

ارزیابی مقاومت کششی با استفاده از نتایج آزمایش شکست هیدرولیکی و مقایسه آن با مقاومت کششی برزیلی و مقاومت بار نقطه‌ای: مطالعه موردی (سازند آسماری)

عرفان صادقی^۱، محمدرضا نیکودل^{۲*}، بدیل پهلوان^۳

دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۲۷ پذیرش مقاله: ۹۵/۰۴/۳۰

چکیده

امروزه به دلیل اهمیت منابع هیدروکربنی و بالا رفتن نرخ مصرف در جهان، نیاز به بالا بردن استخراج این مواد بیش از پیش احساس می‌شود. از طرفی وجود سازندهای با تخلخل موثر پایین که سنگ مادر مخازن هیدروکربنی محسوب می‌شوند، مانع از بهره‌وری مناسب از این مخازن می‌گردند. شکست هیدرولیکی که به عنوان یک فرایند آغاز و گسترش شکستگی‌ها در اثر تزریق سیال به درون قسمتی از گمانه حفر شده در سازندهای سنگی شناخته می‌شود، نقش موثری در افزایش استحصال مخازن هیدروکربنی کم بازده دارا می‌باشد. آغاز و گسترش شکستگی‌ها وابستگی بالایی به پارامترها و خصوصیات سنگ مخزن دارند. از میان این پارامترها می‌توان به مواردی همچون جنس سنگ‌های تشکیل دهنده، مقاومت کششی سنگ‌ها، فشارمغذی درون سنگ و غیره اشاره نمود. اهمیت مقاومت کششی سنگ به منظور پیش‌بینی فشار شکست آزمایش شکست هیدرولیکی بسیار بالا بوده و خود این پارامتر نیز تابع سنگ‌شناسی سنگ مخزن می‌باشد. از این روی در این پژوهش با نمونه‌گیری از مقطع تیپ سازند آسماری به بررسی و ارزیابی پارامتر فشار شکست به عنوان تابعی از پارامترهای مقاومت کششی سنگ و سنگ‌شناسی پرداخته شده است. با دستیابی به مقاومت کششی سنگ از آزمایش شکست هیدرولیکی به مقایسه آن با مقاومت کششی برزیلی و مقاومت بار نقطه‌ای پرداخته شده است. اختلاف میان این نسبت‌ها نشان از وابستگی پارامتر مقاومت کششی به روش آزمایش دارد. مقاومت کششی به دست آمده از آزمایش شکست هیدرولیکی برای این سازند حدوداً برابر با ۲۰ مگاپاسکال و نسبت میان مقاومت کششی شکست هیدرولیکی به برزیلی معادل ۲/۳۵ می‌باشد. با توجه به حفرات کارستی ریز در ساختار این سنگ‌ها و به تبع آن تخلخل نسبتاً پایین این سازند و همچنین وجود حفرات درون ذره‌ای به دلیل وجود فسیل در ساختار سنگ، اختلاف ناچیز در پراکندگی داده‌ها و ضریب رگرسیون ۰/۹ را می‌توان بدین دلیل دانست. تمام شواهد اعم از نتایج خصوصیات فیزیکی و مکانیکی اثبات کننده تأثیر سنگ‌شناسی بر نتایج مقاومت کششی بدست آمده از آزمایش شکست هیدرولیکی می‌باشد. همچنین می‌توان از آزمایش برزیلین برای ارزیابی تنش‌های مورد نیاز جهت شکست هیدرولیکی استفاده نمود.

کلید واژه‌ها: شکست هیدرولیکی، سازند آسماری، آزمایش برزیلی، مقاومت کششی سنگ

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

۲. دانشیار گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، nikudelm@modares.ac.ir

۳. دکترای زمین‌شناسی مهندسی، مدیرعامل شرکت مهندسی مشاور گمانه کاو، تهران

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

شکست هیدرولیکی یکی از مهم‌ترین و رایج‌ترین روش‌ها در ارزیابی تنش‌های برجا، انگیزش چاه‌ها، مهندسی ژئوتکنیک و غیره می‌باشد. با استفاده از این روش می‌توان پارامترهای مختلفی از خصوصیات سنگ‌های محل مورد مطالعه همچون فشارشکست، مقاومت کششی، فشار آب‌منفذی و تنش‌های برجا را ارزیابی و مقدار آن را تعیین نمود. بر اساس مطالعات و آزمایش‌های صورت گرفته توسط محققین مختلف پیرامون فرآیند شکست هیدرولیکی، با موضوعات گوناگون همچون انتشار شکستگی، آغاز شکستگی، برهمکنش شکستگی‌ها با ناپیوستگی‌ها و غیره، تقسیم‌بندی مشتعل بر سه دسته مختلف از مباحث کار شده صورت پذیرفته و خصوصیات هر کدام را همراه با ذکر اسامی تعدادی از محققین در آن زمینه آورده شده است:

(الف) این روش برای ارزیابی و تصدیق نظریه شکست هیدرولیکی جهت اندازه‌گیری تنش می‌باشد. این نوع آزمایش‌ها معمولاً بر روی نمونه‌های کوچک و عمدتاً بر جهت‌یابی شکستگی‌ها، فشار شکست (Breakdown pressure) و فشار بسته شدن (Shut-in pressure) صورت می‌گیرد و بر فاکتورهای که بر روی فشار شکستگی و جهت‌یابی شکستگی‌ها همانند نرخ تزریق سیال، نوع سیال شکست، جهت‌یابی چاه، ابعاد چاه، پکرهای مورد استفاده (Leak-off packer)، سوراخ ایجاد شده و غیره تأثیر می‌گذارند، تمرکز بیشتری دارد. مطالعات زیادی بر اساس این روش صورت گرفته است که از آن‌ها می‌توان به موارد همچون

Scott et al., 1953, Haimson, 1968, Vonschonfeldt, 1970, Daneshy, 1973, Komar and Frohne, 1973, Lockner and Byerlee, 1977, Solberg et al., 1977, Zoback et al., 1977, Medlin and Masse, 1979, Avashti, 1981, Boyce et al., 1984, Cheung and haimson, 1989, Schmitt and Zoback, 1989, Behrmann and Elbel, 1991, Haimson and Zhao, 1991, Bohlooli and de Pater, 2006, Sheng et al., 2013,

اشاره‌ای داشت. از خصوصیات که توسط این مطالعات بررسی نشده است نحوه انتشار شکستگی بعد از فشار شکست می‌باشد. کاربرد این مطالعات به اندازه‌گیری تنش بعد از شکست هیدرولیکی همانند تفسیر فشار شکست و تحقیق بر روی آغاز شکستگی (Fracture initiation) محدود می‌گردد.

(ب) نوع دوم مطالعات آزمایشگاهی به تفسیر شرایط بین شکستگی‌های ایجاد شده به روش شکست هیدرولیکی و شکستگی‌های از قبل موجود و اتصال آن‌ها می‌پردازد. در این زمینه نیز مطالعات زیادی صورت گرفته است که از میان آن‌ها می‌توان به:

Lamont and Jessen, 1963, Anderson and Larson, 1978, Daneshy, 1978, Anderson, 1981, Avashti, 1981, Hanson et al., 1981, Warpinski et al., 1981, Blanton, 1982, Hanson et al., 1982, Teufel and Clark, 1984, Blanton, 1986, Warpinski and Teufel, 1987, Blair et al., 1990, Zhang and Chen, 2010, Huang et al., 2011, Chitralla et al., 2013

اشاره نمود. این آزمایش‌ها معمولاً بر روی نمونه‌های بزرگ صورت می‌گیرد و بر روی اینکه یک شکستگی توسط صفحات ساختاری کنترل می‌گردد یا نه تمرکز دارد. فشار شکستگی یا دیگر جنبه‌های انتشار شکستگی را در بر نمی‌گیرد و برای درک کردن و فهمیدن شکستگی‌های موجود و مهار آن‌ها (Fracture containment) مفید هستند.

