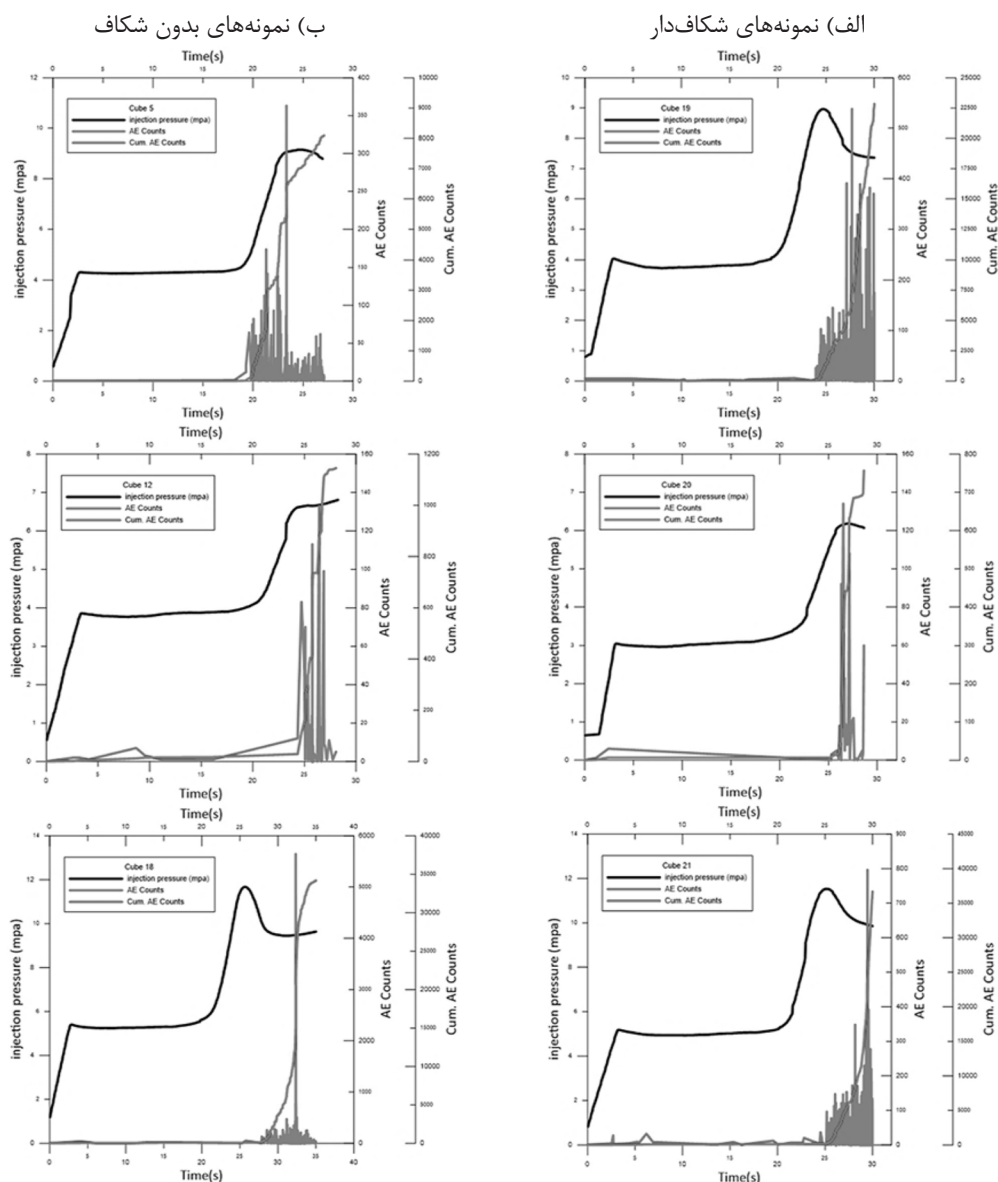
یکی از پارامترهای مهم انتشار آوایی، بررسی تغییرات تعداد شمارش^۱ و مقدار تجمعی شمارش است و به تعداد پالس‌های عبوری از حد آستانه که توسط پردازشگر سیگنال AE دریافت می‌شود، گفته می‌شود. فعالیت انتشار آوایی در لحظه حداکثر فشار تزریق سیال، افزایش یافته است. به وسیله AE می‌توان نقطه شکست نمونه‌ها را تعیین و اندازه‌گیری کرد. نتایج آزمایش مقدار شمارش و تجمعی شمارش AE در شکل ۸، همراه با فشار تزریق سیال در طول زمان آزمایش نشان داده شده است. با توجه به شکل‌ها فعالیت انتشار آوایی 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 و سپس شکستگی‌ها به سرعت به سطح نمونه گسترش یافته‌اند. پس از نقطه حداکثر فشار تزریق، مقدار شمارش AE نیز کاهش می‌یابد.

