

مقاله پژوهشی

مطالعه مقایسه ای معیار شکست به منظور تعیین پنجره ایمن وزن گل در یکی از چاه‌های نفت جنوب غرب ایران

عیسی خدای^۱؛ احمد رمضان زاده^۲؛ مهدی نوروزی^۳

۱. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، سمنان، ایران
۲. دانشیار؛ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، سمنان، ایران
۳. استادیار؛ دانشیار؛ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، سمنان، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۱۱ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۴

شناسه دیجیتال (DOI): 1022107/JPG.2021.233743.1124

واژگان کلیدی	چکیده
میدان مارون مدل ژئومکانیکی چاه پیمایی موهر-کولمب موگی-کولمب Breakout	تعیین مناسب پنجره وزن گل ایمن به منظور کاهش ریسک هرزروی گل حفاری و نیز کاهش ریسک فوران چاه حائز اهمیت است و در نهایت باعث ایجاد یک حفاری ایمن و افزایش سرعت عملیات حفاری خواهد شد. در این تحقیق بر روی یکی از چاه‌های نفتی مارون واقع در جنوب غرب ایران به عنوان مورد مطالعاتی تمرکز شده است. جهت برآورد پارامترهای ژئومکانیکی از جمله پارامترهای مکانیکی سنگ، فشار منفذی و همچنین تنش‌های منطقه از لاگ‌های چاه پیمایی و صوتی و روابط تجربی مناسب برای میدان مورد نظر، استفاده شده است. پس از برآورد پارامترهای ژئومکانیکی سازند و ساخت مدل ژئومکانیکی، مدل ساخته شده اعتبارسنجی شده تا نسبت به صحت مدل اطمینان حاصل شود. پس از تهیه مدل ژئومکانیکی معتبر، در ادامه پایداری چاه موردنظر به روش تحلیلی با استفاده از دو معیار شکست موهر-کولمب و موگی-کولمب مورد بررسی قرار گرفته و کاربرد معیارهای فوق در تعیین پنجره ایمن وزن گل باهم مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که معیار موگی - کولمب نسبت به معیار موهر - کولمب، شکستگی‌های ایجاد شده در چاه مورد مطالعه مانند اتفاق Breakout را بهتر تشخیص می‌دهد. به منظور صحت سنجی مدل ژئومکانیکی و تایید کارایی معیارهای تجربی بکار برده شده در تشخیص پدیده Breakout، شبیه‌سازی عددی چاه در دو مرحله ژئواستاتیک و حفاری انجام شد. نتایج شبیه‌سازی، بیانگر تشکیل پدیده Breakout در عمق مورد مطالعه و در نتیجه تاییدی بر شیوه بکار برده شده در این مقاله است.

بنابراین تحلیل پایداری چاه، جزء برنامه‌های کاربردی بسیاری از شرکت‌های نفتی شده است. تاکنون پایداری چاه با ادبیات مختلف در سطح جهان مورد مطالعه قرار گرفته است (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006; Akhtarmanesh et al, 2013; Li et al, 2017; Zhou et al, 2018). عوامل موثر بر پایداری چاه شامل شیب و آزیموت چاه، تنش‌های برجا، وزن سیال حفاری، پارامترهای مقاومتی سنگ و ... است. برخی از این عوامل قابل کنترل و برخی از آنها غیر قابل کنترل هستند. از جمله عوامل قابل کنترل می‌توان به شیب و آزیموت چاه و وزن سیال حفاری اشاره نمود. با تغییر این پارامترها، می‌توان تا حد زیادی بر پایداری چاه اثر گذاشت و تا حد امکان

۱. مقدمه

بسیاری از میدان‌های نفتی با مشکلات ژئومکانیکی ناشی از فشار بیش‌ازحد، ناپایداری‌های چاه، تراکم مخزن، شکست لوله جداری چاه، تولید ماسه، نشست سطح زمین و فعالیت گسل‌ها روبرو هستند. مطالعات ژئومکانیکی در ایران عمدتاً برای سازند آسماری انجام شده است (Fattahpour et al, 2012; Darvish et al, 2015; Ghafoori et al, 2018; Lashkaripour et al, 2018). ناپایداری چاه هر ساله هزینه زیادی را متحمل شرکت‌های نفت سراسر جهان می‌کند. برای رسیدن به پایداری چاه، مهندسان نفت و زمین‌شناسان با طیف وسیعی از مشکلات در طول عملیات مخازن مواجه می‌شوند.

در واقعیت، در سازه‌های زیرزمینی تنش به صورت سه بعدی است که مقادیر سه تنش اصلی می‌تواند با یکدیگر متفاوت باشد. بنابراین ضروری است که معیارهای تسلیم نیز به این حالت واقعی نزدیکتر شوند. لذا باید نقش تنش اصلی میانی^۲ را مدنظر قرار داد. نتایج حاصل از تحقیقات آزمایشگاهی نشان داده است که تاثیر مقدار تنش اصلی میانی بر شکست نسبت به مقادیر تنش اصلی حداکثر^۳ و حداقل کمتر است (Fjaer *et al*, 2008). اما نمی‌توان از نقش آن صرف نظر نمود مخصوصاً زمانی که تحلیل پایداری از حساسیت و پیچیدگی بیشتری برخوردار باشد. به عنوان مثالی از این نوع تحلیل پایداری، می‌توان به تحلیل پایداری چاه اشاره نمود. در تحلیل پایداری چاه انتخاب معیار تسلیم مناسب از اهمیت خاصی برخوردار است. رایج‌ترین معیار مورد استفاده برای سنگ‌های شکننده، معیار موهر-کولمب است. اما این معیار فقط تنش اصلی حداکثر (σ_1) و تنش اصلی حداقل (σ_3) را در نظر می‌گیرد و تاثیر تنش میانه (σ_2) بر مقاومت سنگ را در نظر نمی‌گیرد. باید در نظر داشت که معیار تسلیم موهر-کولمب بر اساس شواهد تجربی به دست آمده از آزمایش‌های سه محوره رایج ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) حاصل شده است. این در حالی است که استفاده از معیار موهر-کولمب در تسلیم سنگ تحت حالت تنش سه محوره حقیقی ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) می‌تواند خطاهایی را به همراه داشته باشد (Mogi, 2007). پارامترهای معیار موهر کولمب از طریق آزمایش‌های ساده و ارزان قابل محاسبه هستند اما به دلیل عدم کاربرد تنش متوسط در این معیار، وزن گل به درستی محاسبه نشده و اکثراً بیش از حد تعیین می‌شود (Ma *et al*, 2016; Lan *et al*, 2015). در اکثر معیارهای شکست، تنش میانه در نظر گرفته نمی‌شود (Pan & Hudson, 1988; Aubertin & Simon, 2000; Yu *et al.*, 2002). در عین حال، محققین مختلف اظهار داشته اند که به طور کلی میدان‌های نفتی، تحت شرایط تنش $polyaxial$ ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) قرار دارند. در این شرایط تنش اصلی میانه اثر منفی بر روی مقاومت سنگ دارد (Mogi, 1971; Reik & Zacas, 1978; Wawersik *et al.*, 1997; Tiwari & Rao, 2004; Haimson & Chang, 2005). بنابراین ضروری است، به منظور محاسبه وزن گل ایمن حفاری و بررسی پدیده Breakout، معیاری بکار برده