(ج) دسته آخر این آزمایش‌ها داده‌های را جهت تصدیق مدل‌های عددی و درک کلی فرآیند انتشار شکستگی تولید می‌کند. در واقع در این روش با انجام تعداد محدودی آزمایش بر روی نمونه‌های مورد نظر داده‌های آن را با وارد کردن در نرم‌افزار، مدل می‌کنند. در این زمینه نیز مطالعاتی توسط محققین مختلف انجام گردیده که از میان آن‌ها می‌توان اشاره‌ای داشت به:

Rubin, 1983, Medlin et al., 1981&1984, Johnson and Cleary, 1991, Guangqing and mian, 2009, Zhang et al., 2010, Carvalho et al., 2010, Shimizu et al., 2011, Xiang, 2011, Sun et al., 2012, Yunjin et al., 2013,

از فرآیند شکست هیدرولیکی نیز انجام گردید. به منظور داشتن مقایسه‌ای مناسب بین نتایج مقاومت کششی حاصل از آزمایش فرآیند شکست هیدرولیکی و آزمایش برزلی، مغزه‌ها طوری تهیه گردیدند که از یک مغزه علاوه بر تهیه نمونه آزمایش شکست هیدرولیکی بتوان نمونه‌های آزمایش برزلی و آزمایش بارنقطه‌ای را نیز تهیه نمود. از دیگر آزمایش‌های انجام شده برای تعیین خصوصیات این سنگ‌ها می‌توان به آزمایش سرعت امواج التراسونیک، مقاومت حاصل از واجهش چکش اشمیت و آزمایش کلسی متری اشاره نمود.

۳. زمین‌شناسی مناطق نمونه‌برداری شده

زمین‌شناسی و موقعیت مقطع تیپ سازند آسماری به تفصیل در زیر آورده شده است و مقطع تیپ این سازند نیز بر روی نقشه مطابق شکل ۱ نشان داده شده است. سازند آسماری که به صورت تاقدیسی با راستای شمال غرب - جنوب شرق رخنمون دارد بطور عمده از سنگ‌آهک تشکیل شده و با ضخامتی در حدود ۳۱۴ متر روی سنگ‌های ائوسن قرار گرفته است. این سازند به سه بخش به شرح زیر قابل تفکیک است (قبادی و رجب‌پور، ۱۳۷۸):

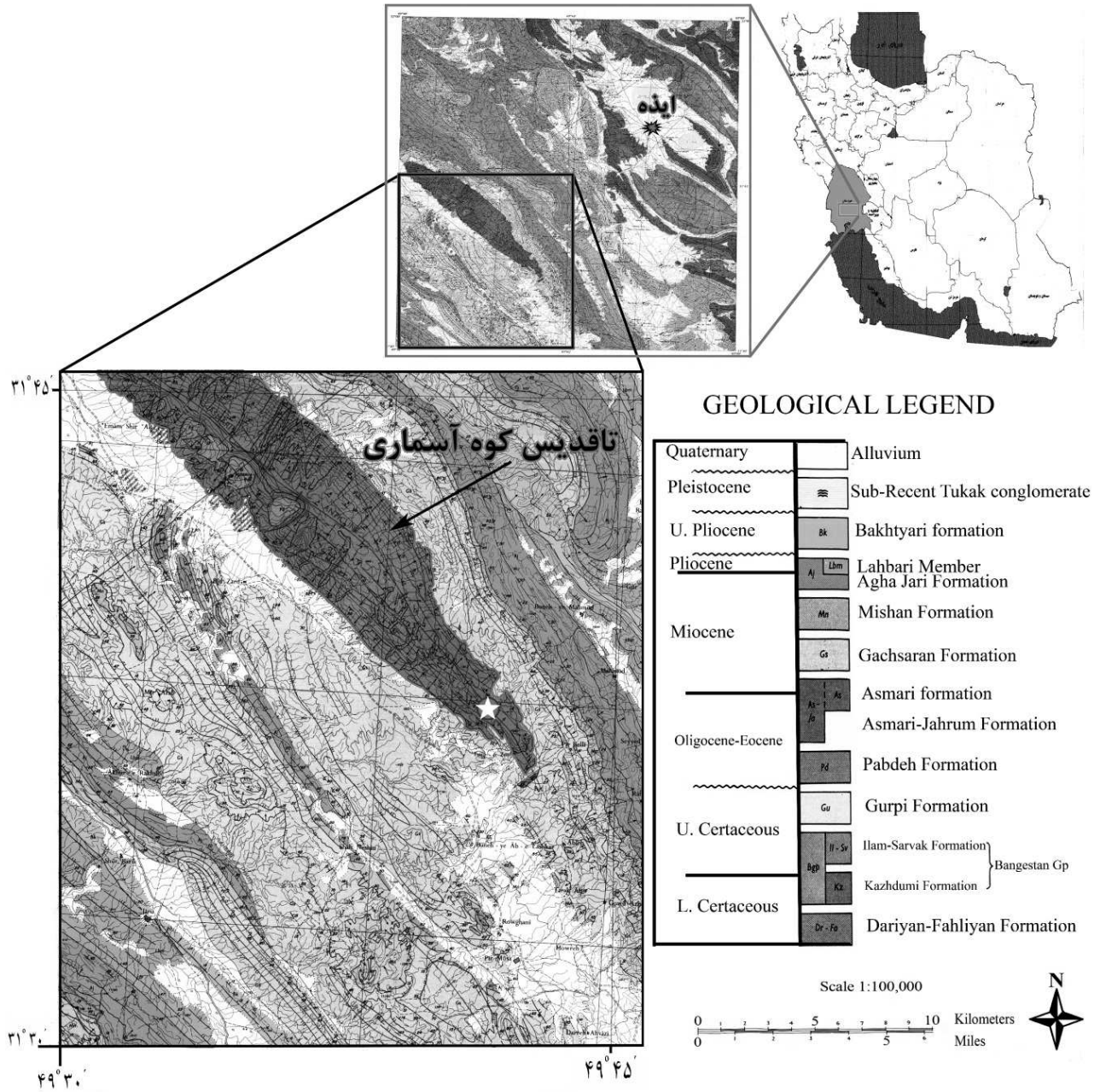
بخش آسماری پائینی متشکل از سنگ‌آهک آرژیلیتی که یک ضخامت ۴۰ متری از آن نفوذپذیری نسبتاً بالایی دارد. این ناحیه نفوذپذیر زیر یک واحد شیلی محصور است. بخش آسماری میانی در قسمت بالا متشکل از چند لایه مارنی با ضخامت کمتر از ۳ متر است و در قسمت پایین از سنگ‌آهک به شدت درزه‌داری تشکیل شده که لایه مارنی آن را از سنگ‌آهک کارستی شده بالایی جدا می‌کند. بخش آسماری بالایی شامل ۵۰ متر سنگ‌آهک با بین لایه‌های دولومیتی حفره‌دار، ۵۰ متر دولومیت توده‌ای و ۶۰ متر سنگ‌آهک توده‌ای است (آقا نباتی، ۱۳۸۳). تصویر شماتیک این سازند در شکل ۲ آورده شده است.

Davies et al., 2013, Tao and Bryant, 2013, Nasehi and Mortazavi, 2013.

از میان پارامترهای مقاومت سنگ، مقاومت کششی تنها پارامتری است که نقش بسزایی در ایجاد و گسترش ترک‌های ایجاد شده توسط فرآیند شکست هیدرولیکی دارد. به همین منظور پژوهشی در ارتباط با فرآیند آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی با هدف تعیین میزان مقاومت سنگ‌های آهکی و ارتباط آن با مقاومت کششی غیرمستقیم سنگ از آزمایش برزلی انجام گردیده است. جهت انجام این پژوهش، سازند مخزنی آسماری انتخاب و با نمونه‌برداری از مقطع تیپ این سازند به منظور انطباق مناسب نتایج حاصل شده با سایر کارها و سازندهای رخنمون یافته با این نام، مطالعات صورت پذیرفته است. مطالعات صورت گرفته شامل مطالعات پتروگرافی، فیزیکی و مکانیکی بوده و از مطالعات مهم دیگر در این پژوهش ارتباط خصوصیات پتروگرافیکی سنگ‌ها به پارامترهای مقاومتی حاصل از فرآیندهای شکست هیدرولیکی و برزلی می‌باشد.