تحلیل نتایج رفتارنگاری AE آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی

روش تحلیل پارامتری انتشار آوایی براساس پارامترهای سیگنال انتشار آوایی انجام می‌شود. روش دوم تحلیل شکل موج که براساس تجزیه و تحلیل شکل موج دامنه زمان انتشار آوایی و روش تحلیل طیف سیگنال برای به دست آوردن اطلاعات طیف شکل موج سیگنال آوایی است. شکل موج آوایی تمام اطلاعاتی مانند وضعیت تنش، ساختار خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه را در بر می‌گیرد [۲۶]. با استفاده از انتشار آوایی تولید شده، می‌توان نوع ترک خوردگی (کششی یا برشی) را بررسی کرد. ترک‌های کششی و برشی انواع مختلفی از شکل موج‌های AE را منتشر می‌کنند، طبقه‌بندی نوع ترک را با استفاده از پارامترهای AE می‌توان مورد مطالعه قرار داد. این روش طبقه‌بندی قادر به شناسایی سه مرحله فرآیند بارگذاری، یعنی مرحله تولید ترک کششی، مرحله تغییر نوع ترک و مرحله تولید ترک برشی است [۲۷]. ترک‌های کششی موجود در مقایسه با ترک‌های برشی امواجی با زاویه خیز پایین و فرکانس متوسط بالا تولید می‌کنند. تشخیص امواج آوایی وقتی شکست کششی و برشی رخ می‌دهد و محدوده فرکانس



شکل ۷ روش طبقه‌بندی ترک‌ها (a) شکل موج (b) روش طبقه‌بندی ترک [۲۶]



شکل ۸ نمودار تغییرات مقدار شمارش، شمارش تجمعی و فشار تزریق سیال: الف) نمونه‌های شکافدار و ب) نمونه‌های بدون شکاف

تزریق سیال به بسته شدن ریز ترک‌ها و تشکیل آن‌ها در مرز ذرات ساختار نمونه‌ها اشاره دارد که با به‌وجود 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.

همچنین، مقدار تجمعی شمارش AE تا زمان ایجاد شکست، متناسب با مقدار اختلاف تنش‌های جانبی است. مقدار شمارش AE و تجمعی شمارش AE برای ترکیب تنش همسانگرد بیشتر است. با مشاهده مقدار شمارش 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. تغییرات مقدار شمارش AE در مرحله اول

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.

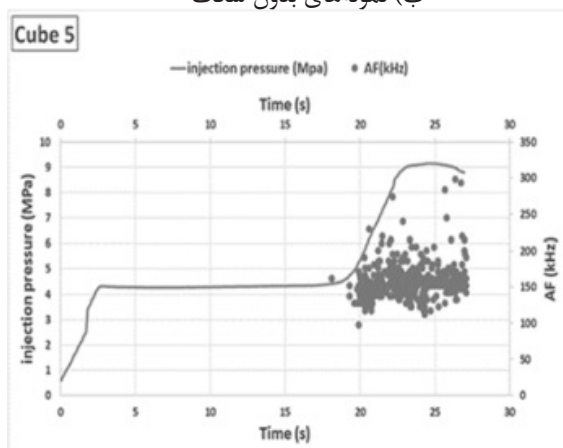
فرکانس متوسط، زاویه خیز و طبقه‌بندی نوع ترک‌ها

نسبت تعداد شمارش‌ها به مدت زمان^۱ موج AE که با AF^۲ نشان داده می‌شود را فرکانس (فراوانی) متوسط می‌گویند. مقدار^۳ RA نشان‌دهنده نسبت زمان خیز^۴ به دامنه موج^۵ AE است. ترک نوع کششی به صورت سیگنال AE با فرکانس متوسط بالا و مقدار زاویه خیز پایین تعیین شده و ترک برشی با فرکانس متوسط پایین و مقدار زاویه خیز بالا مشخص می‌شود. فرکانس متوسط (AF) و زاویه خیز (RA) نمونه‌های شکافدار در کنار نمونه‌های بدون شکاف به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ به همراه فشار تزریق سیال در طول زمان آزمایش نشان داده شده است. 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

