

انتخاب پهنه مناسب برای عملیات شکافت هیدرولیکی در سازندهای ایلام و سروک در یکی از چاه‌های نفتی میادین جنوب غربی ایران

مهران کلهری^۱، سجاد قره چلو^۲ و سپیده یاسمی خیابانی^۳

۱. کارشناس ارشد پژوهشی گروه زمین‌شناسی نفت پژوهشکده علوم پایه کاربردی

۲. استادیار گروه زمین‌شناسی نفت، پژوهشکده علوم پایه کاربردی

۳. مربی پژوهش، گروه زمین‌شناسی نفت، پژوهشکده علوم پایه کاربردی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶

چکیده

شکافت هیدرولیکی یکی از روش‌های انگیزش چاه است که به‌صورت گسترده در مخازن نفتی و گازی دنیا در حال انجام می‌باشد. انتخاب پهنه مناسب برای عملیات شکافت هیدرولیکی از نظر اقتصادی بسیار کلیدی است. پارامترهای ژئومکانیکی در انتخاب پهنه‌های کاندید بسیار مؤثر و پر اهمیت می‌باشند. از جمله مهم‌ترین پارامترهای ژئومکانیکی می‌توان به اندازه و جهت‌یابی تنش افقی مینیمم و ویژگی‌های مکانیک سنگی سازند اشاره کرد. در این مطالعه، چگونگی پهنه‌بندی و انتخاب پهنه مناسب، با استفاده از تعیین پهنه‌های تنش افقی مینیمم، تعیین پهنه‌های مکانیک سنگی با استفاده از پارامترهای مکانیک سنگی و با تلفیق این نتایج با حد برش‌های مجاز برای تخلخل و تروایی مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا، پارامترهای مکانیک سنگی شامل مدول یانگ، نسبت پواسون، مقاومت فشاری تک محوری، چقرمگی شکست، و اندیس شکنندگی سنگ با استفاده از لاگ‌های چاه و با به‌کارگیری روابط تجربی مختلف استخراج شده‌اند. با اعمال روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی به‌عنوان یکی از روش‌های یادگیری بدون نظارت یادگیری ماشین بر روی این داده‌ها، شش خوشه تعیین شده‌اند که با استفاده از این خوشه‌ها بازه مخزنی به ۱۳ پهنه A تا M تقسیم‌بندی شده است. با محاسبه مقادیر تنش‌های اصلی و فشار منفذی، از تنش افقی مینیمم برای تعیین پهنه‌های تنش که با موانع تنش محدود شده‌اند استفاده شده است که برای بازه مورد مطالعه در چاه شش پهنه تنش مشخص شده است. با بررسی و تلفیق نتایج پهنه‌بندی مکانیک سنگی، پهنه‌های تنش و پارامترهای مخزنی تخلخل و تروایی به انتخاب پهنه‌های مناسب برای شکافت هیدرولیکی پرداخته شده است که پهنه‌های تنش شش، سه، و پنج به‌عنوان مناسب‌ترین پهنه‌ها انتخاب شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: شکافت هیدرولیکی، خوشه‌بندی سلسله مراتبی، پهنه‌بندی مکانیک سنگی، موانع تنش، پهنه کاندید شکافت هیدرولیکی

مقدمه

در صورت استخراج پروفیل پیوسته‌ای از مهم‌ترین پارامترهای مکانیک سنگی برای هر چاه، می‌توان برای آن، پهنه‌های مکانیک سنگی تعیین کرد که هر پهنه ویژگی‌های مکانیک سنگی کم‌وبیش یکنواختی دارد و میزان مقاومت و استحکام هر پهنه مشخص است. برای تعیین این پهنه‌ها با توجه به خواص مکانیک سنگی آن‌ها می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده کرد که یکی از بهینه‌ترین آن‌ها روش یادگیری ماشین است. با تعیین تنش افقی مینیمم به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترها، و با جمع‌بندی نتایج حاصل از پهنه‌بندی مکانیک سنگی می‌توان پهنه‌های مناسب برای شکافت هیدرولیکی را تعیین کرد.

زمین‌شناسی میدان مورد مطالعه

میدان مورد مطالعه در جنوب غربی ایران با روند شمال غربی-جنوب شرقی، به موازات رشته کوه زاگرس می‌باشد. مخازن اصلی این میدان شامل سازند آسماری و گروه‌های بنگستان و خامی می‌باشد. بر اساس گزارش جیمز و وایند (James and Wynd, 1965) از آلبین تا کامپانین یک چرخه رسوبی از سازندهای کژدمی، سروک، سورگاه و ایلام را می‌توان در زاگرس شناسایی کرد (شکل ۱). برخی از زمین‌شناسان معتقد هستند اگر سازند کژدمی را از این گروه حذف کنیم، چون سازند سورگاه هم در همه جای حوضه زاگرس وجود ندارد، در این صورت گروه بنگستان شامل دو سازند سروک و ایلام خواهد شد. در چنین حالتی به‌جای عنوان گروه بنگستان از سازند بنگستان که شامل دو سازند سروک (در زیر) و ایلام (در بالا) استفاده می‌شود. در نتیجه گروه بنگستان پس از ناپیوستگی سنومانین-تورنین قابل تقسیم به بنگستان پایینی (بخش سنومانین سروک) و بنگستان میانی (بخش تورنین سروک) و بنگستان بالایی (سازند ایلام) است.

سازند ایلام

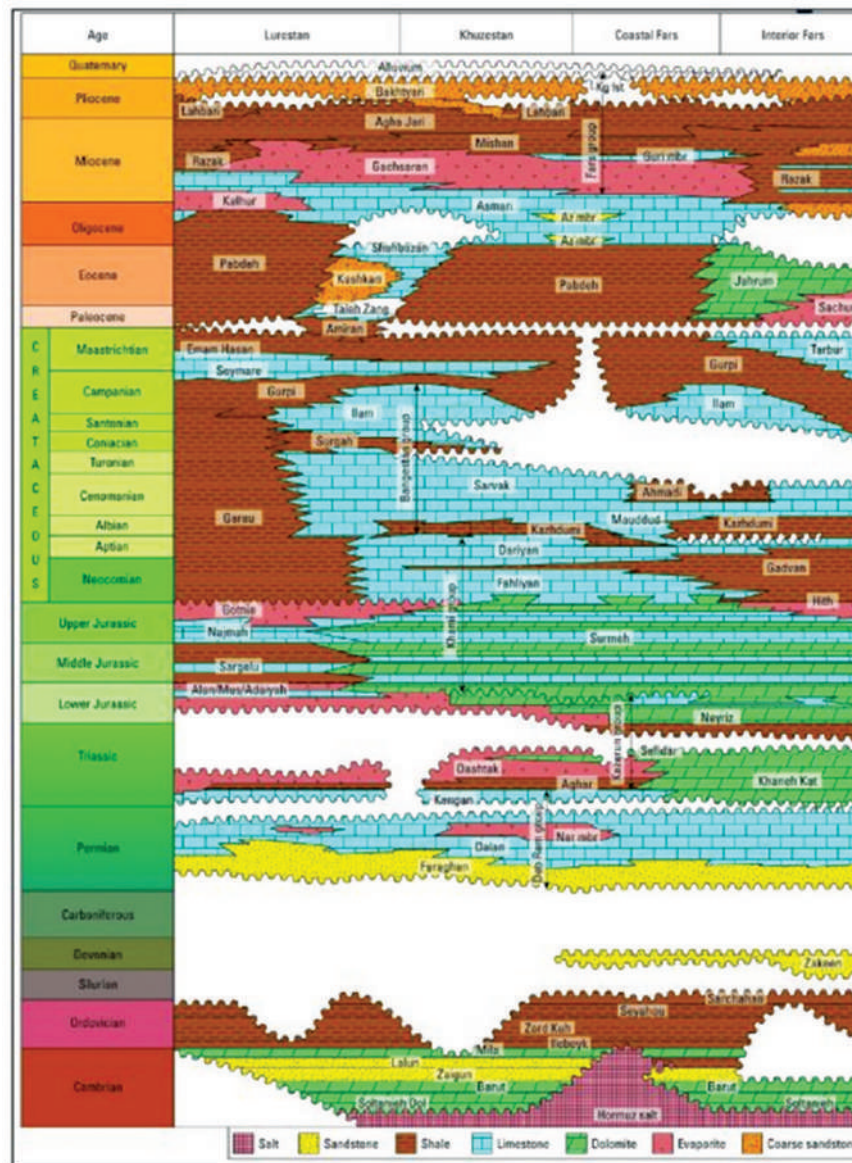
سازند ایلام با دو رخساره عمیق و کم‌عمق دیده می‌شود. برش الگوی این سازند که نشانگر رخساره عمیق است در بخش شمال باختری کبیرکوه در ۱۲ کیلومتری