۲. روش کار

در این پژوهش از مقاطع تیپ سازند نفتی آسماری بلوک‌های سنگی تهیه گردیده و با انتقال آن به آزمایشگاه و مغزه‌گیری، نمونه‌های مناسب جهت آزمایش‌های مورد نیاز تهیه گردید. با تهیه مقاطع نازک خصوصیات پتروگرافی سنگ‌ها همچون جنس کانی‌های اصلی و فرعی، زمینه سنگ، تخلخل و حفرات سنگ، تغییرات ثانوی سنگ و غیره مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. علاوه بر خصوصیات پتروگرافی سنگ، خصوصیات فیزیکی آن‌ها نیز شامل وزن مخصوص، چگالی خشک، تخلخل، درصد جذب آب و همچنین خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت کششی برزلی، مقاومت بارنقطه‌ای، مقاومت تک‌محوری، مقاومت سه‌محوری و مقاومت حاصل



شکل ۱. موقعیت محل نمونه برداری از سازند آسماری (ستاره سفید رنگ) در تاقدیس کوه آسماری واقع در ۴۵ کیلومتری جنوب شرقی شهر مسجدسلیمان، برگرفته از نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کوه آسماری (شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۴۵)

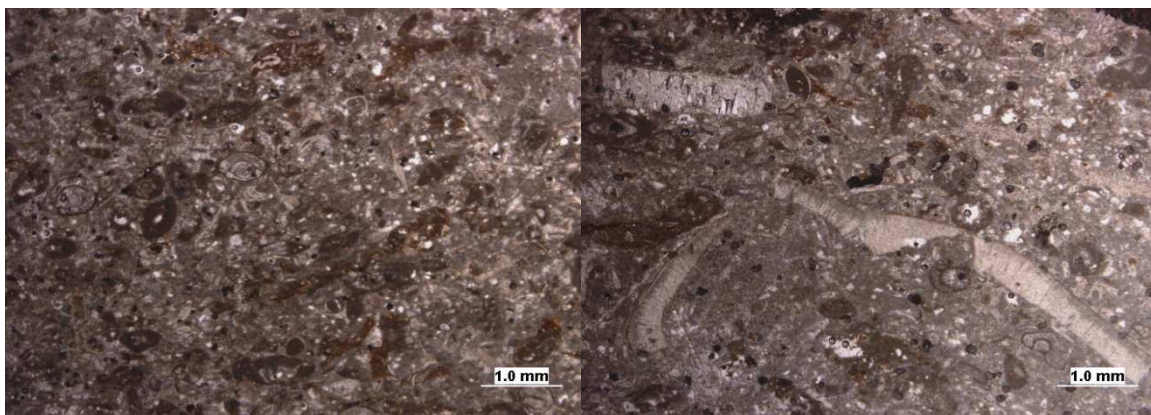
SERIES	STAGE	FORMATION	MEMBER	Thickness (m.)	Lithology
OLIGOCENE	RUPELIAN	A S M A R I	LOWER	40	
			MIDDLE	60	
UPPER	3				
	54				
	50				
MIOCENE	BURDIGALIAN		UPPER	50	
		60			

شکل ۲. تصویر شماتیک سازند آسماری

۴. مطالعه مقاطع میکروسکوپی

مطالعات صورت گرفته روی مقاطع نازک سازند آسماری نشان داد که اجزای اصلی سنگ کربناته می باشد و آلوکم های سنگ شامل خرده های اسکلتی (فرامینفرا) از نوع Miliolids, Borelis و مولوسکا می باشد. از دیگر اجزا می توان به خرده های جلبکی (انکوئید) اشاره نمود و مقادیر کمی

اینتراکلاست در نمونه قابل مشاهده است. تخلخل زیادی در متن سنگ قابل مشاهده بوده و عمده این تخلخل ها از نوع حفره ای (Vuggy) و نیز درون ذره ای Intragranular porosity می باشند. بافت سنگ همگن نمی باشد و تخلخل قالبی در نمونه های فسیل حل شده قابل رویت است (شکل ۳). خلاصه این مطالعات در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۳. تصاویر مقاطع نازک میکروسکوپی مطالعه شده از بخش بالایی سازند آسماری

جدول ۱. خصوصیات سنگ شناسی سازند آسماری

سازند	تشکیل دهنده ها	بافت سنگ	تخلخل	فسیل ها
آسماری	خرده های فسیل	بایوکلاست و کستون/ بایومیکرایت	حفره ای، درون ذره ای	Borelis, Miliolids, مولوسکا، خرده جلبکی

۵. دستگاه و نحوه آزمایش شکست هیدرولیکی

جهت انجام آزمایش شکست هیدرولیکی از دستگاه سه محوری موجود در دانشگاه تربیت مدرس تهران استفاده گردید. سل سه محوری مورد استفاده دارای بدنه ای از جنس استیل با توانایی تحمل فشار بیش از ۷۵ مگاپاسکال را دارا می باشد (شکل ۴- ب). علاوه بر نمونه آزمایش، در داخل سل سه محوری دو قسمت فلزی دیگر هم قطر با نمونه قرار می گیرند که به وسیله غشای نئوپرن لاستیکی و بست های فلزی به هم متصل می گردند. این غشا علاوه بر نگهداری قطعات و نمونه کنار هم به آب بندی نمونه و جلوگیری از نفوذ سیال به اطراف نمونه نیز کمک می کند. نمونه های مورد آزمایش از جنس سنگ آهک و با قطر ۵۴/۶ میلی متر (NX) و

همچنین طول آن ها ۱۱۰ میلی متر انتخاب گردیده است (شکل ۵). با توجه به اینکه سوراخ ایجاد شده در نمونه سنگ برای انجام آزمایش یک طرفه می باشد، با رعایت نسبت قطر سوراخ به قطر نمونه، قطر سوراخ حفر شده ۴ میلی متر و طول آن به گونه ای انتخاب گردید که مقدار باقی مانده در انتهای سوراخ به اندازه شعاع باقی مانده در اطراف سوراخ ایجاد شده می باشد (شکل ۵). سیال مورد استفاده جهت ایجاد شکست هیدرولیکی در نمونه، از نوع سیالات پایه نفتی و روغن موتور هیدرولیک با گرانیوی ۸۵ سانتی پواز بوده است. فشارهای جانبی با نرخ های صفر تا ۱۰ مگاپاسکال اعمال گردیده و فشار محوری به مقداری اعمال گشته تا از جدا شدن سرپوش تزریق روغن از نمونه جلوگیری شود. با ثابت نگه داشتن

شکست هیدرولیکی مقدار آن را ثابت و با نرخ یکسانی تزریق می‌کنیم.

۳. بعد از تزریق حداکثر مقدار سیال و ایجاد شکست در نمونه، آزمایش متوقف می‌گردد.

۴. مقدار مقاومت سنگ با استفاده از گیج کنترل قرائت می‌گردد.

۵. در این مرحله فشارهای موجود روی نمونه برداشته می‌شود و سیال از درون محفظه و غشا خارج می‌گردد.

با بیرون آوردن نمونه مسیر ایجاد شکستگی و اندازه آن مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد.