مشکلات مربوط به ناپایداری را کاهش داد. تعیین مناسب پنجره وزن گل ایمن^۱ به منظور کاهش ریسک هرزروی گل حفاری و نیز کاهش ریسک فوران چاه حائز اهمیت است و در نهایت باعث ایجاد یک حفاری ایمن و افزایش سرعت عملیات حفاری خواهد شد. مطالعات ژئومکانیکی نشان می‌دهد که با تعیین پنجره وزن گل ایمن، مشکلات پایداری چاه تا حد زیادی کنترل و رفع می‌شوند. برای چاه‌های نفت و گاز، تعیین وزن گل مناسب برای پایداری چاه، به منظور جلوگیری از نفوذ سیالات سازند به چاه و هرزروی گل به درون سازند ضروری است (Nmegbu & Ohazuruike, 2014). به منظور جلوگیری از وقوع هر گونه شکست و آسیب در دیواره چاه، فشار گل حفاری افزایش می‌یابد (Li *et al*, 2018). از طرف دیگر، با افزایش فشار گل، ممکن است در برخی از نقاط دیواره چاه، شکستگی کششی رخ دهد (Han *et al*, 2019; Li and Tang, 2016; Moraveji *et al*, 2017). مهندسان حفاری سعی می‌کنند که به منظور کاهش تمرکز تنش و جلوگیری از هرگونه شکست در سازند اطراف چاه، پنجره ایمن گل حفاری را طراحی کنند (Dijvejin *et al*, 2019; Al-Ajmi and Zimmerman, 2009; Nasiri *et al*, 2017; He *et al*, 2017). روشی که برای تعیین پنجره گل ایمن حفاری در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، استفاده از معیارهای شکست موهر - کولمب و موگی کولمب هستند. گل حفاری باید تمام معیارهایی که برای موفقیت عملیات حفاری لازم است را برآورد کند. در گذشته معادلات کرش به همراه معیار شکست موهر-کولمب برای محاسبه وزن گل ایمن حفاری استفاده شده است (Fjaer *et al*, 1992). از طرفی مطالعات میدانی برای پایداری مکانیکی چاه نشان داده است که معیارهای بر اساس تحلیل پلاستیک، برای سازندها سازگارتر و مناسب‌تر است (Fleming *et al*, 1990; Russell *et al*, 2003; Winterfeld *et al*, 2005). برخی محققین نیز پیشنهاد داده‌اند که برای تحلیل پایداری چاه، از تئوری‌های الاستوپلاستیک استفاده شود. همچنین نقش معیار شکست بر تعیین وزن گل ایمن توسط برخی محققین بررسی شده است (Fersheed *et al*, 2007; McLean & Addis, 1990; Collins, 2002; Simangunsong *et al*, 2006).

³ maximum principal stress

¹ Safe Mud Weight Window

² Intermediate principal stress

خواهد شد. صحت مدل تهیه شده اعتبارسنجی می‌شود و سپس پنجره ایمن وزن گل با استفاده از معیارهای شکست موهر-کولمب و موگی-کولمب جهت جلوگیری از ناپایداری چاه تعیین می‌شود. معیار شکست موگی - کولمب، در این تحقیق، با هدف دخالت دادن نقش تنش اصلی میانه در محاسبات و سنجش توانایی آن در تشخیص شکستگی‌های ایجاد شده در چاه در نظر گرفته شده است. در ادامه نتایج حاصل از کاربرد دو معیار جهت تعیین پنجره ایمن وزن گل و پیش‌بینی و تشخیص شکستگی‌های ایجاد شده در چاه مانند پدیده *Breakout*، با یکدیگر مقایسه می‌شوند و معیار مناسب‌تر برای طراحی چاه، انتخاب و معرفی می‌شود. در نهایت به منظور صحت‌سنجی مدل ژئومکانیکی و بررسی و تایید کارایی معیارهای تجربی بکار برده شده در تشخیص پدیده *Breakout*، مدل عددی مخزن مورد مطالعه، با استفاده از نرم‌افزار *ABAQUS* ساخته می‌شود.