شکافت هیدرولیکی یکی از روش‌های مهم انگیزش چاه به‌منظور تولید و یا افزایش تولید از سازندهای هیدروکربنی با تراوایی کم یا چاه‌های دچار افت تولید می‌باشد. این فرآیند شامل تزریق سیال‌های گوناگون به درون سازند با فشار بالا برای ایجاد شکستگی کششی در سنگ و گسترش این شکستگی در سازند می‌باشد (Economides and Nolte, 1989; Legarth et al., 2005; Hibbler, and Rae, 2005). تعیین فواصل مناسب برای شکافت هیدرولیکی شامل ارزیابی ویژگی‌های سنگ، با شناسایی بهترین فواصل عمقی برای انجام شکافت هیدرولیکی است. اگرچه پارامترهای بسیاری در شناسایی پهنه‌های مناسب برای انجام شکافت هیدرولیکی دخیل هستند، اما مهم‌ترین این پارامترها، شامل پارامترهای مکانیک سنگی، اندازه و جهت‌یابی تنش‌ها می‌باشند (Wright et al., 1999; Willis et al., 2005; Warpinski et al., 1982; Jahandideh et al., 2016).

اهمیت این پژوهش در این است که با انتخاب دقیق پهنه‌های مناسب برای شکافت هیدرولیکی، می‌توان بهره‌وری چاه‌ها را به‌طور چشمگیری افزایش داد و از افت تولید جلوگیری کرد.

در پژوهش‌های قبلی، روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی و شناسایی مناطق مناسب برای شکافت هیدرولیکی ارائه شده است. این روش‌ها شامل مدل‌های تحلیلی، شبیه‌سازی‌های عددی و استفاده از داده‌های میدانی هستند (Warpinski et al., 1982; Jahandideh et al., 2016). به‌تازگی، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تحلیل و شناسایی پهنه‌های بهینه برای شکافت هیدرولیکی به‌طور گسترده‌ای مطرح شده است و نتایج نشان می‌دهند که این روش‌ها می‌توانند دقت بالاتری در پیش‌بینی مناطق مناسب ارائه دهند (Jahandideh et al., 2016).

هدف از این پژوهش، استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین برای شناسایی دقیق‌تر پهنه‌های بهینه شکافت هیدرولیکی در سازندهای با تراوایی کم است. این پژوهش با استفاده از داده‌های تجربی سازندها، به دنبال ارائه یک مدل بهینه برای انتخاب فواصل مناسب شکافت هیدرولیکی می‌باشد.



شکل ۱. ستون چینه‌شناسی مقایسه‌ای بین تقسیمات حوضه‌ای زاگرس (گروه بنگستان شامل: سازندهای کزدمی، سروک، سورگاه و ایلام)

سبز)، دانه‌های غیر اسکلتی (ائید، اینتراکست و پلوئید) در یک محیط رمپ کربناته کم شیب می‌باشد. از نظر لیتولوژی شامل آهک، آهک دولومیتی و مقادیر جزئی و پراکنده شیل است. سازند ایلام با یک ناپیوستگی قابل توجه بر روی سازند سروک و شیل‌های لافان قرار می‌گیرد.

سازند سروک

در گذشته به این واحد سنگی، سنگ‌آهک‌های هیپوریت دار، سنگ‌آهک‌های رودیست دار که سنگ‌آهک لشتگان گفته می‌شد ولی با مطالعه برش آن در تنگ سروک در

شهرستان ایلام قرار دارد. در این برش، سازند ایلام شامل ۱۹۰ متر سنگ‌آهک‌های رسی دانه‌ریز پلاژیک خاکستری رنگ با لایه‌بندی منظم و میان لایه‌های نازک شیل و سن سانتونین-کامپانین است. رخساره‌های کم‌عمق سازند ایلام، در نواحی فارس و خوزستان گسترش دارد که شامل سنگ‌آهک‌های قلوهای است که همچنان سن سانتونین تا کامپانین دارد. سازند ایلام در میدان مورد مطالعه ضخامت در حدود ۱۸۵ متر دارد. این سازند به صورت هتروژن است و متشکل از رخساره‌های کربناته کم‌عمق تا عمیق شامل، دانه‌های اسکلتی (روزن‌داران پلانکتونیک و بنتیک، جلبک

پهنه‌های مخزنی سازند ایلام و سروک

سازند ایلام به سه پهنه مخزنی (A, B, C) بخش شده است. البته پهنه C دارای سه زیر پهنه می‌باشد. در مخزن ایلام پهنه A و B دارای آب اشباع‌شدگی بالای ۴۰ درصد بوده اما پهنه C مقدار آب اشباع‌شدگی کمتر از ۲۰ درصد می‌باشد. همچنین سایر پهنه‌ها به جز پهنه‌های C1 و C2 تخلخل بسیار پایینی دارند. لذا از نظر پتروفیزیکی پهنه C1 مخزن ایلام مناسب‌ترین پهنه تولیدی می‌باشد. مخزن سروک نیز به شش پهنه (D, E, F, G, H, I) به همراه تعدادی زیر پهنه بخش شده است. این مخزن آب اشباع‌شدگی از ۳۰ تا ۴۵ درصدی و تخلخل کمتر از شش درصد دارد، به جز پهنه I2 که تخلخل در حدود ۱۱ درصد و آب اشباع‌شدگی ۳۲ درصدی دارد. لذا پهنه I2 یکی از مناسب‌ترین پهنه‌های تولیدی مخزن سروک می‌باشد. اطلاعات جزئی‌تر از پهنه‌های مختلف مخزن ایلام و سروک در جدول ۱ ارائه شده است.

کوه بنگستان واقع در شمال بهبهان نام "سروک" جایگزین نام‌های پیشین شد. سازند سروک دو رخساره متفاوت دارد. در محل برش الگو و فارس ساحلی، رخساره‌های کم‌عمق این سازند گسترش دارد. درحالی‌که در ناحیه لرستان، می‌توان رخساره‌های عمیق سازند سروک را دید. سازند سروک در میدان مورد مطالعه در حدود ۷۲۰ متر ضخامت دارد. مرز زیرین سازند سروک با سازند کژدمی پیوسته تدریجی و مرز بالا آن با ناپیوستگی فرسایشی در زیر شیل لافان قرار می‌گیرد. در این مطالعه ماهیت مرز سازندها اهمیت چندانی ندارد. رخساره‌ها این سازند شامل مادستون میلیولیدی، پکستون پلوئیدی بیوکلاست دار، گرینستون پلوئیدی فرامینیفردار، باندستون رودیستی و فلوئستون-رودستون رودیستی می‌باشد. این رخساره‌ها در یک محیط رمپ داخلی تا رمپ خارجی ته‌نشست پیدا کرده‌اند.