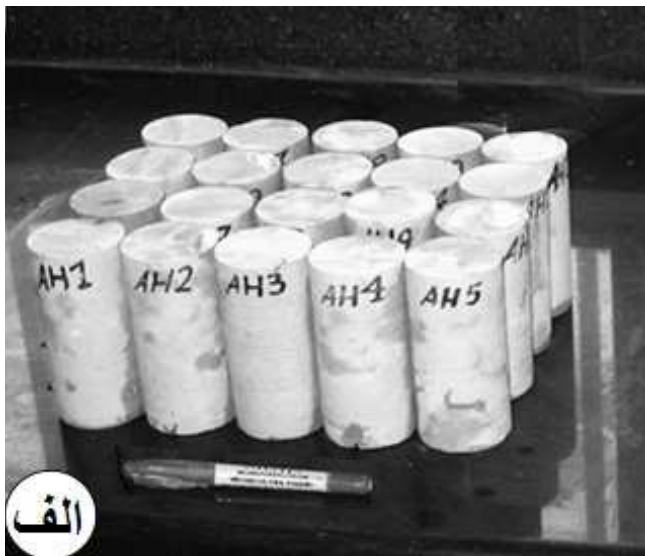
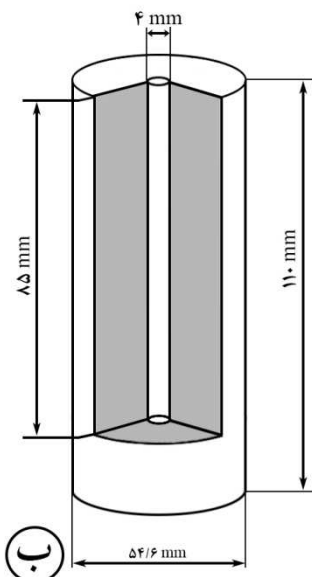
تنش‌های اعمالی، تزریق سیال با نرخ تقریباً ثابتی تا شکست نمونه صورت پذیرفته است. برای اعمال تنش محوری و تزریق سیال به ترتیب از قرار دادن دو جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰ و ۱۰۰ تنی درون چهارچوب‌های فولادی استفاده شده است و برای تنش جانبی از سیستم پمپ هیدرولیکی دستگاه سه‌محوری بهره گرفته شده است (شکل ۴). با نصب تمام سیستم تزریق مراحل انجام آزمایش عبارت‌اند از:

۱. تنش جانبی و تنش محوری را تا سطح مورد نظر اضافه می‌کنیم.

۲. بعد از اعمال تنش‌های جانبی و محوری و ثابت نگه‌داشتن آن‌ها، سیال نیز به داخل نمونه تزریق شده و تا رخ دادن



شکل ۴. دستگاه انجام آزمایش شکست هیدرولیکی، (الف) دستگاه تامین کننده فشار جانبی اعمال شده بر روی نمونه‌ها، (ب) سل سه محوری مورد استفاده همراه با جک ۲۰ تنی اعمال بار محوری، (ج) جک ۱۰۰ تنی جهت تزریق سیال به درون نمونه، (د) دستگاه مورد استفاده جهت اعمال نیرو به جک ۱۰۰ تنی



شکل ۵. نمونه‌های انتخابی برای آزمایش شکست هیدرولیکی سازند آسماری، (ب) ابعاد گمانه ایجاد شده در نمونه

۶. نتایج

۶-۱. خصوصیات فیزیکی سازند آسماری

همان‌طور که از نتایج بدست آمده از آزمایش‌های تعیین خصوصیات فیزیکی در جدول ۲ قابل مشاهده می‌باشد، چگالی و وزن مخصوص نمونه‌ها با همدیگر رابطه‌ای مستقیم داشته و مقدار نسبتاً پایین آن به دلیل مقدار تخلخل سنگ می‌باشد. تخلخل نیز با درصد جذب آب رابطه‌ای مستقیم و با سرعت امواج التراسونیک در سنگ رابطه‌ای عکس نشان می‌دهند. با توجه به ساختار کربناته سنگ‌های آهکی و قابلیت انحلال‌پذیری این سنگ‌ها در برابر عوامل محیطی و همچنین نتایج حاصله از آزمایش کلسی‌متری می‌توان استدلال مناسبی در مورد رابطه شاخص‌های تخلخل و درصد کربنات داشت. طبق جدول ۲ می‌توان این نظریه را در نتایج سازند آسماری به خوبی مشاهده نمود که به دلیل درصد بالای کربنات در این سازند، قابلیت این سنگ برای افزایش انحلال و ایجاد حفرات کارستی افزایش یافته است.

جدول ۲. نتایج حاصل از آزمایش تعیین خصوصیات فیزیکی

برای سازند آسماری

اسم سازند	چگالی خشک gr/cm ³	وزن مخصوص سنگ Gs	تخلخل %	درصد جذب آب	درصد کربنات	سرعت موج P (m/s)
آسماری	۲/۴۴	۲/۶۲	۶/۷۶	۲/۷۷	۹۲/۶	۵۵۲۶

۶-۲. خصوصیات مکانیکی سازند آسماری

همان‌طور که از نتایج نشان داده شده در جدول ۳ جدول ۳ انتظار می‌رود تمامی داده‌های به‌دست آمده از نتایج آزمایش‌های مکانیکی باید نسبت به یکدیگر رابطه مستقیم و روند افزایشی داشته باشند، که با توجه به این مهم می‌توان با

در نظر نگرفتن تفاوت جزئی که در نتایج آزمایش بارنقطه‌ای و سختی چکش اشمیت نسبت به مقاومت کششی برزیلی وجود دارد، شاهد این مسئله بود. پایین بودن نسبی مقدار مقاومت فشاری سازند آهکی آسماری را می‌توان به حفرات و تخلخل‌های حفره‌ای ناشی از فرآیند کارستی شدن مرتبط ساخت. نتایج مقاومت فشاری سه‌محوری این سازند، زاویه اصطکاک داخلی بالا و چسبندگی نسبتاً پایین را نشان داده است.

۶-۳. آزمایش شکست هیدرولیکی

از نمونه‌های سازند آسماری ۲۰ نمونه انتخاب و بر روی ۱۰ نمونه از آن‌ها آزمایش شکست هیدرولیکی صورت پذیرفت. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد فشارهای همه‌جانبه با مقادیر صفر، ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ مگاپاسکال اعمال و مقادیر تنش محوری با نسبت بیشتری بر نمونه‌ها اعمال گردیده است. مقادیر اعمال شده و فشارهای شکست محاسبه شده در جدول ۴ آورده شده است.

نمودار شکست هیدرولیکی سازند آسماری برای فشارهای همه‌جانبه ۲/۵ و ۷/۵ مگاپاسکال در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد سیال مورد استفاده برای شکست نمونه سنگ از نوع پایه روغنی و گرانیروی آن در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، ۸۵ سانتی‌پواز می‌باشد. نرخ تزریق سیال به داخل نمونه ثابت و مقدار آن ۱/۱ میلی‌لیتر بر ثانیه می‌باشد. در نمودارهای شکل ۶ شکل ۶ فرورفتگی قسمت ابتدایی نمودار به دلیل عواملی همچون تجمع روغن درون گمانه حفرشده و فشردگی سیال شکستگی در آغاز آزمایش می‌باشد.