کیلومتر است و یکی از بزرگترین میداین نفتی ایران می‌باشد (علیپور، رضا ۱۳۹۵). همانطور که در شکل ۱ مشخص است، میدان نفتی مارون در ۴۰ کیلومتری شرق اهواز قرار دارد و بین میداین اهواز، کوپال، آغاچاری، رامین، شادگان و میدان نفتی رامشیر واقع شده است (Alizadeh et al, 2012). سازندهای تشکیل‌دهندهی میدان مارون شامل سازند آغاچاری (۱۴۵ متر)، میشان (۲۴۸۰ متر)، گچساران (۲۷۶۰ متر) و آسماری (۳۵۰۶ متر) می‌باشند (محمدی بهبود، ۱۳۹۵). چاه شماره ۴۰۴، مورد مطالعه در این تحقیق، در سازند آسماری به مخزن برخورد کرده و داده‌های لاگ‌های چاه و اطلاعات عملیاتی در این عمق (۳۵۰۶ تا ۳۸۷۵ متری) در دسترس است. در این مقاله این بخش از چاه مورد نظر تحت بررسی و مطالعه قرار گرفته است. مشخصات چاه مورد مطالعه واقع در میدان مارون در جدول ۱ ارایه شده است.

جدول ۱: مشخصات چاه مورد مطالعه

شماره چاه	عمق (متر)	قطر (اینچ)	مترای چاه دربرگیرنده مخزن
۴۰۴	۳۸۷۵	۸٫۳۸	۳۸۷۵-۳۵۰۶

شود که تنش اصلی میانه را در نظر بگیرد. پدیده *Breakout* در طول فرآیند حفاری در صنعت معدن، نفت و یا حفاری تونل‌های دایره‌ای شکل اتفاق می‌افتد (Fowler and Weir, 2008). به طور کلی شکستگی‌های *dog-ear* رایج‌ترین نوع شکستگی در این پدیده است که در جهت تنش افقی حداقل رخ می‌دهد (Ask et al, 2015; Chang et al, 2010). بسیاری از محققان روش عددی را برای بررسی مکانیزم رفتاری سازند و تشکیل پدیده *Breakout* تحت شرایط مختلف تنش‌های برجا به کار برده‌اند (Lee et al, 2016; Duan and Kwok, 2016; Yousefian et al, 2018; Cheng et al, 2019; Yousefian et al, 2020).

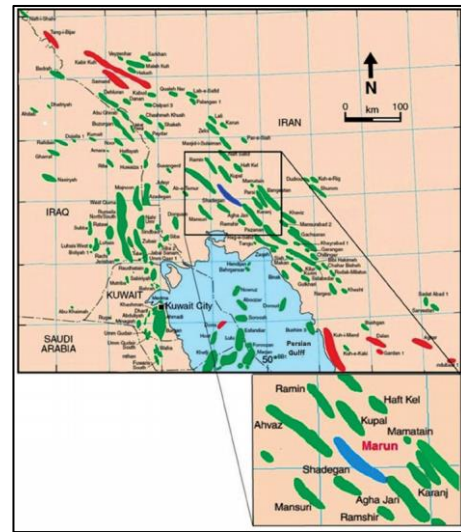
در این مقاله در ابتدا مدل ژئومکانیکی مناسب برای چاه مورد مطالعه واقع در میدان مارون در جنوب غرب ایران که در سازند آسماری حفر شده ساخته می‌شود. برای این منظور از لاگ‌های چاه‌پیمایی و صوتی و روابط تجربی مناسب استفاده قابل ذکر است که در این تحقیق برای صحت مدل ژئومکانیکی تک بعدی از مخزن مورد مطالعه، از روش‌های تجربی و عددی به صورت ترکیبی استفاده شده است. همچنین با توجه به اینکه در این مقاله، بر روی مسایل پیرامون یکی از چاه‌های میدان مارون، به عنوان یک چاه فعال و عملیاتی در داخل کشور، تمرکز شده است؛ نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند برای مهندسين طراح و بهره بردار چاه مذکور و حتی چاه‌های اطراف با شرایط مشابه، کاربردی و مفید واقع شود.

۲. معرفی مورد مطالعاتی

میدان مارون در سال ۱۹۶۳ کشف شد و بهره‌برداری از آن در سال ۱۹۶۶ آغاز گشت. این میدان از دو مخزن نفتی بنام‌های آسماری و بنگستان و یک مخزن گاز طبیعی بنام خامی تشکیل شده است. طول و عرض میدان به ترتیب ۷۰ و ۴ تا ۸

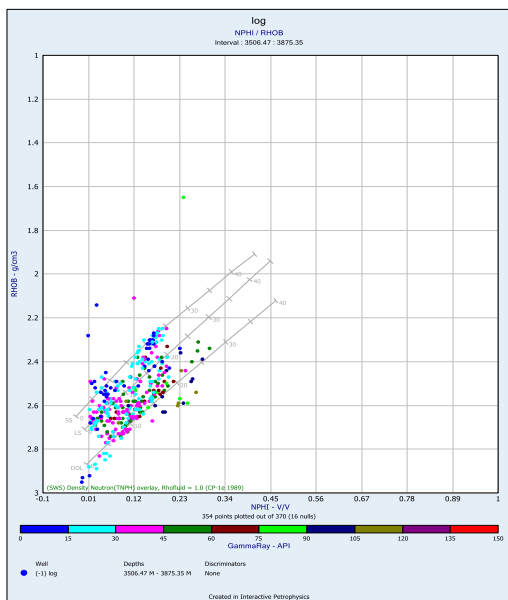
شکل‌های ۲، ۳ و ۴ ارایه شده است. نتایج حاصل از ترکیب لاگ‌ها نشان می‌دهد که لیتولوژی مخزن مورد مطالعه، عمدتاً شامل آهک و دولومیت است که دارای مقداری شیل و ماسه سنگ نیز می‌باشد. به عبارت دیگر سازند مخزن شامل آهک، دولومیت، شیل و آهک شیلی و مقدار ناچیز ماسه سنگ است. علاوه بر این، با استفاده از مقادیر PEF نیز می‌توان، لیتولوژی سنگ منطقه را تخمین زد (Miller, 1992; Pabakhsh et al., 2012). مقادیر PEF بر حسب عمق برای مورد مطالعاتی این تحقیق در شکل ۵ ارایه شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود مقدار PEF عمدتاً در محدوده ۲/۵ تا ۵ است، که بیانگر حضور آهک و دولومیت است. مقادیر ناچیزی وجود دارد که مقدار PEF آنها کمتر از ۲ است، که بیانگر حضور ماسه سنگ هستند. در برخی از اعماق چاه، مقدار PEF بیشتر از ۵ و کمتر از ۵/۵ هستند که بیانگر وجود انیدریت است.