جدول ۱. میانگین ویژگی‌های پتروفیزیکی در پهنه‌های مختلف مخزن ایلام و سروک

Formation	Reservoir Zonation	Thickness (m)	Hydrocarbon Column (m)	Sw (%)	Porosity (%)	
					Total	Effective
ILAM	A	۱۹	۰/۱	۴۴/۸	۶/۶	۴/۳
	B	۱۳/۵	۰/۰۰۵۶	۴۶/۸	۵/۳	۲/۷
	C1	۴۱	۶/۴	۱۴/۴	۱۸/۵	۱۸/۴
	C2	۳۸	۵/۱	۱۵/۶	۱۶/۱	۱۶/۱
	C3	۷۵	۴/۱	۲۵	۱۱	۸/۳
	D	۴۲	۰/۰۳۲	۲۷/۸	۵/۵	۰/۷
	E1	۱۰۷	۰/۶	۲۱/۳	۶/۴	۲/۴
	E2	۱۳۰	۳/۸	۲۶/۵	۹	۵/۶
	F1	۴۵	۰/۱	۲۶/۷	۶/۱	۲/۳
	F2	۴۴	۰	-	-	۱/۵
SARVAK	G1	۷۵	۰/۶	۳۳/۸	۵/۶	۳/۶
	G2	۵۲	۱/۵	۳۷/۱	۹/۲	۶/۴
	H	۳۰	۰/۰۲۳	۴۵/۹	۵/۵	۲/۶
	I1-1	۳۲	۰/۰۴۱	۴۲/۶	۶/۶	۴/۵
	I1-2	۴۷	۰	-	-	۱/۷
	I2	۸۵	۵/۸	۳۲/۱	۱۱/۳	۱۱/۲

روش مطالعه

داده‌های موجود برای این مطالعه شامل لاگ‌های سرعت امواج صوتی برشی و فشاری، تخلخل، چگالی، و گاما و نتیجه چهار نمونه آزمون مکانیک سنگی مقاومت فشاری تک‌محوره، همچنین داده‌های آزمون چاه RFT^۱ و FIT^۲ می‌باشند. در این مطالعه با استفاده از لاگ‌های پتروفیزیکی به محاسبه پارامترهای الاستیک مدول یانگ و ضریب پواسون، چقرمگی شکست، مقاومت فشاری تک‌محوره و اندیس شکنندگی سنگ محاسبه خواهند شد. پارامترهای الاستیک دینامیک با استفاده از لاگ‌های صوتی، محاسبه خواهد شد و با استفاده از روابط تجربی توسعه داده شده برای شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب به مقادیر استاتیک تبدیل شده است. مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره با استفاده از رابطه تجربی توسعه داده شده برای شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب محاسبه شده و مقادیر پارامترهای الاستیک و مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ تخمین زده شده، با استفاده از نتایج آزمون‌های مکانیک سنگی دقت سنجی شده است. پارامتر چقرمگی شکست با استفاده از یک رابطه تجربی و با به‌کارگیری سرعت موج فشاری محاسبه شد. همچنین برای محاسبه مقاومت کششی سنگ از رابطه تجربی بر اساس تخلخل استفاده شد و از این پارامتر و مقاومت فشاری تک‌محوره برای محاسبه مقادیر اندیس شکنندگی سنگ نیز استفاده شد. از روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی به‌عنوان یکی از روش‌های یادگیری ماشینی، برای تعیین پهنه‌های مکانیک سنگی استفاده می‌شود. لذا با استفاده از روابط و نتایج آزمون‌های چاه مقادیر تنش‌های اصلی و فشار منفذی محاسبه شده و از پروفیل تنش افقی مینیمم و پهنه‌های ژئومکانیکی برای تعیین پهنه‌های کاندید استفاده خواهد شد. با مطالعه و بررسی پهنه‌های مکانیک سنگی تعدادی پهنه انتخاب خواهند شد و با تلفیق نتایج وضعیت تنش افقی مینیمم و موانع تنشی پهنه‌های مناسب‌تر انتخاب می‌شوند. در نهایت با استفاده از محدودیت‌های لازم از لحاظ پارامترهای مخزنی تخلخل و تولید آب از میان پهنه‌های تعیین شده، پهنه‌های نهایی کاندید معرفی خواهند شد.

استخراج پارامترهای مکانیک سنگی

استخراج پارامترهای مکانیک سنگی در مطالعات ژئومکانیکی اهمیت زیادی دارد و پایه اصلی ساخت مدل‌های ژئومکانیکی می‌باشد. مهم‌ترین پارامترهای مکانیک سنگی که در مدل‌سازی‌های ژئومکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد شامل پارامترهای الاستیک سنگ (مدول یانگ و نسبت پواسون)، و مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ است. برای مطالعات مربوط به شکاف هیدرولیکی، پارامترهای چقرمگی شکست و اندیس شکنندگی نیز دارای اهمیت هستند. به دلیل کم‌هزینه‌تر بودن و امکان استخراج این پارامترها به‌صورت پیوسته، از لاگ‌های چاه برای این منظور استفاده می‌شود و از آزمون‌های مکانیک سنگی بر روی نمونه‌های حاصل از مغزه می‌توان برای صحت سنجی یا افزایش دقت کار استفاده کرد.

مدول الاستیسته و نسبت پواسون

متداول‌ترین نگارها که جهت تخمین پارامترهای الاستیک سنگ استفاده می‌شوند، شامل نگارهای صوتی و چگالی می‌باشند. با در اختیار داشتن این داده‌ها و استفاده از روابط الاستیک سنگ می‌توان پارامترهای مکانیک سنگی لایه‌های زیرسطحی را به‌صورت دینامیکی و پیوسته محاسبه نمود. مدول الاستیسته و نسبت پواسون از طریق روابط ۱ و ۲ قابل محاسبه هستند (Zoback, M., 2010):

$$v = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (1)$$

$$E_{dyn} = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (2)$$

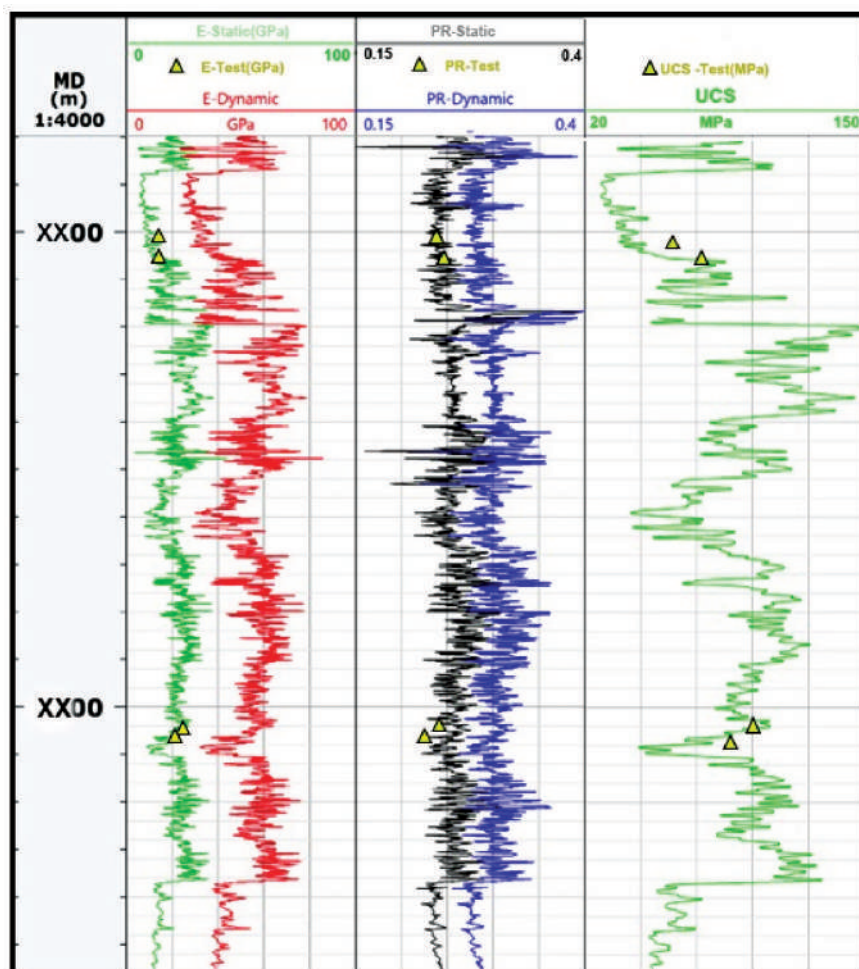
در این روابط V_p و V_s به ترتیب سرعت موج فشاری و برشی برحسب ft/μs و چگالی (ρ) برحسب gr/cm هستند. این پارامترها سپس از طریق روابط تجربی و داده‌های مغزه به پارامترهای استاتیک تبدیل می‌شوند. در این مطالعه پارامترهای الاستیک سنگ، شامل مدول یانگ ابتدا با استفاده از نگاره‌های چاه، شامل سرعت

1. Repeat Formation Tester

2. Formation Integrity Test

انتخاب پهنه مناسب برای عملیات شکافت هیدرولیکی در سازندهای ایلام و سروک ...