جدول ۳. نتایج حاصل از آزمایش تعیین خصوصیات مکانیکی برای سازند آسماری

اسم سازند	مقاومت کششی برزیلی (MPa)	مقاومت بارنقطه‌ای (MPa)	مقاومت فشاری تک‌محوری (MPa)	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (degree)	سختی واجهش چکش اشمیت
آسماری	۸/۵۵	۳/۴۴	۵۰	۲/۹	۵۵/۵۴	۵۱/۸۷

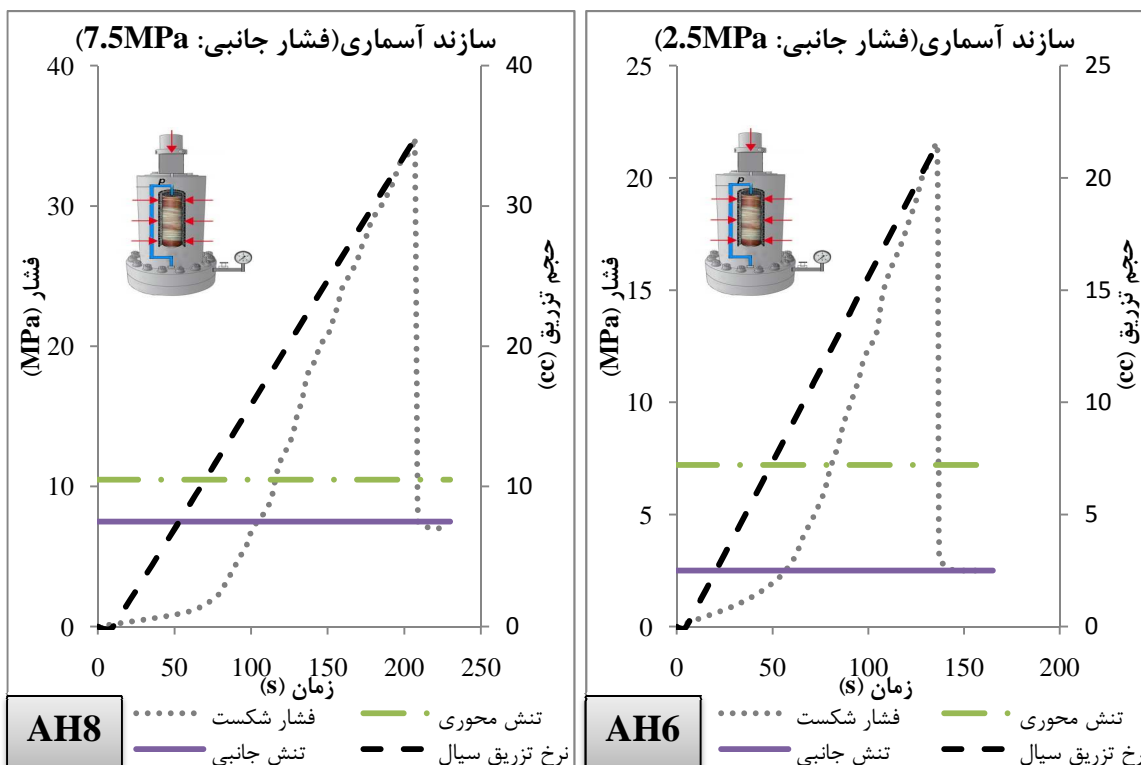
جدول ۴. نتایج حاصل از تنش‌های اعمالی (σ_v و σ_h) و فشار تزریق (Pc) به دست آمده از آزمایش شکست هیدرولیکی برای سازند آسماری

شماره	تنش محوری (MPa)	تنش جانبی (MPa)	فشار شکست (MPa)
AH1	۷/۸	۰	۲۲/۵
AH2	۶/۵۸	۰	۱۸/۷
AH3	۱۰/۴۸	۲/۵	۲۹/۲
AH4	۷/۲۱	۲/۵	۳۰/۸
AH5	۷/۲۱	۲/۵	۲۴/۹
AH6	۷/۲۱	۲/۵	۲۱/۵
AH7	۸/۳۸	۵	۳۳/۴
AH8	۱۰/۴۸	۷/۵	۳۴/۸
AH9	۱۰/۴۸	۷/۵	۳۱
AH10	۱۲/۵۷	۱۰	۴۸

سازند آسماری

شکست هیدرولیکی به مقاومت کششی سنگ دست یافت. با قرار دادن نمونه سنگ در معرض تنش‌های محوری و جانبی و همچنین تزریق سیال (روغن) به داخل نمونه سنگ، فشار درونی یا به عبارتی فشار شکست حاصل می‌گردد.

۶-۴. ارتباط میان فشار شکست (Pc) و تنش جانبی (σ_h) با توجه به ماهیت آزمایش شکست هیدرولیکی که عامل موثر در مقاومت سنگ در مقابل ایجاد شکست هیدرولیکی، مقاومت کششی سنگ می‌باشد می‌توان از داده‌های آزمایش



شکل ۶. نمودار فشار- زمان آزمایش شکست هیدرولیکی سازند آسماری در فشارهای همه جانبه ۲/۵ و ۷/۵ مگاپاسکال

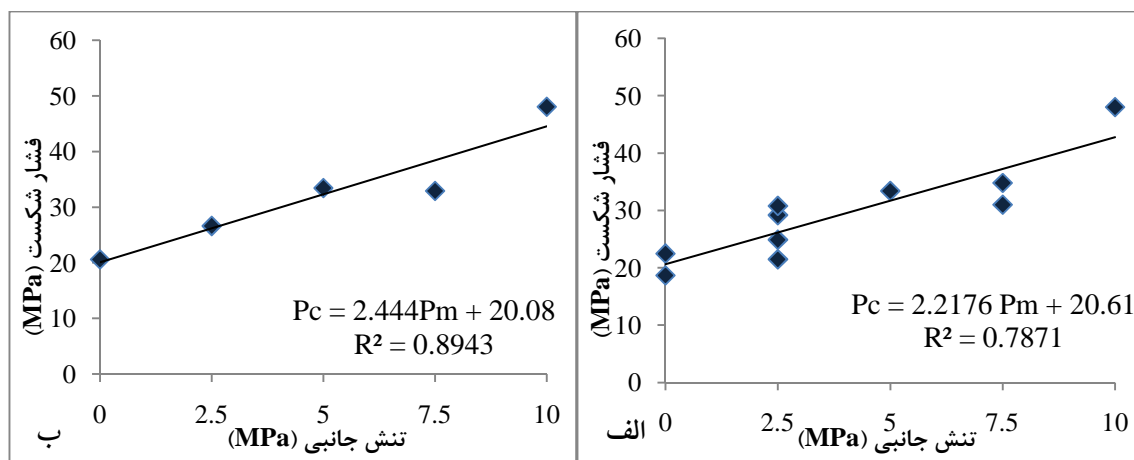
گردیده‌اند. بر اساس نمودارهای شکل ۷ و روابط به دست آمده از برازش داده‌ها می‌توان گفت که در حالت کلی مقاومت کششی به دست آمده برای این سازند با اختلاف ناچیزی در دو حالت با هم برابر می‌باشد. طبق مطالعات سنگ‌شناسی، سازند آسماری دارای ساختار میکرایتی و پیوسته‌ای می‌باشد اما وجود حفرات و تخلخل کارستی در ساختار نشان دهنده نقطه ضعفی در پایین آوردن مقدار مقاومت آن است. در ارتباط با ضریب شکست، بر اساس نظریه‌های تئوریک، مقدار k باید برابر با ۲ باشد تا بتوان به ارزیابی صحیحی از میزان تمرکز تنش بر روی دیواره گمانه دست یافت. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان از نزدیک بودن مقادیر به دست آمده برای سازند آسماری به مقادیر تئوریک ارائه شده می‌باشد.

مطابق رابطه ۱ ارتباط فشار شکست (P_c) با تنش جانبی (P_m) به صورت رابطه‌ای خطی می‌باشد (Rummel, 1987). این ارتباط برای سازند آسماری در شکل ۷ به دو صورت نشان داده شده‌اند.

$$P_c = k \times P_m + P_{c0} \quad \text{رابطه ۱}$$

در رابطه ۱، P_c فشار شکست هیدرولیکی (MPa)، P_m فشار جانبی اعمال شده (MPa)، k ضریب شکست و P_{c0} مقاومت کششی هیدرولیکی (MPa) می‌باشد.