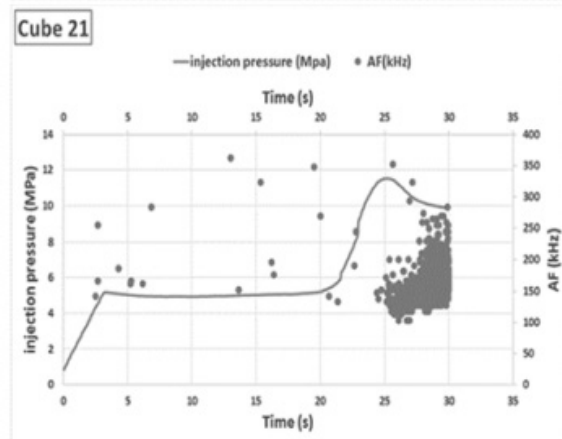
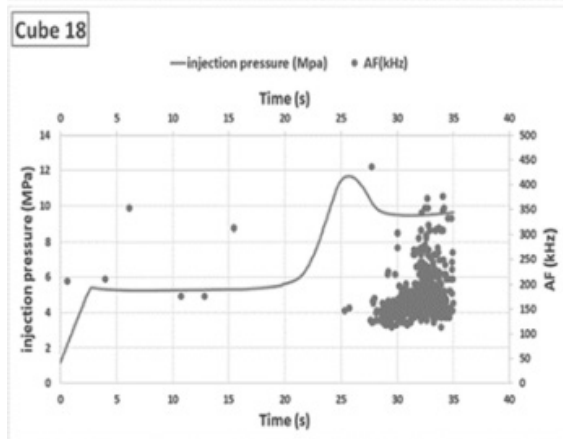
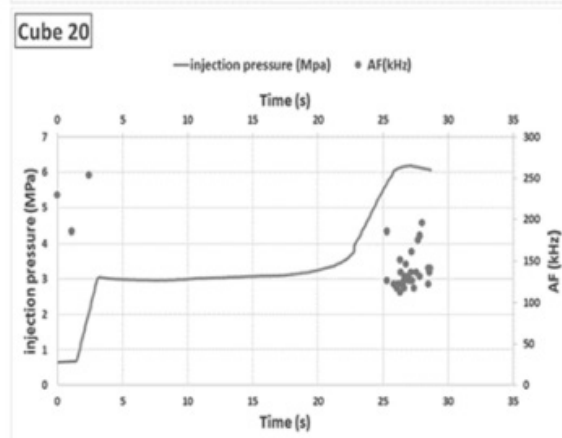
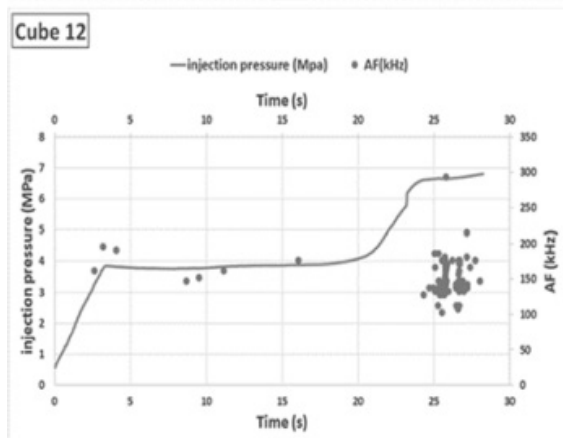
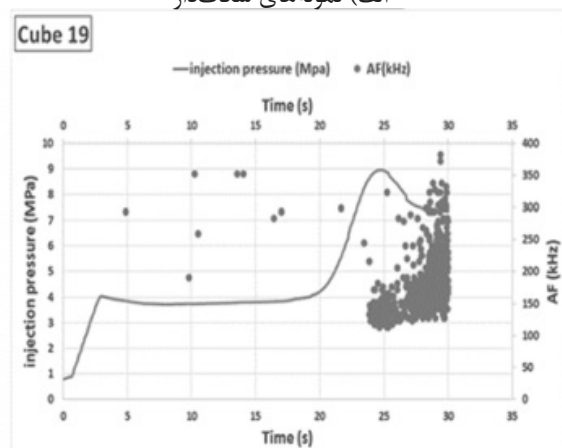
AF کاهش می‌یابد تا پایان مرحله دوم که شامل ایجاد ماکروترک‌ها در اثر تزریق سیال می‌باشد، این روند باقی می‌ماند. در مرحله آخر لحظه‌ای که فشار تزریق نقطه حداکثر خود را سپری کرده است، سیال نشت می‌کند و باعث افت فشار تزریق می‌شود، نمونه به شکست می‌رسد و ماکروترک‌ها در حال باز شدن از یکدیگر هستند. در این مرحله، RA کاهش می‌یابد ولی AF در این لحظه افزایش می‌یابد. مقدار فرکانس متوسط برای نمونه‌های شکافدار و بدون شکاف تفاوت زیادی ندارد. 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 طبقه‌بندی کرد. شکل ۱۱ طبقه‌بندی نوع ترک‌ها براساس AF-RA را نشان می‌دهد. شکست در طی فرآیند شکافت هیدرولیکی دارای دو مدل ترک یعنی ترک کششی و ترک برشی می‌باشد 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 Cube 20 > Cube 21 > Cube 19 می‌باشد و مقدار انرژی تجمعی AE رویدادهای برشی نیز به ترتیب برای نمونه‌های شکافدار Cube 20 > Cube 21 > Cube 19 می‌باشد.