همانطور که مشاهده می‌شود، در تشخیص لیتولوژی، همخوانی خوبی بین نتایج دو روش به کار برده شده وجود دارد.

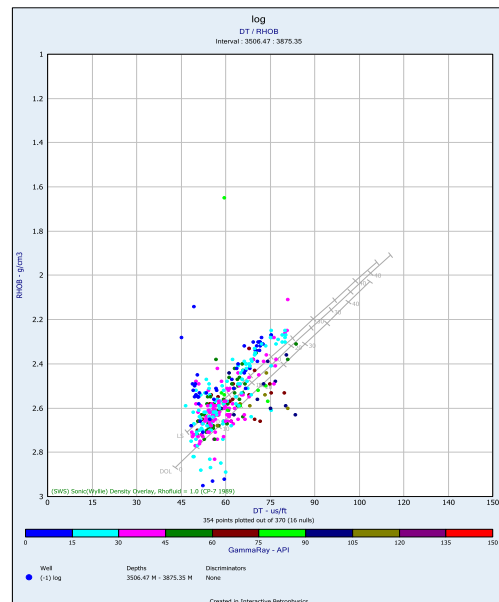


شکل ۱: محل میدان نفتی مارون در جنوب غرب ایران (Alizadeh et al, 2012)

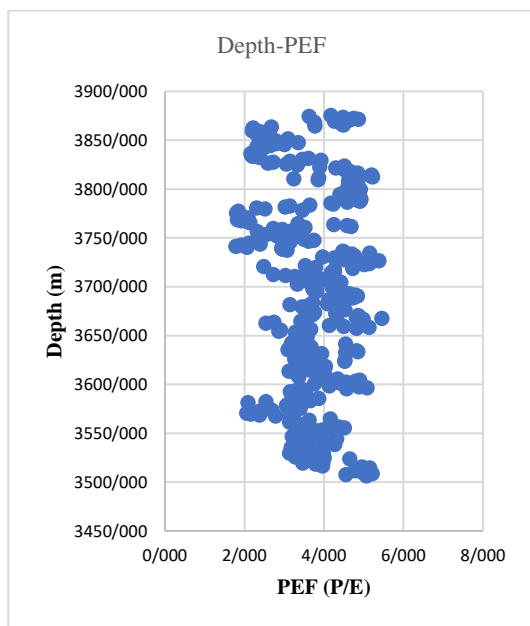
لیتولوژی سنگ مخزن را می‌توان با استفاده از رسم لاگ‌های چاه‌نگاری شامل صوتی، نوترون و چگالی و بررسی آنها روی کراس‌پلات‌های چگالی-صوتی، نوترون-چگالی و نوترون-صوتی تعیین کرد (رومیانی و همکاران، ۱۳۹۸). کراس‌پلات‌های لاگ‌های مذکور برای مخزن مورد مطالعه، به ترتیب در



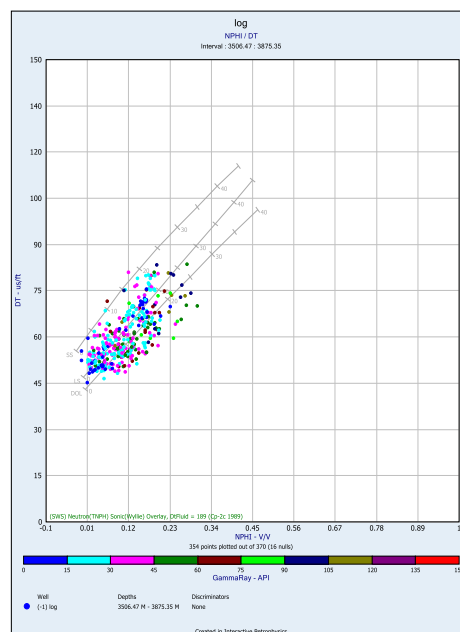
شکل ۲: کراس پلات لاگ‌های نوترون-چگالی



شکل ۳: کراس پلات لاگ‌های چگالی-صوتی



شکل ۵: مقادیر PEF نسبت به عمق مخزن



شکل ۴: کراس پلات لاگ‌های نوترون-صوتی

استفاده شده است. این روابط تجربی ارتباط میان پارامترهای ژئومکانیکی و داده‌های به‌دست‌آمده از لاگ‌های^۴ صوتی (DTC^۵ و DTS^۶)، چگالی (RHOB^۷)، تخلخل (NPHI^۸) و گاما (GR^۹) را برقرار می‌کنند. در خصوص چاه مورد مطالعه در این تحقیق، تغییرات انواع لاگ‌ها نسبت به عمق، در شکل ۶ نشان داده شده است.

۱.۳ تخمین پارامترهای الاستیک سازند

تخمین پارامترهای الاستیکی سنگ مخزن جهت مدل‌سازی شکستگی‌های مخزنی، بررسی پایداری و یکپارچگی چاه و کنترل تولید ماسه در چاه از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه پارامترهای الاستیک نظیر مدول یانگ، نسبت پواسن، مدول بالک و ضریب برشی با استفاده از مقادیر سرعت امواج برشی و فشاری حاصل از نگار صوتی برای یک چاه از میدان نفتی مارون در جنوب غرب ایران محاسبه می‌شود. روابط ۱ تا ۳ به ترتیب تخمین مدول یانگ دینامیکی، استاتیکی و ضریب پواسن را نشان می‌دهد. در این روابط، v_s و v_p به ترتیب سرعت موج برشی و سرعت موج فشاری و