- $E_{sta} = 0.414 E_{dyn} - 1.0593$ (۳)
- امواج برشی و فشاری، و چگالی با استفاده از روابط ۱ و ۲ به صورت دینامیکی برآورد شده‌اند. سپس با استفاده از رابطه ۳ که برای یکی از میداین کربناته در جنوب غربی ایران استخراج شده است، به مقادیر استاتیک تبدیل شده است (Fjaer et al. 2008) (شکل ۲).
- همچنین مقادیر مدول یانگ دینامیک با استفاده از رابطه (۴) به مقادیر استاتیک تبدیل شده‌اند (Fjaer et al. 2008).
- $v_{sta} = 0.7v_{dyn}$ (۴)



شکل ۲. مدول یانگ و ضریب پواسون به صورت مقادیر دینامیک و استاتیک به همراه نتایج آزمون‌ها

همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است مقادیر استاتیک محاسبه شده از روابط تجربی انطباق مناسبی با نتایج آزمون‌های مکانیک سنگی مغزه نشان می‌دهد

مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ و چقرمگی شکست

مقاومت فشاری تک‌محوری، به‌عنوان بیشترین تنش که نمونه سنگی تحت تنش محوری بدون محدودیت جانبی، می‌تواند تحمل کند، شناخته می‌شود. این پارامتر از آزمون آزمایشگاهی نمونه‌های سنگی حاصل از مغزه چاه به دست می‌آید. از آنجایی که مغزه‌های چاه کمیاب هستند

و آزمون‌های آزمایشگاهی گران قیمت می‌باشند و همچنین نتایج این آزمون‌های گسسته و به‌صورت نقطه‌ای می‌باشند بهتر است با استفاده از روابط تجربی این پارامتر برآورد شود. برای برآورد مقاومت فشاری تک‌محوره روابط بسیاری وجود دارد که هرکدام از این روابط مطابق با شرایط سازندهایی که آزمایش روی مغزه آن‌ها انجام شده توسعه داده شده‌اند. در این مطالعه از رابطه ۵ که برای مخازن نفتی جنوبی ایران توسعه داده شده است، استفاده می‌شود (شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۳۹۳):

خوشه‌بندی و تعیین پهنه‌های مکانیک سنگی

خوشه‌بندی سلسله مراتبی روشی برای آنالیز خوشه‌ای است که به دنبال ایجاد سلسله مراتبی از خوشه‌ها است. از آن برای گروه‌بندی اشیاء مشابه استفاده می‌شود، جایی که هر خوشه از خوشه‌های دیگر متمایز است و اشیاء درون هر خوشه به‌طور کلی شبیه به یکدیگر هستند. دو نوع اصلی خوشه‌بندی سلسله مراتبی وجود دارد: تجمیعی و تقسیمی. خوشه‌بندی تجمیعی با در نظر گرفتن هر مشاهده به‌عنوان یک خوشه جداگانه شروع می‌شود و سپس دو خوشه مشابه را به‌طور مکرر ادغام می‌کند تا زمانی که همه خوشه‌ها با هم ادغام شوند. خوشه‌بندی تقسیمی با همه مشاهدات در یک خوشه شروع می‌شود و سپس با حرکت به سمت پایین سلسله مراتب آن‌ها را به‌صورت بازگشتی جدا می‌کند. برای انجام خوشه‌بندی، پس از آماده کردن داده‌های لازم، روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی برای تعیین خوشه‌های بهینه اعمال می‌شود. برای این منظور پس از انتخاب داده‌های ورودی با استفاده از روش اقلیدوسی فاصله بین زوج داده‌ها با همدیگر محاسبه می‌شود. در مرحله بعد با استفاده از الگوریتم‌های مختلف و فاصله محاسبه شده بین زوج داده‌ها در مرحله قبلی، زوج‌ها به همدیگر ارتباط داده شدند. در ادامه درخت خوشه‌ای برای داده‌های مورد مطالعه تهیه می‌شود و با استفاده از آن، شماره تعداد خوشه‌های بهینه مشخص می‌شود و هر دسته داده به یک خوشه با ویژگی‌های مشخص اختصاص داده می‌شود (Kalhor et al., 2024). برای تعیین پهنه‌های مکانیک سنگی پارامترهای مقاومت فشاری تک‌محوره، مدول یانگ، چقرمگی شکست، ضریب پواسون و اندیس شکنندگی سنگ به‌عنوان متغیرهای ورودی انتخاب شده است (شکل ۴). بر روی این داده‌ها روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی اعمال شده است و در ادامه درخت خوشه‌ای برای داده‌های مورد مطالعه چاه تهیه شده است (شکل ۳). با استفاده از درخت خوشه‌ای، شماره تعداد گونه‌های سنگی بهینه مشخص شد.

1. Fracture Toughness
2. Brittleness Index
3. Brittleness Index

$$UCS = ۲.۲۸E_{sta} + ۷.۳ \quad (۵)$$

در این رابطه E_{sta} مدول یانگ استاتیک برحسب GPa می‌باشد. مقادیر محاسبه شده با استفاده از این رابطه و همچنین نتایج تست‌های مکانیک سنگی در ترک سوم شکل ۲ آورده شده است. مقادیر برآورد شده با استفاده از این رابطه انطباق به نسبت خوبی را نتایج تست‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

چقرمگی شکست^۱ و اندیس شکنندگی^۲ سنگ

چقرمگی شکست توانایی مقاومت سنگ در برابر گسترش شکستگی، از شکستگی‌های پیشین در سنگ است. مقادیر بالای چقرمگی شکست نشان‌دهنده فشار بیشتر برای گسترش شکستگی در سنگ است و برعکس. در طراحی شکاف هیدرولیکی پارامتر چقرمگی شکست اهمیت بالایی دارد زیرا گسترش شکاف را کنترل می‌کند. رابطه زیر برای محاسبه این پارامتر توسعه داده شده است (Jin, X. et al, 2014):

$$K_{IC} = -۱.۶۸ + (۰.۶۵ * V_p) \quad (۶)$$

که در این رابطه V_p سرعت موج فشاری در سنگ و K_{IC} چقرمگی شکست برحسب $MPa.m^{1/2}$ می‌باشد.