1. Duration
2. Average Frequency
3. Rise Angle
4. Rise Time
5. Amplitude

ب) نمونه‌های بدون شکاف

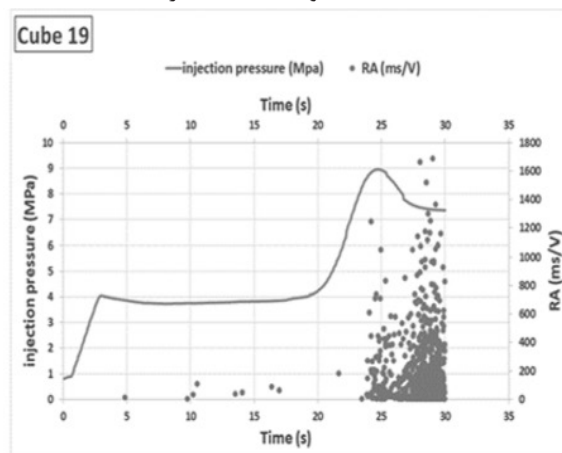


الف) نمونه‌های شکافدار

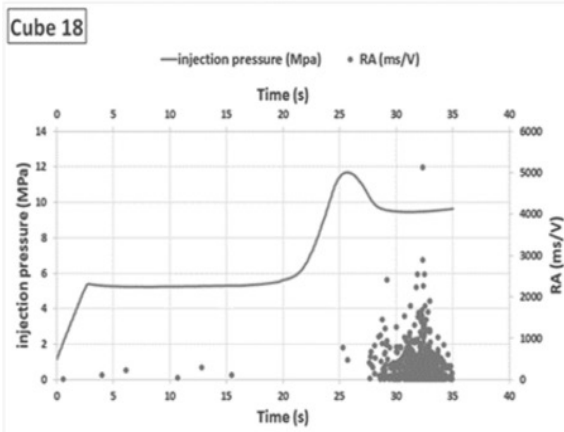
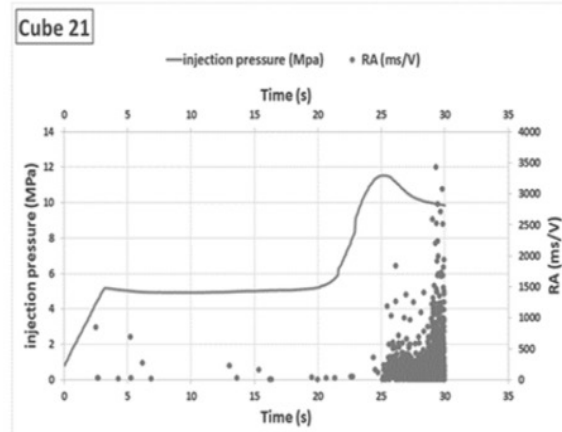
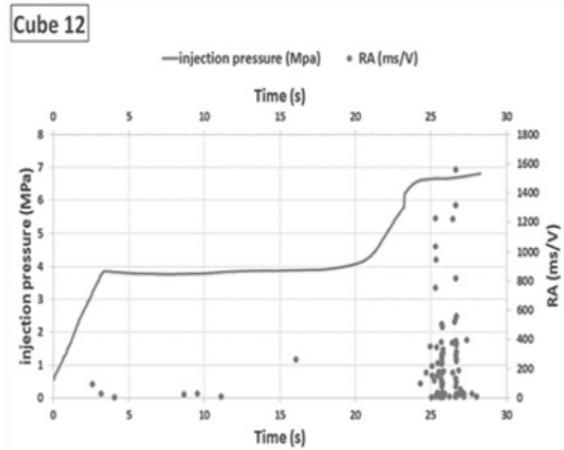
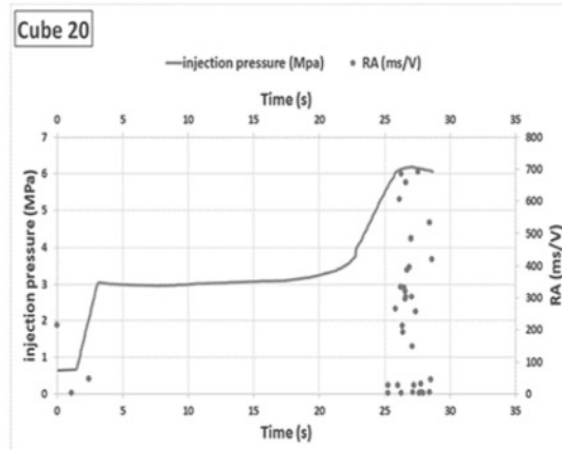
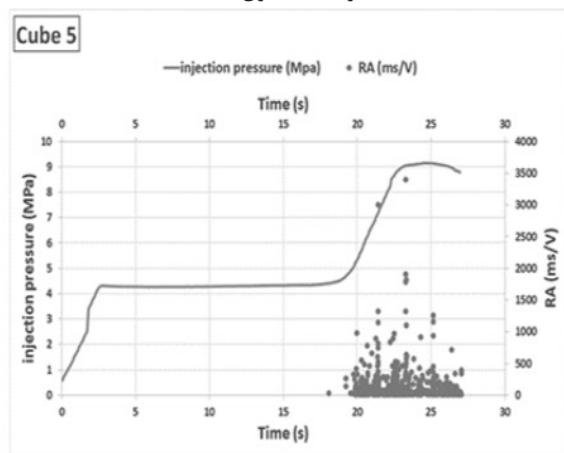


شکل ۹ نمودار تغییرات مقدار فرکانس متوسط و فشار تزریق سیال: الف) نمونه‌های شکافدار و ب) نمونه‌های بدون شکاف