۳. تهیه مدل ژئومکانیکی چاه مورد مطالعه

یکی از راه‌های موثر بر بهبود عملیات حفاری و کاهش خطر مشکلات ژئومکانیکی مرتبط، درک صحیح از رفتار ژئومکانیکی سازند است. روش‌های محاسبه خواص ژئومکانیکی سازند شامل انجام آزمایش‌های مکانیکی بر روی مغزه (Qiu et al., 2013) و یا تخمین خواص مکانیکی از لاگ‌های پتروفیزیکی است (Fjaer et al., 2008; Yasar & Erdogan, 2004). دقیق‌ترین روش برای اندازه‌گیری خواص ژئومکانیکی انجام آزمایش‌های مکانیک سنگی بر روی مغزه است (Andrews et al., 2007). اما متأسفانه این روش به علت محدودیت‌های آماده‌سازی مغزه، پرهزینه بودن آزمایش‌ها و تخریب مغزه پس از انجام آزمایش، قادر نیست که نمودار پیوسته‌ای از رفتار ژئومکانیکی ستون حفاری شده ارائه دهد. در مقابل لاگ‌های پتروفیزیکی به دلیل سهولت در برداشت، ارزان بودن و پیوستگی برداشت داده در طول چاه، در صنعت بالادستی نفت و گاز به صورت گسترده برای شناسایی ویژگی‌های لایه‌های زیرسطحی و تهیه مدل‌های ژئومکانیکی به کار برده می‌شود. در این مقاله، برای تهیه مدل ژئومکانیکی از روابط تجربی

⁷ density

⁸ Neutron porosity

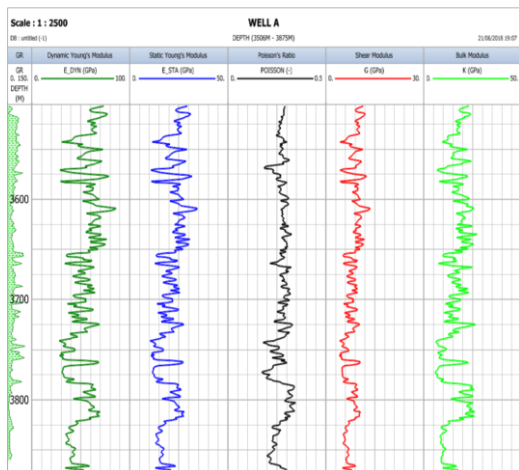
⁹ gamma ray

⁴ Logs

⁵ Compressional sonic travel time

⁶ Shear sonic travel time

متر از حفاری چاه مشخص شده است. سایر ستون‌ها به ترتیب شامل مدول الاستیسیته دینامیکی، مدول الاستیسیته استاتیکی، نسبت پواسون، مدول برشی، مدول حجمی است.



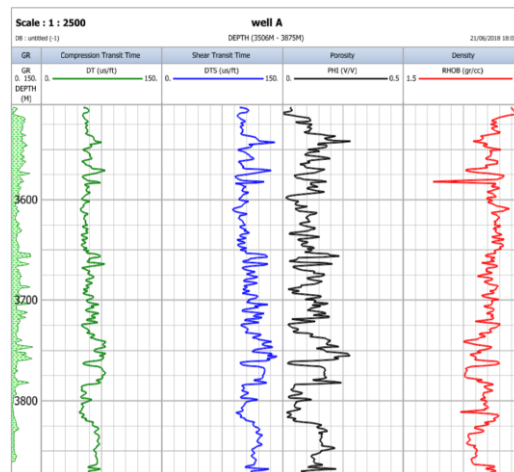
شکل ۷: مدل ژئومکانیکی تک بعدی نشان دهنده تغییرات پارامترهای الاستیک سازند نسبت به عمق

۲.۳ تخمین مقاومت سازند

تخمین UCS با استفاده از روابط تجربی متعدد از نگرهای صوتی، تخریل و مدول یانگ به دست می‌آید. روابط رایج برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) در سازندهای کربناته در جدول ۲ ارائه شده است. هر کدام از این روابط برای سنگ‌هایی مخصوص و در شرایط مشخص به دست آمده‌اند. در خصوص مورد مطالعاتی این تحقیق، با توجه به جنس سازند (کربناته) و وجود لایه‌های شیل در این مخزن، برای محاسبه مقاومت فشاری تک‌محوره، از رابطه (۷) که کارایی خوبی در سازندهای کربناته جنوب غرب ایران دارد (Afsari et al, 2009)، استفاده می‌شود.

مقاومت کششی بر اساس تحقیقات انجام‌شده، ۰/۰۸ تا ۰/۱ مقاومت فشاری تک‌محوره است (Miltzer, 1973; Akbar et al, 2005; Holland et al, 2010; Fernandez-Ibanez et al, 2010; Archer and Rasouli, 2012; Qiu et al 2013). بر این اساس و همچنین مطابق با گزارش‌های موجود از چاه شماره ۴۰۴ میدان مارون، در این تحقیق، مقاومت کششی برابر ۰,۰۸ مقاومت فشاری تک‌محوره لحاظ شده است.

ρ نیز چگالی بالک است. با توجه به عمومیت استفاده (در ایران) از رابطه ۲ (Afsari et al, 2009) برای تبدیل مدول یانگ دینامیکی به استاتیکی در مخازن کربناته دارای ورقه-های شیلی نازک، در این تحقیق از این رابطه استفاده می‌شود.