در ابتدا نتایج ۱۰ آزمایش صورت گرفته در یک نمودار ترسیم شده و روند خطی و همچنین ضرایب رگرسیونی به منظور تعیین مقاومت کششی و ضریب شکستگی سنگ‌ها تعیین گردیده است. در حالت دوم با میانگین‌گیری از نتایج فشار شکست برای هر چند آزمایش انجام شده با یک تنش جانبی یکسان، نمودار ترسیم شده و ضرایب مورد نظر استخراج



شکل ۷. ارتباط خطی میان پارامترهای فشار شکست (P_c) حاصل از آزمایش شکست هیدرولیکی و تنش جانبی (P_m) اعمال شده بر نمونه‌های سازند آسماری به منظور ارزیابی مقاومت کششی و ضریب شکست، الف) روند کلی نتایج برای سازند آسماری، ب) میانگین‌گیری از نتایج فشار شکست برای هر چند آزمایش انجام شده با یک تنش جانبی یکسان

(برای شکستگی عمودی) که تنش موثر حداقل بر روی دیواره گمانه به معادل مقاومت کششی سنگ رسیده باشد.

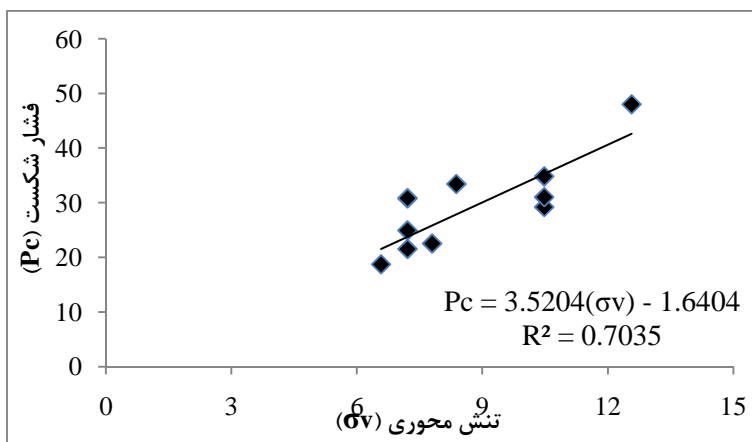
۶-۵. ارتباط میان فشار شکست (P_c) و تنش محوری (σ_v)

با توجه به اهمیت تنش‌های برجا در ارزیابی و پیش‌بینی روند گسترش درز و شکستگی‌ها و اهمیت بالای پیش‌بینی تنش‌ها

فشار شکست، پارامتر مهمی برای اندازه‌گیری تنش در آزمایش شکست هیدرولیکی می‌باشد. به منظور ارزیابی این پارامتر، فشار شکست در مقابل تنش جانبی در شکل ۷ ترسیم شده است. بر اساس تئوری حال حاضر فرایند شکست هیدرولیکی برای اندازه‌گیری تنش، فشار شکست زمانی روی می‌دهد

قائم اعمالی حدود ۱۰ درصد بیشتر از تنش جانبی باشد. نتایج نشان از ارتباط مستقیم این پارامترها با یکدیگر و روند مناسبی را می‌دهد که می‌توان ارتباط میان آن‌ها را برقرار نمود. همچنین می‌توان افزایش تنش محوری را به گونه معادل با افزایش عمق نیز در نظر گرفت.

توسط فشار شکست به دست آمده، ارتباط میان پارامترهای فشار شکست و تنش محوری (قائم) ترسیم و در شکل ۸ آورده شده است. قابل ذکر است که پارامتر تنش محوری از اعمال میزان بار قائم در هنگام انجام آزمایش بر روی نمونه به دست می‌آید. همچنین تلاش بر این شده است تا میزان تنش



شکل ۸. ارتباط میان فشار شکست حاصل از آزمایش شکست هیدرولیکی (Pc) و تنش محوری (σv) سازند آسماری

داشته باشند. منطق این آزمایش بر تجارب متعددی استوار است که نشان می‌دهد وقتی سنگ‌ها در میدان تنش دو محوره قرار می‌گیرند، یکی از تنش‌های اصلی کششی و دیگر تنش وارد بر نمونه، فشاری است و نمونه به صورت کششی گسیخته می‌شود (ISRM, 1981). در شکل ۹ نمونه‌های آزمایش برزیلی را قبل و بعد از انجام آزمایش نشان می‌دهد، همچنین نتایج انجام آزمایش در جدول ۵ ذکر گردیده است.

۶-۶ آزمایش برزیلی

بر اساس استاندارد ASTM D3967، ۶۰ نمونه دیسکی شکل با قطر NX جهت انجام آزمایش برزیلی انتخاب و با قرار دادن زیر فک‌های دستگاه برزیلی مورد آزمایش قرار گرفت. همانطور که قبلاً شرح داده شد نحوه تهیه نمونه‌ها به گونه‌ای بوده که از انتهای مغزه‌های در نظر گرفته شده برای آزمایش شکست هیدرولیکی انتخاب شده‌اند تا از نظر لیتولوژی و خصوصیات فیزیکی موجود در سنگ‌ها انطباق خوبی را

جدول ۵. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت کششی برزیلی برای سازند آسماری

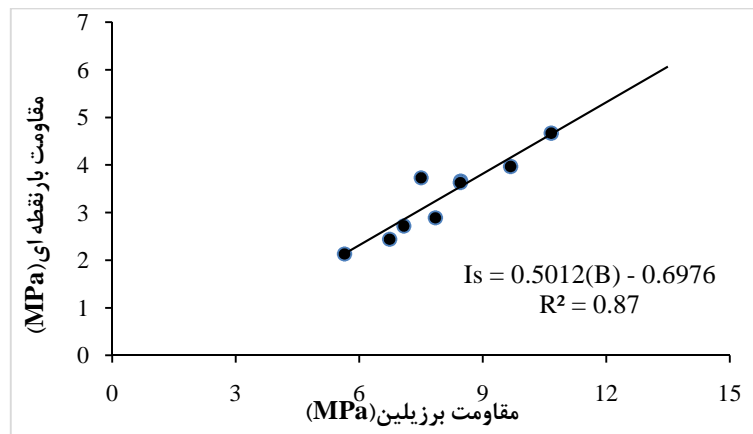
سازند آسماری											
شماره	AB1	AB2	AB3	AB4	AB5	AB6	AB7	AB8	AB9	AB10	میانگین
مقاومت برزیلی (MPa)	۸/۴۶	۵/۶۴	۷/۰۸	۶/۷۳	۷/۸۴	۱۳/۴۹	۹/۶۷	۱۰/۶۶	۸/۴۵	۷/۵۰	۸/۵۵
IS ₅₀ (MPa)	۳/۶۶	۲/۱۳	۲/۷۲	۲/۴۴	۲/۸۹	۴/۵۷	۳/۹۷	۴/۶۷	۳/۶۳	۳/۸۳	۳/۴۴

فشاری درون این آزمایش‌ها می‌باشد. همچنین بر اساس طبقه‌بندی بروچ و فرانکلین (۱۹۷۲) سازندهای آسماری نیز در رده سنگ‌های با مقاومت خیلی بالا قرار می‌گیرند.