الف) نمونه‌های شکاف‌دار

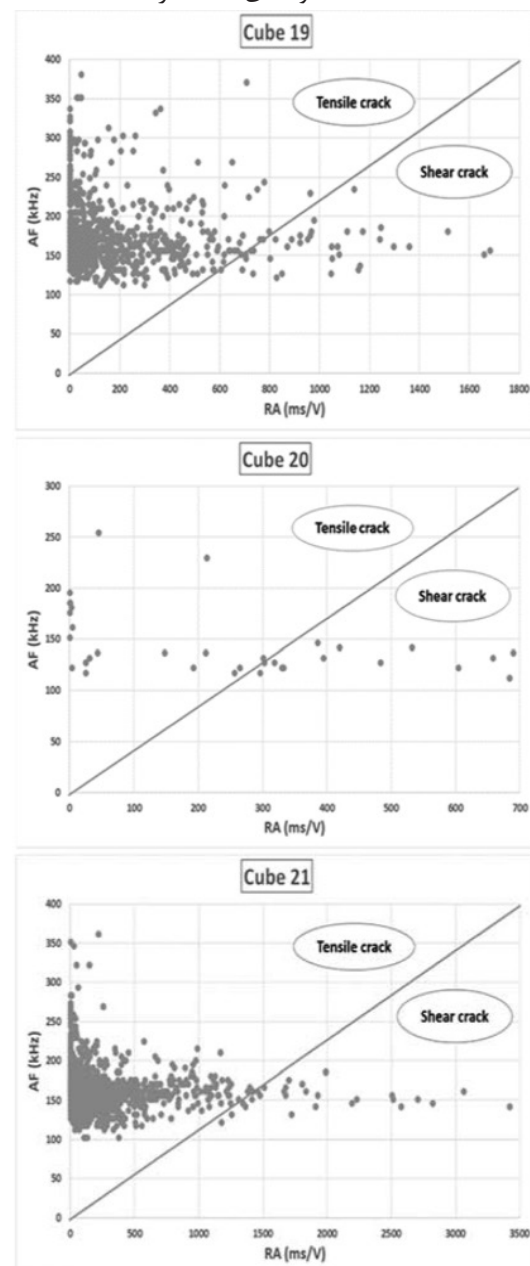


ب) نمونه‌های بدون شکاف

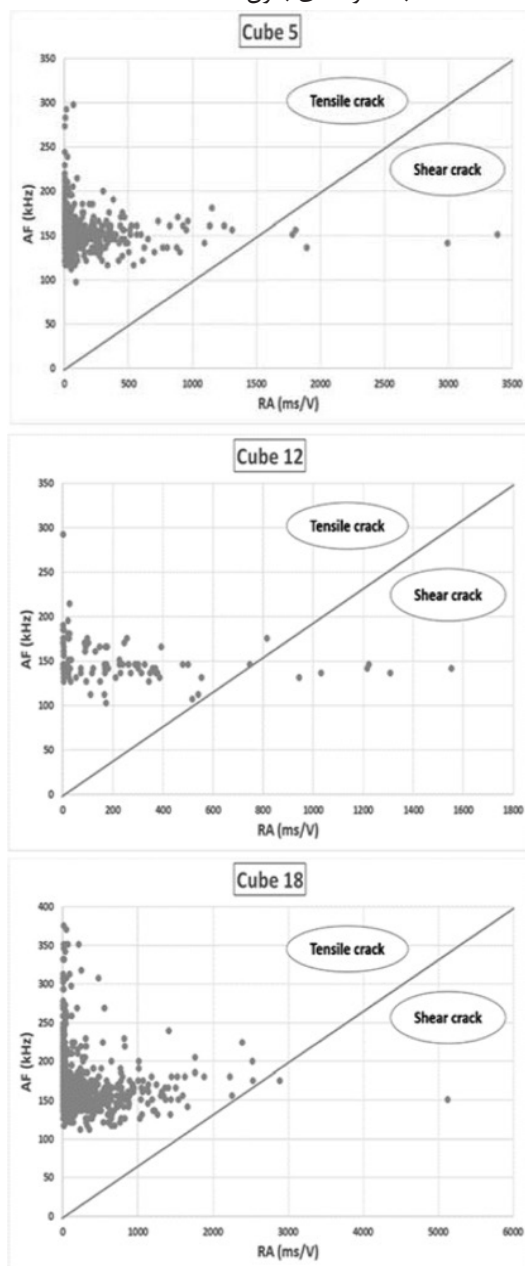


شکل ۱۰ نمودار تغییرات مقدار زاویه خیز و فشار تزریق سیال: الف) نمونه‌های شکاف‌دار و ب) نمونه‌های بدون شکاف

الف) نمونه‌های شکاف‌دار



ب) نمونه‌های بدون شکاف



شکل ۱۱ طبقه‌بندی نوع ترک‌ها برای آزمایش شکافت هیدرولیکی: الف) نمونه‌های شکاف‌دار و ب) نمونه‌های بدون شکاف

دلیل این که در نمونه‌های شکاف‌دار ترک برشی بیشتری ایجاد شده است و به دنبال آن دارای انرژی بیشتری 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 براساس روش RA-AF مدل

اصلی شکست، ترک‌های کششی هستند که در طول فرآیند 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.