شکل ۶: تغییرات لاگ‌های پتروفیزیکی نسبت به عمق مخزن در چاه شماره ۴۰۴ میدان مارون

$$E_{dyn} = \frac{\rho v_s^2 (3v_p^2 - 4v_s^2)}{(v_p^2 - v_s^2)} \quad (1)$$

$$E_{sta} = 0.414E_{dyn} - 1.0593 \quad (2)$$

$$v_{dyn} = v_{sta} = \frac{(v_p^2 - 2v_s^2)}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad (3)$$

با مشخص شدن پارامترهای مدول یانگ و ضریب پواسون، سایر پارامترهای الاستیک مانند مدول برشی (G) و مدول حجمی (بالک) (K) از طریق روابط (۴) و (۵) به سادگی به دست می‌آیند (Archer and Rasouli, 2012; Fjaer et al, 2008).

$$G = \frac{E_{sta}}{2(1 + \nu_{sta})} \quad (4)$$

$$K = \frac{E_{sta}}{3(1 - 2\nu_{sta})} \quad (5)$$

بر اساس روابط تجربی ذکر شده و با استفاده از نرم‌افزار پتروفیزیکی مخزن، مدل ژئومکانیکی تک بعدی پارامترهای الاستیک نسبت به عمق، تهیه و در شکل ۷ نشان داده شده است. در اولین ستون در سمت چپ، نگار اشعه گاما به همراه

۳,۳ تخمین پارامترهای پلاستیک سازند

چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ با پارامترهای فیزیکی سنگ ارتباط دارند. روابط تجربی محدودی در راستای تخمین این پارامتر از نگارهای پتروفیزیکی ارائه شده است (Khaksar et al, 2009; Archer and Rasouli, 2012).

با توجه به تخلخل و حجم شیل، رابطه (۹) برای تخمین زاویه اصطکاک داخلی و رابطه (۱۰) برای تخمین چسبندگی سنگ ارائه شده است (Gholami et al, 2014; Plumb, 1994; Jaeger et al, 2009).

جدول ۲: روابط ارائه شده برای محاسبه UCS در سازندهای کربناته

شماره رابطه	رابطه	حوزه کاربرد	مرجع
۶	$UCS = \left(\frac{7682}{\Delta t_c}\right)^{1.82} / 145$	سنگهای کربناته	Militzer and Stoll, 1973
۷	$UCS = 2.28 + 4.1089E_{sta}$	سنگهای کربناته دارای ورقه‌های شیلی	Afsari et al, 2009
۸	$UCS = 13.8E_{dyn}^{0.51}$	سنگ آهک ($10 < UCS < 300$)	Zoback, 2010

$$\varphi = 26.5 - 37.4(1 - NPHI - V_{shale}) + 62.1(1 - NPHI - V_{shale})^2 \quad (9)$$

می‌آید. در این رابطه ρ چگالی و g شتاب گرانش و Z ارتفاع است. طبق این رابطه تنش قائم به شدت به چگالی سنگ وابسته است و با آن رابطه مستقیم دارد. برای محاسبه این پارامتر به لاگ چگالی سنگ نیاز است (Zang and Stephansson, 2009).

$$\sigma_v = \int_0^z \rho(z) g dz \quad (13)$$

به طور معمول لاگ چگالی در داخل مخزن رانده می‌شود و از سطح زمین تا مخزن داده‌ای برداشت نمی‌شود. از این رو باید مقادیر چگالی سنگ از سطح زمین تا مخزن تخمین زده شود. برای این منظور بهتر است از تخمین نمایی استفاده شود (Archer & Rasouli 2012). بنابراین در چاه مورد مطالعه در این تحقیق، به منظور تخمین چگالی سنگ در حفاصل سطح زمین و مخزن، از برازش تابع نمایی بر داده‌های موجود چگالی در ضخامت مخزن و داده‌های چگالی در سطح زمین استفاده شده است. نمودار حاصل شده در شکل ۸ نمایش داده شده است. در این نمودار چگالی در سطح زمین برابر با چگالی متوسط خاک منطقه، ۱/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شده است. نکته دیگری که در این شکل شایان توجه است، در عمق‌هایی

$$C = \frac{UCS}{2 \tan \theta} \quad (10)$$

در این روابط، φ زاویه اصطکاک، C چسبندگی، $NPHI$ تخلخل نوترون، UCS مقاومت فشاری تک محوره و V_{shale} حجم شیل است. حجم شیل و زاویه θ طبق روابط (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌شوند (Asquith et al, 2004; Jaeger et al, 2009).

$$V_{shale} = \frac{Gr - Gr_{min}}{Gr_{max} - Gr_{min}} \quad (11)$$

$$\theta = 45 + \frac{\varphi}{2} \quad (12)$$

در این روابط Gr نگار گاما گرفته شده از چاه مورد نظر و Gr_{min} و Gr_{max} به ترتیب قرائت لاگ پرتو گاما در ناحیه بدون شیل و شیل دار هستند.

۴,۳ تخمین تنش قائم

تنش‌های برجا شامل تنش قائم (σ_v)، تنش افقی حداقل (σ_H) و تنش افقی حداکثر (σ_H) هستند. معمولاً دو نوع شکست در دیواره چاه اتفاق می‌افتد که برای مدل‌سازی آن، تعیین مقدار و جهت تنش‌های برجا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تنش قائم با استفاده از چگالی سازند، مطابق رابطه (۱۳) به دست

زد (Zhang, 2010).