همگرایی خوب مقاومت کششی برزیلی و مقاومت بار نقطه‌ای در نمودار شکل ۱۰، با توجه به ضریب رگرسیون مناسب و رابطه مستقیم آن‌ها نشان از یکنواختی و همگن بودن نمونه‌های مورد آزمایش و تقابل مناسب زون‌های کشش و



شکل ۹. نمونه‌های آزمایش مقاومت کششی برزیلی در حالت قبل و بعد از آزمایش



شکل ۱۰. ارتباط میان پارامترهای مقاومتی حاصل از آزمایش برزیلی و بارنقطه‌ای در سازند آسماری

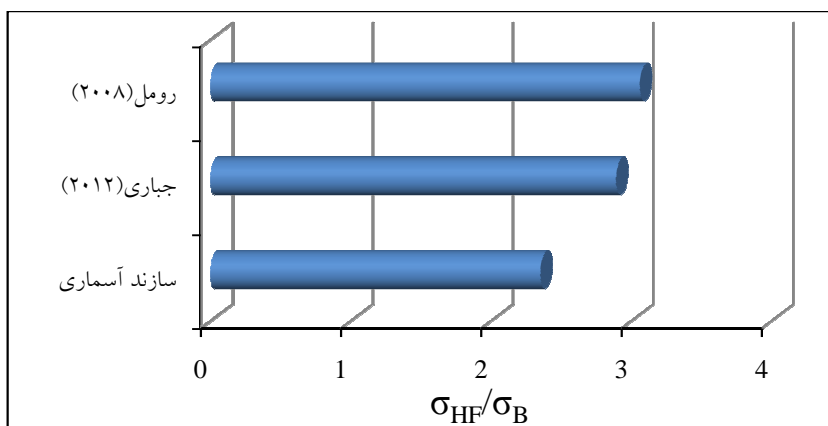
۷-۶. ارتباط میان فشار شکست (P_c) و مقاومت کششی برزیلی (BDT)

به منظور ارزیابی پارامتر مقاومت کششی سازندهای مورد مطالعه به مقایسه این پارامتر با استفاده از نسبت میان نتایج مقاومت کششی حاصل از آزمایش برزیلی و مقاومت کششی حاصل از آزمایش شکست هیدرولیکی پرداخته شده است. نسبت نتایج مقاومت کششی به دست آمده از روش شکست هیدرولیکی و مقاومت کششی برزیلی در جدول ۶ ذکر شده

است. علاوه بر آن نتایج به دست آمده با نتایج کار سایر محققین مقایسه و در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج نشان از اختلاف ناچیز مقادیر به دست آمده با کار سایر محققین داشته و با توجه به مقدار به دست آمده می‌توان بر اساس این پارامتر پیش‌بینی مناسبی از فشار شکست هیدرولیکی نمونه‌های سازند آسماری به منظور ارزیابی و اجرای فرایند شکست هیدرولیکی داشت.

جدول ۶. ارزیابی نسبت مقاومت کششی به دست آمده از روش شکست هیدرولیکی و مقاومت کششی برزیلی برای سازند آسماری

نام سازند	مقاومت کششی برزیلی (MPa)	مقاومت کششی هیدرولیکی (MPa)	σ_{HF}/σ_B
آسماری	۸/۵۵	۲۰/۰۸	۲/۳۵



شکل ۱۱. مقادیر به دست آمده از ارزیابی نسبت مقاومت کششی به دست آمده از روش‌های شکست هیدرولیکی و برزلی (σ_{HF}/σ_B) برای سازند آسماری، سد بختیاری (رومل، ۲۰۰۸) و پروژه شکست هیدرولیکی کشور سریلانکا (Jabbari, 2012)

نسبتی بین پارامترهای مقاومت بار نقطه‌ای و مقاومت کششی هیدرولیکی به دست آمده از آزمایش شکست هیدرولیکی برقرار و همانطور که از داده‌های جدول ۷ نیز قابل مشاهده است از همگرایی و همبستگی بالایی بین پارامترهای مقاومتی ارزیابی شده برخوردار است.

۶-۱. ارتباط میان فشار شکست (P_c) و مقاومت بار نقطه‌ای (I_s) به منظور ارزیابی ارتباط مقاومتی فشار شکست (P_c) و پارامتر مقاومت بار نقطه‌ای (I_s) سازند آسماری، نمونه‌هایی از انتهای مغزه‌های در نظر گرفته شده برای آزمایش شکست هیدرولیکی تهیه گردیده و با انجام آزمایش و اندازه‌گیری مقدار مقاومت I_s50 ارتباط میان این پارامترها برقرار گردیده است. ارتباط

جدول ۷. ارزیابی نسبت مقاومت کششی به دست آمده از روش شکست هیدرولیکی و مقاومت بار نقطه‌ای برای سازند آسماری

نام سازند	مقاومت بار نقطه‌ای (MPa)	مقاومت کششی هیدرولیکی (MPa)	σ_{HF}/σ_{I_s}
آسماری	۳/۴۴	۲۰/۰۸	۵/۸۴

همانگونه که انتظار می‌رود فشار شکست با افزایش تنش‌های جانبی و محوری روند افزایشی خوبی را نشان می‌دهد بنابراین در عمق‌های مختلف می‌توان فشار مورد نیاز برای شکست هیدرولیکی را پیش‌بینی نمود. ارتباط رگرسیونی پارامتر فشار شکست با تنش محوری و جانبی در سطح قابل قبولی قرار داشته و مقدار آن‌ها به ترتیب برابر با ۰/۷ و ۰/۹ می‌باشد. ارتباط مقاومت کششی برزلی و مقاومت کششی هیدرولیکی به صورت نسبتی از مقاومت کششی حاصل از فشار شکست نمونه‌ها بر مقاومت کششی برزلی برقرار گردیده که این مقدار برای نمونه‌های سازند آسماری برابر با ۲/۳۵ می‌باشد.

۷. نتیجه‌گیری

مقاومت کششی برزلی و بار نقطه‌ای ارتباط رگرسیونی مناسبی با یکدیگر دارند. علاوه بر آن همخوانی بالایی نیز با نتایج آزمایش‌های دیگر همچون خصوصیات فیزیکی دارا می‌باشند. با استفاده از ارتباط میان پارامترهای فشار شکست به دست آمده از آزمایش شکست هیدرولیکی و تنش‌های جانبی اعمال شده، مقادیر مقاومت کششی سازند آسماری ارزیابی و نتایج این نمودارها حاکی از اختلاف ناچیز مقاومت کششی به دست آمده از هر دو نمودار برای این سازند بوده و می‌توان آن‌ها را به صورت تقریبی با هم برابر دانست. مقدار مقاومت کششی بخش بالایی سازند آسماری طبق آزمایش شکست هیدرولیکی حدوداً برابر با ۲۰ مگاپاسکال می‌باشد.

برای بررسی ارتباط میان مقاومت کششی به دست آمده از ارتباط رگرسیونی میان فشار شکست و تنش جانبی با مقاومت بارتقدهای همانند روش برزلی از نسبت کسری میان آنها استفاده شده است. این نسبت برای سازند آسماری معادل ۵/۸۴ می باشد.

ارتباط میان فشار شکست با تنش های محوری نشان از ارتباط مستقیم این پارامترها با یکدیگر دارد. به گونه ای که اگر افزایش تنش محوری را معادل افزایش عمق زمین نیز در نظر بگیریم با افزایش تنش محوری و عمق زمین، فشار شکست افزایش می یابد.