نشان می‌دهد که تعداد رخدادها باید بین ۵۰ تا ۱۰۰ باشد (فرهیدزاده و همکاران) [۳۰]. مقدار $Ib-val$ 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 [۲۹]. از آنجایی که توزیع دامنه AE در طول آزمایش متفاوت است، مقادیر آماری مانند میانگین و انحراف استاندارد هر مجموعه دامنه در نظر گرفته می‌شود. شیواتانی و همکاران 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 [۳۱]:

$$Ib = \frac{\log_{10}(N(\mu + \alpha_1\sigma)) - \log_{10}(N(\mu - \alpha_2\sigma))}{\sigma(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (۳)$$

که در آن μ میانگین توزیع دامنه، σ انحراف استاندارد و α_1 و α_2 ثابت‌هایی هستند که توسط کاربر تعریف می‌شود که نشان‌دهنده ضرایب کران پایین و بالای دامنه هستند. مقادیر $b-val$ ue برای نمونه‌های شکافدار در مقابل نمونه‌های بدون شکاف در شکل ۱۲ ذکر شده است. همچنین، مقادیر $Ib-value$ به همراه فشار تزریق سیال در طول زمان آزمایش در شکل ۱۳ برای نمونه‌های بدون شکاف و شکافدار نشان داده شده است. دامنه حداکثر AE مربوط به بزرگی ترک‌های ایجاد شده در حین شکستگی است. ریزترک‌ها رویدادهای AE با دامنه پایین ایجاد می‌کنند، درحالی‌که ماکروترک‌ها رویدادهای AE با دامنه بالاتر ایجاد می‌کنند. برای تعیین شکستگی کلی براساس دامنه حداکثر، از مقدار $b-value$ استفاده می‌شود و به عنوان مقدار مطلق شیب توزیع تجمعی دامنه رویدادهای AE تعریف می‌شود. 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.

شکست برشی می‌تواند شرایط مناسب را برای گسترش شکست‌های بعدی ایجاد کند. همچنین می‌توان در فرآیند 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 فرآیند شکافت هیدرولیکی ایجاد کرد.

تحلیل $b-value$ و $Ib-value$

$b-value$ نمایان‌گر حوادث ضعیف و قوی است و ایجاد ریزترک باعث ترک خوردگی با مقدار $b-value$ بالا می‌شود و ایجاد ماکروترک باعث ترک خوردگی با مقدار $b-value$ کم می‌شود. وقتی تنش افزایش می‌یابد ریزترک‌ها به سمت به هم آمیختگی پیش می‌روند، و با افزایش تنش تا نقطه شکست، مقدار $b-value$ کم می‌شود $b-value$ معمولاً در زلزله‌شناسی کاربرد گسترده دارد و به صورت منفی و از نمودار لگاریتمی-خطی بین فرکانس زلزله و بزرگی آن به دست می‌آید (تعداد زلزله‌های بزرگتر از یک زلزله مشخص)، رابطه گوتنبرگ-ریشتر برای زلزله‌شناسی به صورت رابطه ۱ می‌باشد [۲۹].

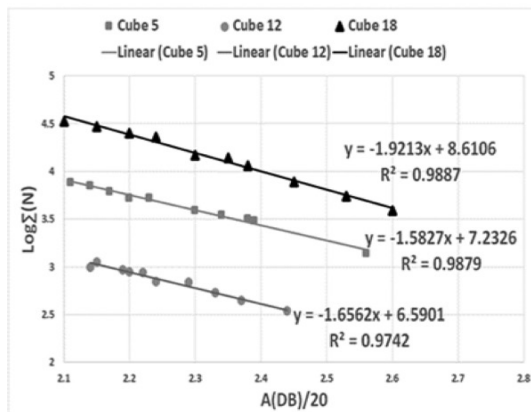
$$\log_{10}(N) = a - b M \quad (۱)$$

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 آوایی معمولاً از رابطه گوتنبرگ-ریشتر که بین فرکانس تجمعی و بزرگی زلزله است به دست می‌آید که به صورت زیر است [۲۹]:

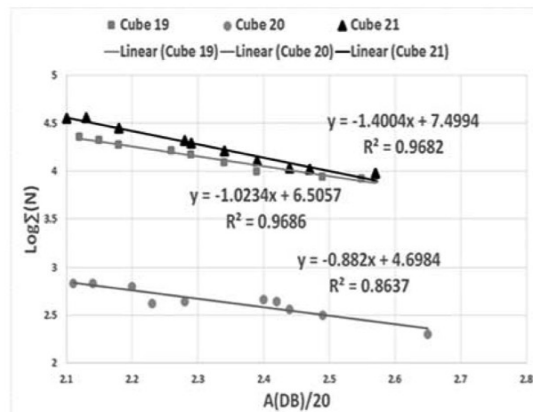
$$\log_{10}(N) = a - b \left(\frac{A_{dB}}{20} \right) \quad (۲)$$

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 رخداد‌های با دامنه بیشتر از A_{dB} می‌باشد، که تغییر ثوابت a و b در نمونه‌های مورد نظر بررسی شده است. مقدار $b-value$ بر روی مجموعه‌ای از ۵۰ رخداد از داده‌های AE ثبت شده انجام می‌شود، زیرا ادبیات گزارش شده