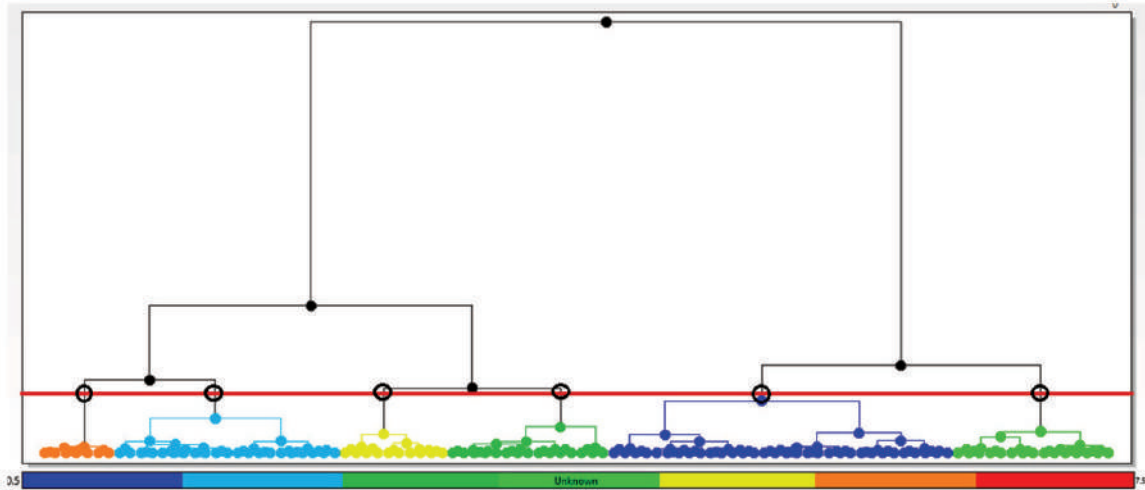
اندیس شکنندگی^۳ (BI) یک پارامتر حیاتی است که در شکاف هیدرولیکی برای مشخص کردن رژیم تغییر شکل سنگ استفاده می‌شود، که محدوده‌ای از ترد خالص (شکننده) تا شکل‌پذیر (نرم) را پوشش می‌دهد. مدل‌های مختلفی برای تعیین کمیت BI بر اساس ویژگی‌های سنگ مانند کانی‌شناسی، پارامترهای الاستیک یا داده‌های تنش- کرنش توسعه یافته‌اند. هدف این مدل‌ها بهینه‌سازی BI با کنترل شرایط زمین‌شناسی و تزریقی است (Jin et al., 2014, Huang et al., 2015, Meng et al., 2015). برای محاسبه اندیس شکنندگی در این مطالعه از رابطه ۷ استفاده شده است:

$$BI = \frac{UCS - \sigma_t}{UCS + \sigma_t} \quad (۷)$$

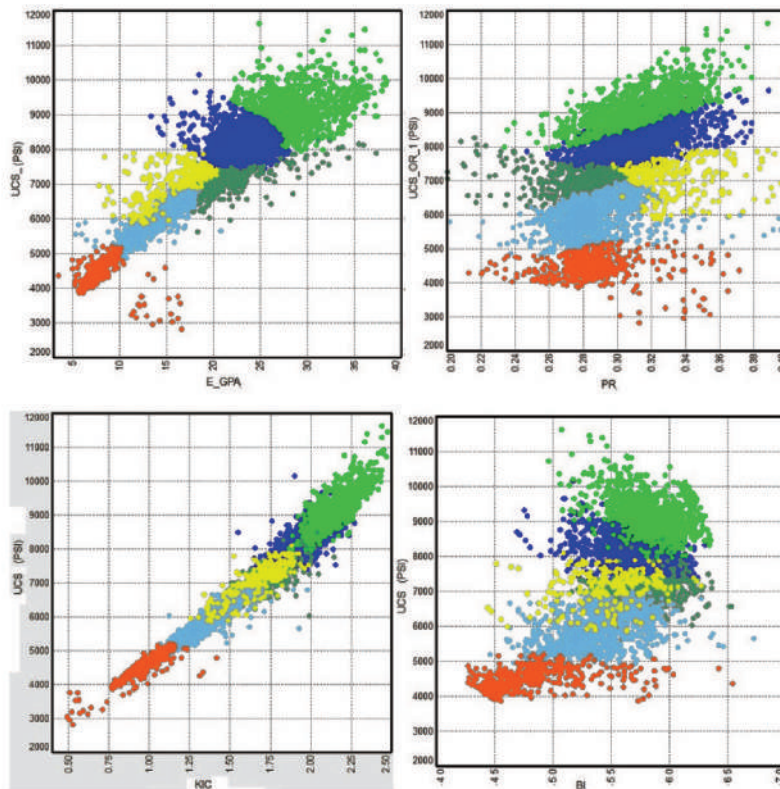
که در آن UCS مقاومت فشاری تک‌محوری، و σ_t مقاومت کششی سنگ می‌باشد.

انتخاب پهنه مناسب برای عملیات شکافت هیدرولیکی در سازندهای ایلام و سروک ...

خوشه به عنوان تعداد خوشه‌های بهینه انتخاب شده است. مرحله آخر خوشه‌بندی با تعیین حد برش و انتخاب تعداد خوشه‌ها (شش خوشه بهینه در این مطالعه) انجام گرفت. پس از مشخص شدن گونه‌های سنگی، با استفاده از رسم گونه‌های سنگی در برابر عمق، چگونگی تغییرات بر اساس عمق مشخص می‌شود و امکان پهنه‌بندی مکانیک سنگی فراهم شد. پس از مشخص شدن پهنه‌های مکانیک سنگی، با بررسی خواص مکانیکی هر پهنه از لحاظ پارامترهای مکانیک سنگی، پهنه‌های با مقاومت بیشتر و پهنه‌های ضعیف‌تر مشخص می‌شوند و تصمیم‌گیری برای انتخاب پهنه مناسب انجام شد.



شکل ۳. درخت خوشه‌ای برای متغیرهای انتخاب شده به عنوان ورودی تعیین گونه‌های سنگی در چاه مورد مطالعه



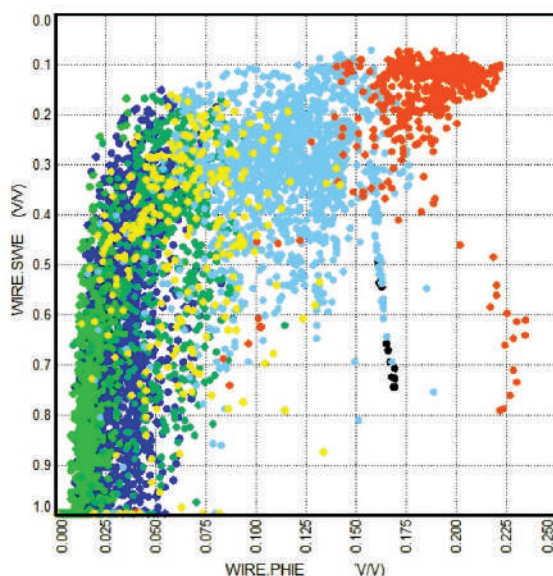
شکل ۴. رسم دو بعدی تعدادی از متغیرهای ورودی خوشه‌بندی

کمترین میزان مدول یانگ و مقاومت فشاری تک محوری را دارند و بیشترین مقاومت مربوط به خوشه سه و سپس خوشه یک می باشد، که بیشترین میزان مدول یانگ و مقاومت فشاری تک محوری را دارند.

جدول ۲ مقادیر میانگین برای هر یک از پارامترهای انتخابی در شش خوشه را به تفکیک نشان می دهد. همان طور که از جدول ۲ مشخص است، کمترین مقاومت سنگ مربوط به خوشه شش و سپس خوشه دو می باشد که

جدول ۲. پارامترهای مکانیک سنگی استفاده شده در خوشه بندی، و میانگین هر پارامتر در خوشه های مختلف

Name	۱	۲	۳	۴	۵	۶
Poisson Ratio (Static)	۰/۳۰۴۰	۰/۲۸۴۸	۰/۳۲۲۹	۰/۲۹۷۲	۰/۳۲۵۵	۰/۲۸۴۲
Young's Modulus (Static)	۲۵/۵۶	۱۳/۶۱	۲۵/۱۲	۱۸/۸۷	۱۵/۸۷	۸/۳۱
BI	۵/۸۵۸۰	۵/۳۱۸۲	۵/۶۰۶۰	۵/۷۳۵۱	۵/۴۵۶۳	۴/۷۱۷۰
KIC	۱/۹۷۹۳	۱/۳۴۶۴	۲/۱۴۰۹	۱/۶۶۵۲	۱/۶۷۳۲	۰/۹۸۵۹
UCS	۵۷/۰۵	۴۰/۳۴	۶۲/۴۷	۴۷/۸۰	۴۸/۲۷	۳۲/۱۲