$$P_2 = P_1 + \rho g (z_2 - z_1) \quad (15)$$

۶.۳ تخمین مقدار تنش‌های افقی

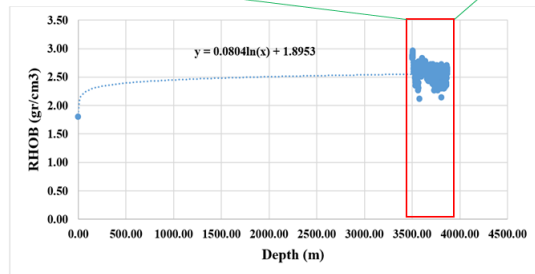
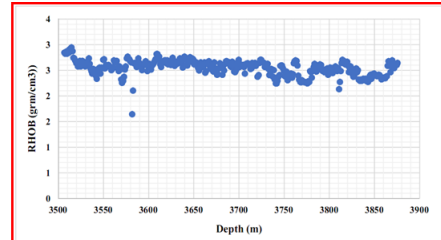
در میادین نفتی، محاسبه تنش‌های افقی، به خصوص تنش افقی حداقل از اهمیت خاصی برخوردار است. روابط مختلفی توسط متخصصین چاه‌نگاری و حفاری در نواحی مختلف دنیا برای تعیین تنش‌های افقی ارائه شده است (Haimson and Cornet 2003; Zoback et al, 2003). در بیشتر روابط ارائه شده توسط این محققین، تنش‌های افقی براساس مدول‌های الاستیک سنگ که برگرفته از لاگ‌های چاه‌نگاری است، محاسبه می‌گردند. یکی از روابط بسیار رایج و پرکاربرد برای محاسبه مقادیر تنش‌های افقی، روابط پوروالاستیک (روابط ۱۶ و ۱۷) است. در این رابطه از فشار روباره (σ_v)، فشار منفذی (P_p)، نسبت پواسون (ν)، ضریب بایوت (α) و کرنش‌های تکتونیکی (e_x و e_y) استفاده می‌شود (Zoback, 2010).

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E}{1-\nu^2} (e_x + \nu e_y) \quad (16)$$

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E}{1-\nu^2} (e_y + \nu e_x) \quad (17)$$

مقدار دقیق ضریب بایوت باید از طریق آزمون‌های آزمایشگاهی تعیین شود. انجام این آزمایش مستلزم دسترسی به تجهیزاتی با تکنولوژی بالا است که توانایی کنترل فشار وارد بر نمونه در سه راستا و اندازه‌گیری جابجایی‌های حاصله با دقت بالا را داشته باشد. مقدار این ضریب از صفر (برای سنگ‌های سخت با تخلخل صفر) تا یک (برای سنگ‌های متخلخل در حوضه‌های رسوبی کم عمق) تغییر می‌کند. در مطالعات ژئومکانیکی مخازن نفت و گاز به دلیل سخت بودن اجرای آزمون‌ها، از انجام آنها صرف نظر می‌شود و با توجه به متخلخل بودن سنگ‌های تشکیل دهنده مخزن، این نسبت معمولاً برابر با یک در نظر گرفته می‌شود. مقدار یک برای ضریب بایوت بدین معنی است که تنش موثر در بالاترین حد خود در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب، نتایج حاصل از تحلیل پایداری-های بعدی، محافظه‌کارانه‌تر خواهد بود. لذا در این تحقیق، مقدار یک برای ضریب بایوت در نظر گرفته شده است. با استفاده از روابط (۱۸) و (۱۹) مولفه‌های کرنش‌های تکتونیکی مشخص می‌شود (Najib et al, 2017; Kidambi and

از چاه در داخل مخزن، چگالی بالک کاهش یافته و با توجه به اینکه جنس سازند مخزن آهکی (عمدتاً دولومیت) است، می‌توان گفت که در این نقاط، تخلخل افزایش یافته و در نتیجه فشار منفذی نیز بیشتر شده است.



شکل ۸: تخمین چگالی سازند از سطح زمین تا مخزن

با توجه به رابطه به‌دست‌آمده از تخمین چگالی در شکل ۸ و رابطه (۱۳)، ابتدا مقدار تنش قائم در اولین نقطه مخزن به دست می‌آید. پس از آن تنش در هر نقطه مخزن که نگار چگالی در آن موجود است، طبق رابطه (۱۴) محاسبه شده و با نقطه قبلی خود جمع می‌شود (Zoback, 2010).

$$\sigma_{V(n)} = \rho_n g (Z_n - Z_{n-1}) + \sigma_{V(n-1)} \quad (14)$$

۵.۳ تخمین فشار منفذی

فشار منفذی یک پارامتر کلیدی جهت محدود کردن تنش‌های برجا در تحلیل عددی پایداری چاه است. گرادیان افزایش فشار منفذی در سازند حاوی گاز برابر $0.08 \frac{psi}{ft}$ ، در سازند حاوی نفت برابر $0.32 \frac{psi}{ft}$ و در سازند حاوی آب $0.45 \frac{psi}{ft}$ در نظر گرفته شده است. طبق اطلاعات زمین‌شناسی، سازند آسماری در زیر سازند پر فشار گچساران واقع شده است که فشار منفذی این سازند نسبت به گچساران کاهش پیدا کرده است. فشار منفذی مینا در عمق ۳۳۵۰ از سطح دریا ۴۱۵۰ پوند بر اینچ مربع اندازه‌گیری شده است. با داشتن فشار مینا، می‌توان تغییرات فشار منفذی مخزن را با استفاده از رابطه ۱۵ تخمین

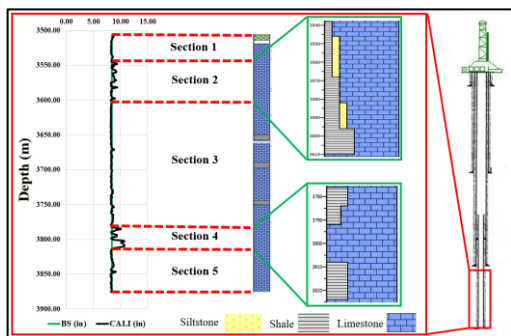
(Kumar, 2016).

دلیل بیشتر بودن شیل نسبت به آهک، این لایه‌ها شیل آهکی نام گرفته‌اند. در این تحقیق، مقاطع ۲ و ۴، به عنوان مقاطع بحرانی برای چاه مورد مطالعه در نظر گرفته شده است.

$$e_x = \frac{\sigma_v * \nu}{E} \left(\frac{1}{1-\nu} - 1 \right) \quad (18)$$

$$e_y = \frac{\sigma_v * \nu}{E} \left(1 - \frac{\nu^2}{1-\nu} \right) \quad (19)$$

در شکل ۹، مدل ژئومکانیکی تک بعدی چاه مورد مطالعه، که بر اساس روابط تجربی مذکور به دست آمده است، نشان داده شده است. بر اساس این مدل، پارامترهای مقاومتی، پلاستیک، فشار منفذی و تنش‌های برجا نسبت به عمق تخمین زده شده اند. فشار منفذی به صورت خطی با افزایش عمق، افزایش می‌یابد. در ستون مربوط به وضعیت تنش‌ها، شرایط تنش در اکثر اعماق مخزن به صورت گسل نرمال بوده ($\sigma_H < \sigma_h < \sigma_v$) و در برخی مناطق به گسل امتداد لغز ($\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$) تغییر می‌یابد. این شرایط تقریباً با شرایط واقعی تنش در منطقه مشابهت دارد.