ب) نمونه‌های بدون شکاف

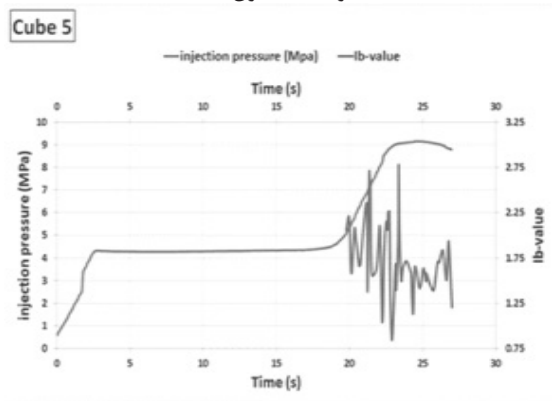


الف) نمونه‌های شکافدار

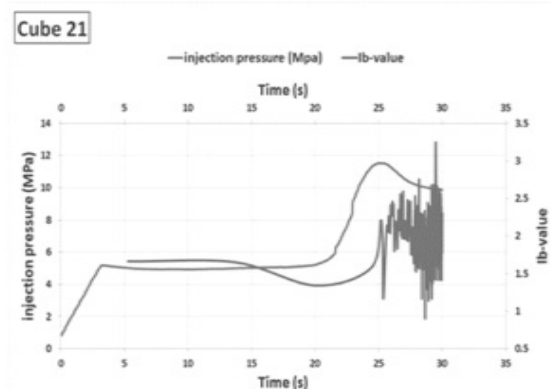
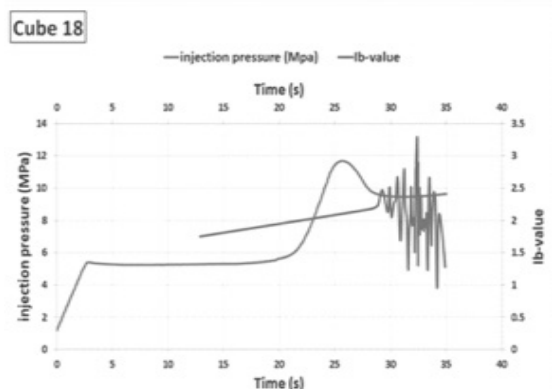
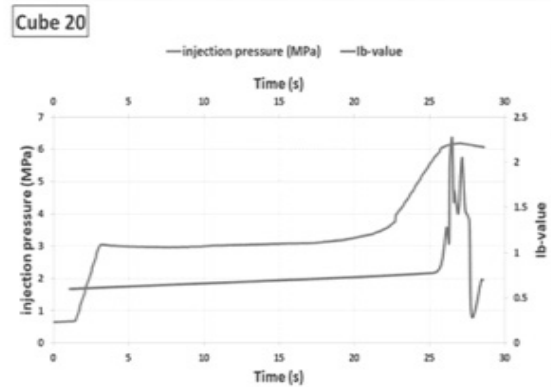
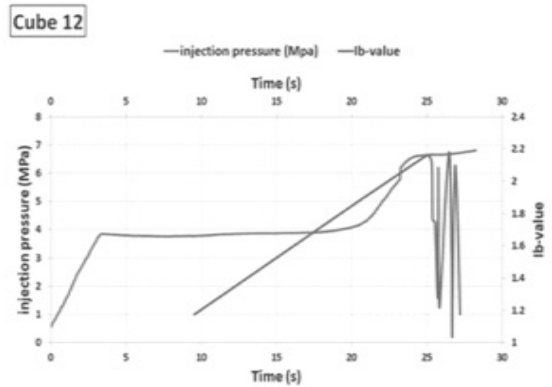
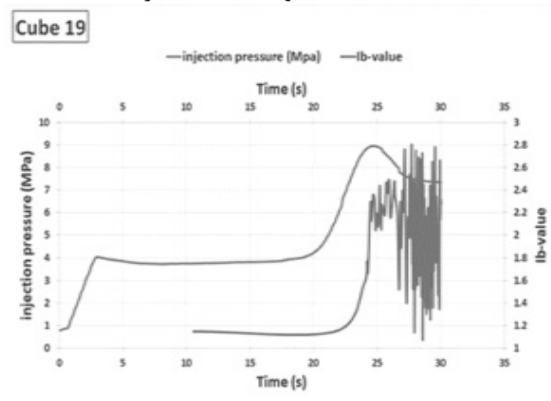


شکل ۱۲ مقادیر b-value برای آزمایش شکافت هیدرولیکی: الف) نمونه‌های شکافدار و ب) نمونه‌های بدون شکاف

ب) نمونه‌های بدون شکاف



الف) نمونه‌های شکافدار



شکل ۱۳ نمودار تغییرات مقدار Ib-value و فشار تزریق سیال: الف) نمونه‌های شکافدار و ب) نمونه‌های بدون شکاف.

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 به وجود 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 به وجود آمده است و احتمال به وجود 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 فرآیند شکستگی تحت تأثیر رویدادهای ریزترک قبل از حداکثر فشار تزریق است و شکست شکننده به‌طور 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 تأثیر 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 فرآیند تغییرات b-value تأثیر می‌گذارد. مقدار b-value براساس پارامترهای AE می‌تواند برای پیش‌بینی رویدادهای بزرگ مقیاس در طول فرآیند شکافت هیدرولیکی نمونه‌های شکافدار استفاده شود. با توجه به شکل ۱۳، مقدار Ib-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 b-value شروع شده است. برای نمونه‌های بدون شکاف b-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 b-value شده‌اند. b-value برای نمونه‌های شکافدار زودتر شروع به نوسان کرده است، ولی نوسانات آن برای نمونه‌های بدون شکاف بالاتر است و نوسانات زیادتر b-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 b-value به‌طور پیوسته‌تری نوسان کند و نسبت رویدادهای AE کوچک و بزرگ در سطح پایدارتری حفظ شوند.