شکل ۵. نمودار اشباع آب-تخلخل با لحاظ خوشه های تعیین شده

فشار منفذی

در این مطالعه برای تخمین فشار منفذی در چاه های مورد مطالعه از روش گرادیان سیال استفاده شده است. در این روش با در اختیار داشتن مقادیر فشار مبنا و گرادیان فشار آب، نفت و یا گاز از طریق رابطه زیر می توان فشار منفذی را محاسبه نمود.

$$P_f = P_1 + \rho_f g (Z_2 - Z_1) \quad (۸)$$

در این رابطه P_1 فشار سیال سازند در عمق Z_1 و P_2 فشار سیال در عمق Z_2 و ρ_f چگالی سیال و g شتاب جاذبه

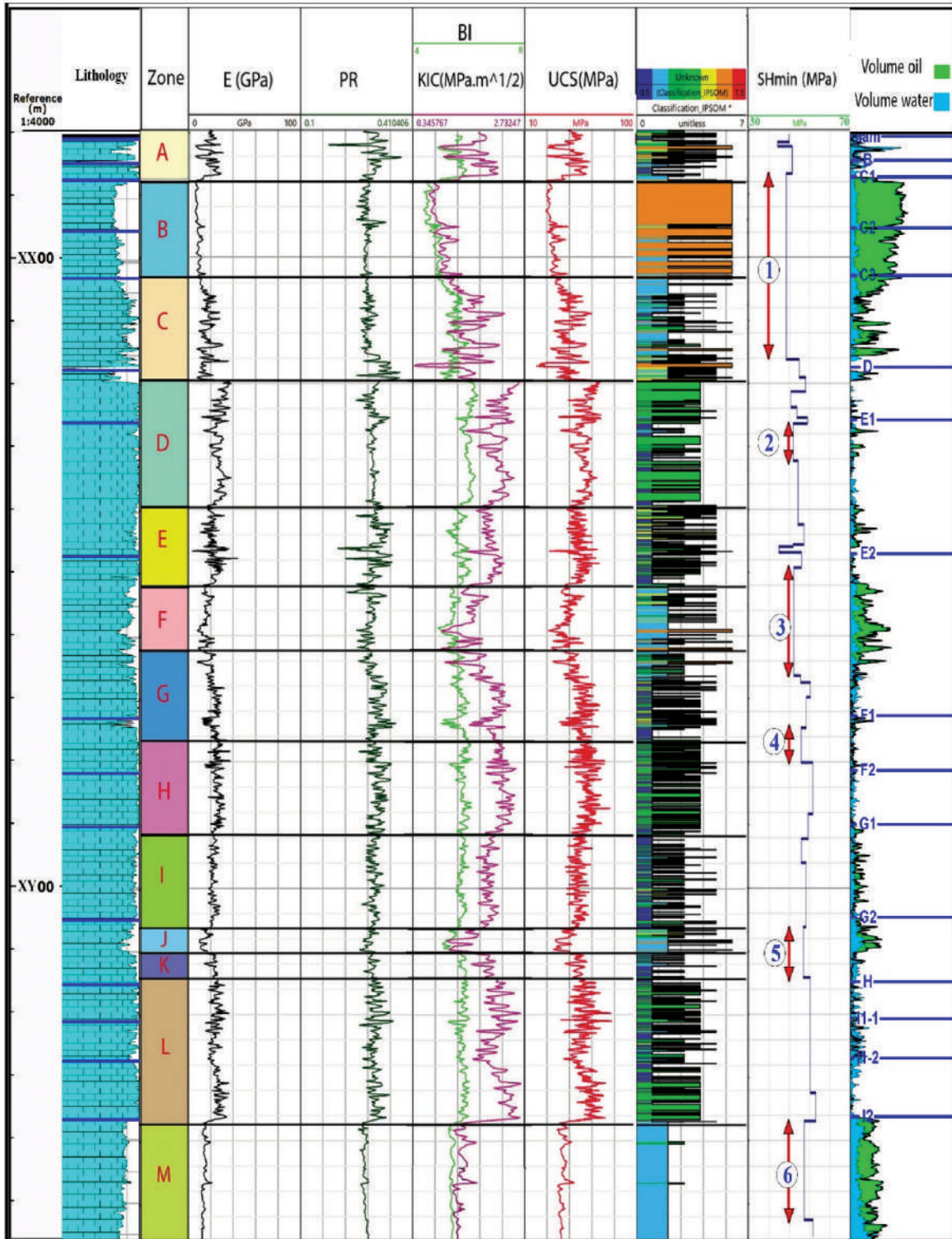
در شکل ۶ گونه های مکانیکی به همراه پارامترهای مکانیک سنگی استفاده شده، نشان داده شده است. بر اساس این خوشه بندی بازه مورد مطالعه به ۱۳ پهنه بخش شده است. که از A تا M نام گذاری شده اند. از میان این پهنه ها پنج پهنه J، F، C، B، و M از خوشه های دو و شش تشکیل شده اند که دارای کمترین شاخص های مقاومتی سنگ هستند و همچنین همان طور که در شکل ۶ نشان داده است وجود هیدروکربن در این پهنه ها، انجام عملیات شکاف هیدرولیکی در این پهنه ها را توجیه پذیر می کند.

از طرفی بررسی گونه های مکانیک سنگی از لحاظ تخلخل و تراوایی اهمیت بسزایی در انتخاب پهنه های کاندید دارد. ۵ آورده شده است. این شکل نشان می دهد که خوشه های با کمترین میزان پارامترهای مقاومتی که شامل خوشه های شش و دو می شوند بیشترین میزان تخلخل و تراوایی را دارند که از لحاظ دانش مکانیک سنگ منطقی به نظر می رسد چرا که این دو خوشه کمترین میزان پارامترهای مقاومتی سنگ را دارند. خوشه های دو، پنج از لحاظ وضعیت تخلخل و اشباع شدگی آب مناسب هستند چرا که در خوشه شش تخلخل به صورت طبیعی بالاست.

در ادامه به محاسبه مقادیر تنش های اصلی و تعیین جهت یابی تنش های افقی پرداخته می شود.

انتخاب پهنه مناسب برای عملیات شکافت هیدرولیکی در سازندهای ایلام و سروک ...

زمین است. این رابطه مقدار گرادیان نفت برابر با 0.35 psi/ft در نظر گرفته شده است (شکل ۷).
 با استفاده از مقادیر تست چاه RFT و با استفاده از رابطه ۸ فشار منفذی در چاهها تخمین زده شده است. در



شکل ۶. مقادیر پارامترهای مکانیک سنگی، گونه‌های سنگی و پهنه‌های تعیین شده برای چاه مورد مطالعه

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - \alpha\sigma_v) + \alpha P_p + \frac{E_{sta}}{(1-\nu^2)} (\epsilon_x + \nu\epsilon_y) \quad (10)$$

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - \alpha\sigma_v) + \alpha P_p + \frac{E_{sta}}{(1-\nu^2)} (\epsilon_y + \nu\epsilon_x) \quad (11)$$

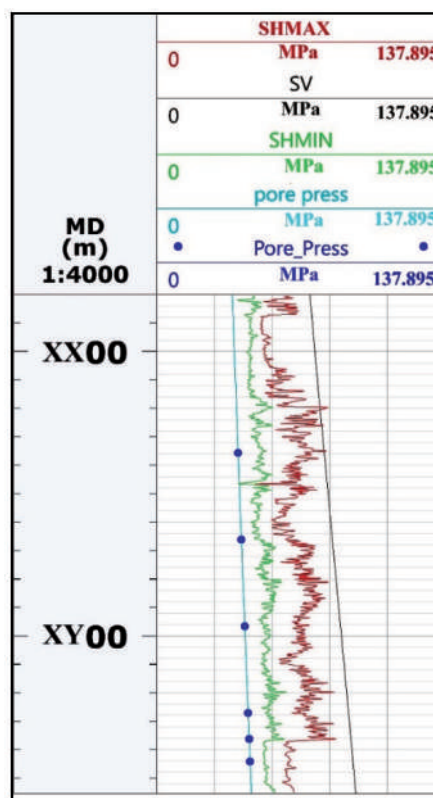
در این روابط ν ضریب پواسون، α ضریب بایوت، P_p فشار منفذی و σ_v تنش عمودی برحسب MPa، E_{sta} مدول الاستیسیته استاتیک برحسب GPa و ϵ_x ، ϵ_y به ترتیب کرنش نکتونیک در جهت تنش افقی حداقل و حداکثر است. مقادیر تنش‌های افقی و قائم در چاه مورد مطالعه در شکل ۶ نشان داده شده است.