منابع

- آقاباتی، س.ع.، ۱۳۸۳. زمین شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۷۰۶ص.
- شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۴۵، نقشه زمین شناسی کوه آسماری، ۱/۲۵۰۰۰۰.
- قبادی، م.ح.، رجب پور، م.، ۱۳۷۸. انحلال پذیری و گسترش ناپیوستگیها در توده سنگهای آهکی محل سد شهید عباسپور (کارون ۱)، مجموعه مقالات هیجدهمین گردهمایی علوم زمین، صفحات ۹۹۹-۱۰۰۴، سازمان زمین شناسی کشور. تهران.
- Anderson, G.D., Larson, D.B., 1978. Laboratory experiments on hydraulic fracture growth near an interface. Proe. 19th US Syrup. on Rock Mechanics, Mackay School of Mines, University of Nevada, pp. 333-339.
- Anderson, G.D., 1981. Effects of friction on hydraulic fracture growth near unbonded interfaces in rocks. Society of Petroleum Engineers, 21: 21-29.
- Avasthi, J.M., 1981. Hydrofracturing in Inhomogeneous, Anisotropic and Fracture Rocks. Ph.D. Thesis, The University of Wisconsin- Madison.
- Behrmann, L.A., Elbel, J.L., 1991. Effect of perforations on fracture initiation. Journal of Petroleum Technology, 43: 608-615.
- Blanton, T.L., 1982. An experimental study of interaction between hydraulically induced and preexisting fractures. Paper SPE 10847 presented at the SPE/DOE Unconventional Gas Recovery Syrup., Pittsburgh, PA.
- Blanton, T.L., 1986. Propagation of hydraulically and dynamically induced fractures in naturally fractured reservoirs. Society of Petroleum Engineers, 26: 613-621
- Bohlooli, B., de Pater, C.J., 2006. Experimental study on hydraulic fracturing of soft rock: Influence of fluid rheology and confining stress, Journal of petroleum Science and Engineering, 53: 1-12.
- Boyce, G.M., Doe, T.W., Majer, E., 1984. Laboratory hydraulic fracturing stress measurement in salt. Rock Mechanics in Productivity and Protection, Proceeding of 25th U.S. Syrup. on Rock Mechanics, Northwestern University, pp. 95-102.
- Carvalho, E., Bendezu, M., De Oliveira, M., Roehl, D., Sousa Jr, L., 2010. Finite Element Modeling Of Hydraulic Fracturing In Vertical Wells, Argentine Association Of Computational Mechanics, xxix: 8571-8578.
- Cheung, L.S., Haimson, B.C., 1989. Laboratory study of hydraulic fracturing pressure data--how valid is their conventional interpretation? International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanic, 26: 595-604.
- Chitralla, 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.
- Daneshy, A.A., 1973. A study of inclined hydraulic fractures. Society of Petroleum Engineers, 13: 61-68.
- Daneshy, A.A., 1978. Hydraulic fracture propagation in layered formations. Society of Petroleum Engineers, 18: 33-41.
- Davis, R., Foulger, G., Bindley, A., Styles, P., 2013. Induced seismicity and hydraulic fracturing for the recovery of hydrocarbons. Journal of Marine and Petroleum Geology, 45: 171-185.
- Guangqing, Z., Mian, C., 2009. Complex fracture shapes in hydraulic fracturing with orientated perforations, Petroleum Exploration and Development, 36(1): 103-107.

- Haimson, B.C., Zhao, Z., 1991. Effect of borehole size and pressurization rate on hydraulic fracturing breakdown pressure. *Rock Mechanics as a Multidisciplinary Science, Proc. 32nd U.S. Symposium on Rock Mechanics, University of Oklahoma. Norman, pp. 191-200.*
- Haimson, B.C., 1968. Hydraulic Fracturing in Porous and Nonporous Rock and its Potential for Determining In Situ Stresses at Great Depth. Ph.D. Thesis, University of Minnesota, U.S.A.
- Hanson, M.E., Anderson, G.D., Shaffer, R.J., Thorson, L.D., 1982. Some effects of stress, friction, and fluid flow on hydraulic fracturing. *Society of Petroleum Engineers, 22: 321-332.*
- Hanson, M.E., Shaffer, R.J., Anderson, G.D., 1981. Effects of various parameters on hydraulic fracturing geometry. *Society of Petroleum Engineers, 21: 435-443.*
- Huang, B., Liu, C., Fu, J., Guan, H., 2011. Hydraulic fracturing after water pressure control blasting for increased fracturing, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 48: 976-983.*
- Johnson, E., Cleary, M.P., 1991. Implications of recent laboratory experimental results for hydraulic fractures, Paper SPE 21846 presented at the Rocky Mountain Regional Meeting and Low- Permeability Reservoirs Syrup., Denver, CO.
- Komar, C.A., Frohne, K.H., 1973. Factors controlling fracture orientation in sandstone. Paper SPE 4567 presented at the 1973 SPE Annual Meeting, Las Vegas, NV.
- Lamout, N., Jessen F. W., 1963. The effects of existing fractures in rocks on the extension of hydraulic fractures. *Trans. AIME 22.8, 000-000.*
- Lockner, D., Byerlee J.D., 1977. Hydrofracture in Weber sandstone at high confining pressure and differential stress. *Journal of Geophysics Research. 82: 2018-2026*
- Medlin, W.L., Mass, L., 1984. Laboratory experiments in fracture propagation. SPE Paper No.10377, *Society of Petroleum Engineers Journal, 24: 256-268.*
- Medlin, W.L., Masse L., 1979. Laboratory investigation of fracture initiation pressure and orientation. *Society of Petroleum engineers, 19: 129-144.*
- Nasehi, M., Mortazavi, A., 2013. Effects of in-situ stress regime and intact rock strength parameters on the hydraulic fracturing, *Journal of Petroleum Science and Engineering, 108: 211-221.*
- Rubin, M. B., 1983. Experimental study of hydraulic fracturing in an impermeable material. *Journal of Energy Resource Technology, 105: 116-124.*
- Rummel, F., 1987. Fracture mechanics approach to hydraulic fracturing stress measurements in fracture mechanics of rock (ed. Atkinson), *Acad. Press London, 217-239.*
- Scott, P.P., Bearden, W.G., Howard, C.G., 1953. Rock rupture as affected by fluid properties. *Transactions of AIME, 198: 111-122.*
- Sehmitt, D.R., Zoback, M.D., 1989. Poroelastic effects in the determination of the maximum horizontal principal stress in hydraulic fracturing tests-a proposed breakdown equation employing a modified effective stress relation for tensile failure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomech Abstract, 26: 499-506.*
- Sheng, M., Li, G., Huang, Z., Tian, S., Qu, H., 2013. Experimental study on hydraulic isolation mechanism during hydra-jet fracturing, *Experimental Thermal and Fluid Science, 44: 722-726.*
- Shimizu, H., Murata, S., Ishida, T., 2011. The distinct element analysis for hydraulic fracturing in hard rock considering fluid viscosity and particle size distribution, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 48(5): 712-727.*
- Solberg, P., Lockner, D., Byerlee, J., 1977. Shear and tension hydraulic fractures in low permeability rocks. *Pure Applied Geophysics, 115: 191-198.*
- Sun, K., Tan, J., Wu, D., 2012. The Research on Dynamic Rules of Crack Extension during Hydraulic Fracturing for Oil Shale In-Situ Exploitation, *Procedia Environmental Sciences, 12(B): 736-743.*
- Tao, Q., Bryant, S.L., 2013. Effect of Hydraulic Fracturing Orientation in Surface Dissolution Process. *Energy Procedia, 37: 4620-4627.*
- Teufel, L.W., Clark, J.A., 1984. Hydraulic fracture propagation in layered rock: experimental studies of fracture containment. *Society of Petroleum Engineers, 24: 19-32.*
- Von Sehonfeldt, H.A., 1970. An Experimental Study of Open-hole Hydraulic Fracturing as a Stress Measurement Method--with Particular Emphasis on Field Tests. Ph.D. Thesis, University of Minnesota, U.S.A.

- Warpinski, N.R., Clark, J.A., Schmidt, R.A., Huddle, L.W., 1981. Laboratory investigation on the effect of in situ stresses on hydraulic fracture containment. Paper SPE 9834 presented at the 1981 SPE/DOE Low Permeability Syrup., Denver, CO.
- Warpinski, N.R., Teufel, L.W., 1987. Influence of geologic discontinuities on hydraulic fracture propagation. *Journal of Petroleum Technology*, 39: 209-220.
- Xiang, J., 2011. A PKN Hydraulic Fracture Model Study and Formation Permeability Determination. Master's thesis, Texas A&M University.
- Yunjin, H., Guolong, C., Weiping, C., Zhenjun, Y., 2014. Simulation of hydraulic fracturing in rock mass using a smeared crack model. *Computers & Structures*, 137: 72-77.
- Zhang, G., Chen, M., 2010. Dynamic fracture propagation in hydraulic re-fracturing. *Journal of petroleum Science and Engineering*, 70: 266-272.
- Zhang, G.M., Liu, H., Zhang, J., Wu, H.A., Wang, X.X., 2010. Three-dimensional finite element simulation and parametric study for horizontal well hydraulic fracture. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 72(3-4): 310-317.
- Zoback, M.D., Rummel, F., Jung, R., Raleigh, C.B., 1977. Laboratory hydraulic fracturing experiments in intact and pro-fractured rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomech Abstract*, 14: 49-58.