نتیجه گیری

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. در ارتباط با پارامتر تحلیل b-value، این پارامتر برای نمونه‌های شکاف‌دار پایین‌تر بوده و ریزترک‌های بیشتری در این نمونه‌ها به وجود آمده و احتمال رخداد انتشار آوایی قوی و شکست‌های شکننده کمتر است. همچنین 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 پایدارتری قرار دارند.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از گروه مکانیک سنگ دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود و همچنین از کمک‌های همکاران در طول انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

در این تحقیق، مطالعه آزمایشگاهی تأثیر شکاف از پیش موجود بر شکافت هیدرولیکی، آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی تحت شرایط تنش سه محوره واقعی برای نمونه‌های دارای شکاف و بدون شکاف به همراه رفتارنگاری انتشار آوایی انجام شده است. اهم نتایج حاصل از این تحقیق در ادامه بیان شده است. چنانچه ملاحظه شد، شکاف از پیش موجود در نمونه‌های شکاف‌دار فشار شکستگی نمونه‌ها را کاهش داده و مقدار اختلاف تنش‌های جانبی به وضوح مسیر گسترش ترک را در طول آزمایش شکافت هیدرولیکی تحت تأثیر قرار داده است. همچنین در نمونه‌های دارای شکاف، مقدار شمارش AE نسبت به نمونه‌های بدون شکاف بالاتر بوده و تعداد زیادی رویداد AE و مقدار شمارش زیادی در لحظه حداکثر فشار تزریق مشاهده شده است. از نظر گسترش ترک، شکاف از پیش موجود باعث انحراف ترک شده و این انحراف ترک باعث افزایش کار انجام شده در نمونه‌ها شده و به دنبال آن سیگنال‌های AE بیشتری دریافت شده است. در فرآیند انجام آزمایش، در طول زمان تزریق سیال ترک‌های کششی و برشی در نمونه‌های شکاف‌دار

مراجع

- [1]. Ma Z (2000) Experimental studies of rock fracture behavior related to hydraulic fracture, MSc Thesis, University of Illinois at Chicago.
- [2]. Hossain M M, Rahman M K, Rahman S S (2000) Hydraulic fracture initiation and propagation: roles of well-bore trajectory, perforation and stress regimes, Journal of Petroleum Science and Engineering, 27, 3-4: 129-149.
- [۳]. مرادی ا، تخم چی ب، رسولی و، فاتحی مرجی م (۱۳۹۵) تحلیل المان مرزی غیر مستقیم اندرکنش شکافت هیدرولیکی و شکست طبیعی در مخازن هیدروکربنی درزه دار. روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۶: ۷۷-۸۸.
- [۴]. نقی دهقان ع، گشتاسبی ک، آهنگری ک، جین ی، میسکیمینس ج (۱۳۹۴) 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: ۱۹۸-۱۸۰.
- [5]. Nikkhah M, Ahmadi M, Ghazvinian A (2011) Application of pattern recognition analysis of rock acoustic emission for determination of Kaiser Effect, Proceedings of 12th International Congress on Rock Mechanics, China, 765-769.
- [6]. Hampton J C (2012) Laboratory hydraulic fracture characterization using acoustic emission, MSc Thesis, Colorado School of Mines.
- [7]. Li Q B (2015) Acoustic emissions in hydraulic fracturing of Barre granite. Doctoral dissertation, Massachu

setts Institute of Technology.

[8]. Veatch Jr R W, Moschovidis Z A, Fast C R (1989) An overview of hydraulic fracturing. *Recent Advances in Hydraulic Fracturing*, 12: 1-38.

[9]. Valkó P, Economides M J (1995) *Hydraulic fracture mechanics*, Chichester: Wiley 28.

[10]. Stanchits S, Surdi A, Edelman E, Suarez-Rivera R (2012) Acoustic emission and ultrasonic transmission monitoring of hydraulic fracture propagation in heterogeneous rock samples, 46th US Rock Mechanics /Geomechanics Symposium, OnePetro.

[11]. Alabbad E A (2014) Experimental investigation of geomechanical aspects of hydraulic fracturing unconventional formations, The University of Texas at Austin.

[12]. 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.

[13]. 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.

[14]. 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.

[۱۵]. شیرازی ح (۱۳۹۵). مدل سازی آزمایشگاهی فرآیند شکافت هیدرولیکی در شرایط تنش سه محوره واقعی. رساله دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[16]. 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.

[17]. 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.

[18]. 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.

[19]. 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.

[20]. 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.

[21]. 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.

[22]. 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.

[23]. Wang J, Guo Y, Zhang K, Ren G, Ni J (2019) Experimental investigation on hydraulic fractures in the layered shale formation, *Geofluids*.

[24]. 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.

[25]. Vallen Systeme, GmbH (2020). <http://www.vallen.de>, Wolfratshausen, Germany: The Acoustic Emission Company.

[26]. Grosse C U, Ohtsu M (2008) *Acoustic emission testing*, Springer Science and Business Media.

[27]. 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.

[28]. 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.

[29]. 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.

[30]. 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.

[31]. 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.