جهت تنش‌های افقی

یکی از راه‌های تعیین جهت تنش‌های افقی، استفاده از شکستگی‌های برشی و کشری دیواره چاه است. شکستگی برشی دیواره چاه قائم در راستای تنش افقی حداقل اتفاق می‌افتد. با حفر یک چاه قائم باعث می‌شود تا مسیرهای تنش در جهت‌های موازی و عمود بر دیواره چاه دچار تغییر شده و در اطراف چاه تمرکز تنش ایجاد شود. لذا وقوع شکست برشی در راستای تنش افقی مینیمم محتمل‌تر از راستای تنش افقی ماکسیمم است (Zoback, 2010).

ابزارهای متفاوتی برای تعیین جهت تنش‌های اصلی وجود دارد که در این میان نگارهای تصویری و کالیپر چند بازویی نقش به‌سزایی دارند. بهترین روش برای تشخیص شکستگی‌های چاه‌نگارهای تصویری هستند. این نگارها عمق بررسی بسیار پایینی دارند. در گل حفاری پایه آبی از FMI و در گل‌های پایه روغنی از OBMI¹ و UBI² استفاده می‌شود، که به‌طور کلی OBMI برای تعیین شیب ساختاری و ساختارهای رسوبی و UBI برای تعیین شکستگی‌ها مناسب است (Schulumberger, 2003).

در چاه مورد مطالعه نگار تصویری مطابق شکل ۷ در سازند سرروک موجود است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در این چاه تن‌ها یک شکستگی برشی



شکل ۷. پروفیل فشار منفذی و مقادیر نتایج تست RFT در چاه مورد مطالعه

مقدار و جهت تنش

تنش قائم

تنش عمودی در هر نقطه از چاه معادل وزن روباره می‌باشد که بر اساس نگار چگالی و با استفاده از انتگرال‌گیری دانسیته سنگ از سطح تا عمق مورد نظر مطابق رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\sigma_v = \int_0^z \rho(z) g dz \approx \bar{\rho} g z \quad (9)$$

در این رابطه σ_v تنش عمودی، $\bar{\rho}$ چگالی متوسط، g ثابت گرانش و z عمق از سطح زمین است. وضعیت تنش قائم در چاه مورد مطالعه در شکل ۶ نشان داده شده است.

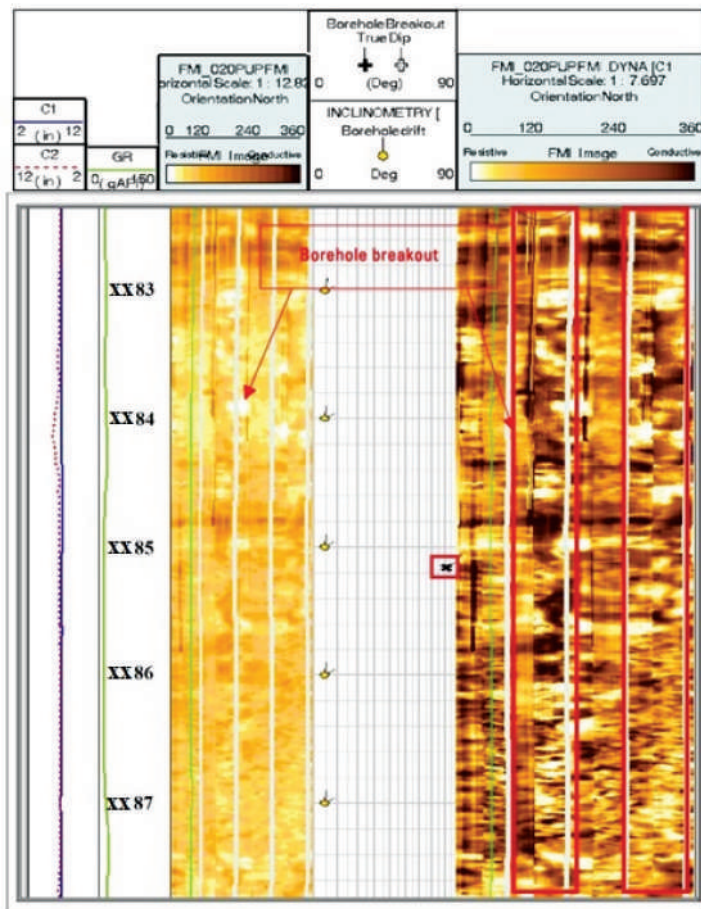
تنش‌های افقی

روش‌های تخمین تنش به دلیل کم‌هزینه بودن و سرعت در محاسبه مورد استقبال محققین قرار گرفته‌اند. یکی از روش‌های متداول برای تخمین تنش‌های افقی استفاده از روابط پوروالاستیک است (Archer and Rasouli 2012):

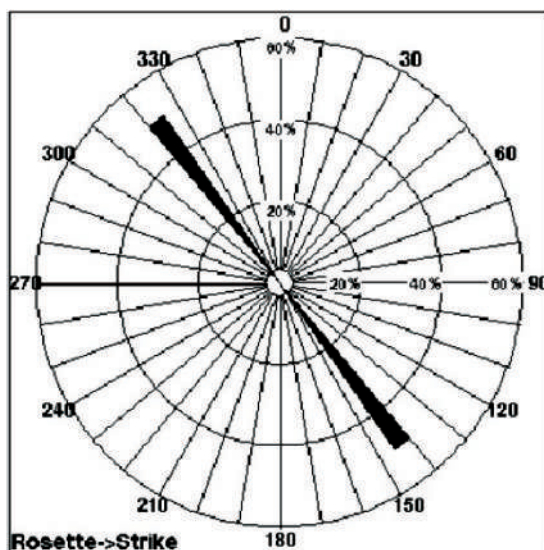
1. Oil-based microimager
2. Ultrasonic Borehole Imager

انتخاب پهنه مناسب برای عملیات شکافت هیدرولیکی در سازندهای ایلام و سروک ...

مشخص رخ داده است. با توجه به این شکل امتداد این شکستگی N37W بوده (شکل ۸) که مطابق با جهت تنش افقی مینیمم است. با توجه به عمود بودن جهت تنش افقی ماکسیمم در چاه مورد مطالعه در راستای N 50-70 E خواهد بود.



شکل ۸. نمایش شکستگی برشی در چاه



شکل ۹. امتداد شکستگی برشی رخ داده (شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب، ۱۳۸۹)

موانع تنش^۱

یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در ایجاد و رشد شکاف تنش افقی مینیمم می‌باشد که شکاف هیدرولیکی در راستای این تنش رشد خواهد کرد. در صورتی که در پروفیل تنش افقی مینیمم پهنی وجود داشته باشد که میزان تنش در آن پهنه از بخش‌های بالایی و پایینی خود کمتر باشد، به بخش‌های با تنش بیشتر موانع تنش گفته می‌شود. موانع تنش با محدود کردن ارتفاع شکاف و افزایش عرض، نقش مهمی در شکاف هیدرولیکی ایفا می‌کنند و بر مهار شکاف در سازندهای لایه‌ای تأثیر می‌گذارند (Wu, et al., 2022). مانع تنش بر افزایش تدریجی فشار سیال تزریقی تأثیرگذار است که خود بر رفتار رشد شکاف مؤثر است (Xu, et al., 2019). بنابراین، موانع تنشی در درک و مدیریت فرآیندهای شکاف هیدرولیکی یکی از پارامترهای تأثیرگذار است. از طرفی رشد عمودی کنترل نشده شکاف ممکن است منجر به نفوذ شکاف به پهنه آبدار مخزن شود. در این مطالعه پروفیل تنش استخراج شده در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده است پهنه‌هایی که توسط موانع تنش محدود شده‌اند با شماره از یک تا شش نشان داده شده‌اند.

بحث

یکی از کلیدی‌ترین پارامترها در تعیین پهنه مناسب برای عملیات شکاف هیدرولیکی، اندازه تنش افقی مینیمم می‌باشد. اهمیت این پارامتر در مهار رشد عمودی شکاف است، و پهنه‌هایی حائز اهمیت هستند که میزان تنش در آن‌ها پایین‌تر باشد و توسط پهنه‌های با تنش بالاتر (موانع تنش) احاطه شده باشند. به همین منظور شش پهنه تنش در پروفیل تنش افقی مینیمم چاه مورد مطالعه شناسایی شده است (شکل ۶). که از میان آنها، پهنه‌هایی که از لحاظ شرایط مقاومتی سنگ، و مخزنی، وضعیت مناسبی داشته باشند، انتخاب می‌شوند. ترجیح بر این است که این پهنه‌ها بیشتر از خوشه‌های شش و دو تشکیل شده باشند (مقاومت مکانیک سنگی کمتر)، اشباع هیدروکربن داشته باشند و همچنین از لحاظ مقادیر تخلخل و تراوایی در محدوده

نتیجه‌گیری

با بررسی نتایج و پهنه‌های تعیین شده برای چاه مورد مطالعه نتایج زیر به دست آمده است:

- پهنه‌های M و B نسبت به پهنه‌های دیگر یکنواخت‌تر هستند و پارامترهای مکانیک سنگی کمترین تغییرات را نسبت به سایر پهنه‌ها دارند.
- پهنه‌های H، G، E، D، و L بیشتر از خوشه‌های یک و سه که مقاوم‌ترین خوشه‌ها هستند تشکیل شده‌اند و دارای مقاومت بالایی می‌باشند. این پهنه‌ها دارای بالاترین مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول

1. Stress Barriers

منابع

- یانگ و چقرمگی شکست هستند.
- پهنه‌های J، F، C، B و M بیشتر از خوشه‌های دو و شش تشکیل شده‌اند و دارای کمترین مقاومت هستند. این پهنه‌ها دارای کمترین مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول یانگ و چقرمگی شکست هستند. همچنین این پهنه‌ها حاوی هیدروکربن می‌باشند.
 - پهنه‌های F، و J که در دسته پهنه‌های با کمترین مقاومت هستند، هر کدام توسط دو پهنه با مقاومت یا تنش بالاتر در بالا و پایین احاطه شده‌اند که پهنه‌های مقاوم بالا و پایین به‌عنوان یک سد در برابر رشد عمودی شکاف عمل می‌کند.
 - با تقریب به نسبت خوب پهنه‌های مکانیک سنگی B و C معادل پهنه تنش‌ی یک، پهنه F معادل پهنه تنش‌ی سه، پهنه مکانیک سنگی J معادل پهنه تنش‌ی پنج، پهنه مکانیک سنگی M معادل پهنه تنش‌ی شش می‌باشند که این پهنه‌های تنش‌ی با موانع تنش‌ی احاطه شده‌اند که به‌عنوان سد در برابر رشد عمودی شکاف می‌تواند عمل کند.
 - با لحاظ کردن محدودیت اشباع آب و تخلخل، بهترین پهنه‌ها به ترتیب پهنه تنش‌ی شش معادل پهنه مکانیک سنگی M و پهنه مخزنی I2، پهنه تنش‌ی سه که کم‌وبیش معادل پهنه مکانیک سنگی F و پهنه مخزنی E2 است، پهنه تنش‌ی (5) که کم‌وبیش معادل پهنه مکانیک سنگی J و K پهنه مخزنی G2 است و بخش پایینی پهنه تنش‌ی یک که معادل پهنه مکانیک سنگی C و پهنه مخزنی C3 است مناسب شکافت هیدرولیکی هستند (بخش بالایی پهنه تنش‌ی یک که معادل پهنه مکانیک سنگی B و پهنه مخزنی C1 و C2 می‌باشد تخلخل 18 درصد دارد و تولید آن به‌صورت طبیعی بالاست).
 - بهترین جهت‌یابی برای مشبک‌کاری چاه حدود N50E می‌باشد که راستای تقریبی تنش افقی بیشینه می‌باشد.
- شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، 1393. انجام آزمایش نشت و نشت گسترده در چاه XX، ایران، گزارش شماره پ-7991.
- شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، 1389. تفسیر نمودار تصویری، گزارش شماره پ-6756.
- Archer, S. and Rasouli, V., 2012. A log based analysis to estimate mechanical properties and in-situ stresses in a shale gas well in North Perth Basin. *Petroleum and Mineral Resources*, 21, 122-135.
- Economides, M.J. and Nolte, K.G., 1989. *Reservoir stimulation*, 2, 6-10.
- Fjaer, E., Holt, R.M., Horsrud, P. and Raaen, A.M., 2008. *Petroleum related rock mechanics*, Vol. 53, Elsevier.
- Hibbeler, J. and Rae, P., 2005. *Simplifying hydraulic fracturing-theory and practice*. SPE-97311.
- Huang X.R., Huang J.P., Li, Z.C., Yang Q.Y., Sun Q.X., Cu, W., 2015. Brittleness index and seismic rock physics model for anisotropic tight-oil sandstone reservoirs. *Applied Geophysics*, 12, 11-22.
- Jahandideh, A. and Jafarpour, B., 2016. Optimization of hydraulic fracturing design under spatially variable shale fracability. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 138, 174-188.
- James G. A. and Wynd J. G., 1965. Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area, AAPG, *Bulletin*, 49, 2182-2245.
- Jin X., Shah S., Roegiers J.C. and Hou B., 2014. Breakdown pressure determination A fracture mechanics approach. USA: SPE.
- Kalhari, M., Mehrabi, H., Sfidari, E. and Khiabani, S.Y., 2024. Target zone selection for hydraulic fracturing using sedimentological and rock mechanical studies with the support of the machine learning method of cluster analysis. *Geo-*

- energy Science and Engineering, 237, p.212826.
- Legarth, B., Huenges, E. and Zimmermann, G., 2005. Hydraulic fracturing in a sedimentary geothermal reservoir: Results and implications. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42,77, 1028-1041.
 - Meng F., Zhou H., Zhang C., Xu R. and Lu J., 2015. Evaluation methodology of brittleness of rock based on post-peak stress-strain curves. *Rock. Mech. Rock. Eng.*, 48 1787-1805.
 - Schlumberger., 2003. Using borehole imagery to reveal key reservoir features. In *Reservoir Optimization Conference*. Tehran., Iran.
 - Usman, U., Marino, D. and Soelistijono, M., 2010. Study On Productivity Improvement Of Low Permeability Gas Reservoir By Hydraulic Fracturing. *Scientific Contributions Oil and Gas*, 33(2), 120-128.
 - Warpinski, N.R., Clark, J.A., Schmidt, R.A. and Huddle, C.W., 1982. Laboratory investigation on the effect of in-situ stresses on hydraulic fracture containment. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 22(03), .333-340.
 - Willis, R.B., Fontaine, J., Paugh, L. and Griffin, L., 2005. Geology and geometry: A review of factors affecting the effectiveness of hydraulic fractures. SPE-97993.
 - Wright, C.A., Weijers, L., Davis, E.J. and Mayerhofer, M., 1999. Understanding hydraulic fracture growth: Tricky but not hopeless. SPE-56724
 - Wu, B., Wei, X., Wang, W., Li, J., Liu, T. and Wang, X., 2022. Effect of stress and material barriers on hydraulic fracture height containment in layered formations. *Environmental Earth Sciences*, 81,1, 255.
 - Xu, W., Prioul, R., Berard, T., Weng, X. and Kresse, O., 2019. Barriers to hydraulic fracture height growth: A new model for sliding interfaces. SPE-194327.
 - Zoback, M.D., 2010. *Reservoir geomechanics*. Cambridge university press.