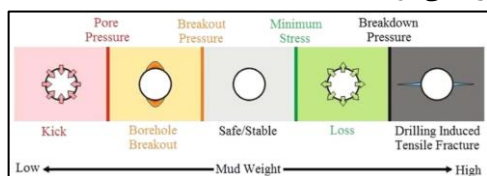


شکل ۱۰: پروفیل چاه مورد مطالعه، سنگ شناسی مخزن و نمودار کالیپر نسبت به عمق

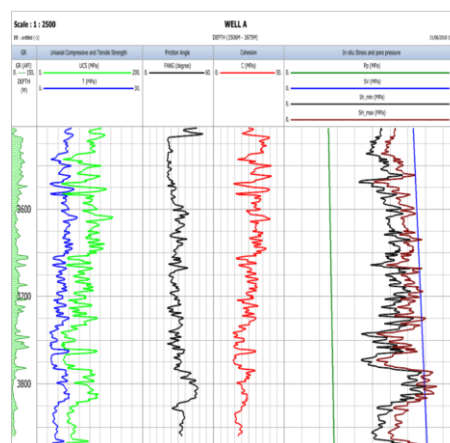
همانطور که مشاهده می‌شود، مدل‌های ژئومکانیکی ساخته شده (شکل‌های ۷ و ۹) همخوانی خوبی را با نمودار کالیپر و اتفاقات حفاری گزارش شده دارد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روابط به کار برده شده برای تخمین پارامترهای مکانیکی و تنش‌های برجا مناسب هستند و در نهایت اینکه مدل‌های ژئومکانیکی، مدل‌هایی معتبر هستند.

۵. معیار شکست جهت بررسی پایداری چاه

نقش معیار شکست، برقراری رابطه بین مقادیر تنش‌های القایی و مقاومت سنگ در دیواره چاه است، تا در نهایت انواع شکستگی‌های رخ داده در چاه را بتواند پیش بینی نماید (Najibi et al, 2017). انواع حالت‌های شکستگی‌های چاه و نقش وزن گل در پایداری آن به طور شماتیک در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. برای تشخیص شکستگی‌های داخل چاه، ابتدا لاگ قطرسنجی چاه رسم می‌شود و سپس در صورت وجود لاگ‌های تصویری، محل شکستگی‌های برشی و کششی روی دیواره چاه مشخص شده و روی لاگ قطرسنجی علامت‌گذاری می‌شوند.



شکل ۱۱: طرح شماتیکی از نقش وزن گل در پایداری و انواع حالت‌های ناپایداری چاه (Najibi et al, 2017)



شکل ۹: مدل ژئومکانیکی تک بعدی نشان دهنده تغییرات پارامترهای مقاومتی، پلاستیک، فشار منفذی و تنش‌های برجا نسبت به عمق

۴. اعتبارسنجی مدل ژئومکانیکی

همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، مطابق نمودار کالیپر و قطر سرتمه حفاری، می‌توان عمق مخزن را به ۵ مقطع تفکیک کرد. در مقطع‌های (۲ و ۴)، طبق اطلاعات مربوط به کالیپر، افزایش قطر اتفاق افتاده است و طبق گزارش حفاری در این مقاطع، سنگ شناسی از نوع آهک شیلی است. در مقطع‌های (۱، ۳ و ۵)، تغییر قطر چاه ناچیز است. در مقطع ۳ در سه عمق مختلف وجود لایه شیل مشاهده می‌شود که به

۱.۵ معیار شکست موهر-کولمب

تعریف می‌شود. در این رابطه φ زاویه اصطکاک داخلی سنگ است.

$$q = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (21)$$

در جدول ۳، نحوه محاسبه فشار بهینه گل (فشار پایین) وابسته به پدیده *Breakout* (P_{WB}) برای انواع حالت‌های تنش‌های اصلی، طبق معیار شکست موهر - کولمب ارائه شده است (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006).

یکی از ساده‌ترین معیارهای شکست و در عین حال موثر، برای تخمین مقاومت برشی سازند، معیار موهر-کولمب است. طبق این معیار، پارامترهایی مانند تنش قائم، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در مقاومت برشی سازند موثر هستند. معیار موهر-کولمب برای شکست چاه مطابق رابطه (۲۰) تعریف می‌شود (Jaeger et al, 2009).

$$\sigma_1 - P_p = UCS + q(\sigma_3 - P_p) \quad (20)$$

در اینجا، P_p فشار منفذی است و q به صورت رابطه (۲۱)

جدول ۳: فشار بهینه گل با استفاده از معیار موهر - کولمب (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006)

حالت تنش‌های اصلی ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$)	فشار بهینه گل وابسته به شکست <i>Breakout</i>	حالت
$\sigma_r = P_w$ $\sigma_\theta = A - P_w$ $\sigma_z = B$	$P_{WB1} = \frac{B - UCS}{q}$	۱ ($\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$)
$A = 3\sigma_H - \sigma_h$ $B = \sigma_v + 2\nu(\sigma_H - \sigma_h)$	$P_{WB2} = \frac{A - UCS}{1+q}$	۲ ($\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$)
	$P_{WB2} = A - UCS - qB$	۳ ($\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$)

می‌دهد.

در این جدول P_{wb} فشار پایین گل، $A, B, K, G, H, \hat{a}, \hat{b}$ ثابت‌های معادله، σ_H تنش افقی حداکثر، σ_h تنش افقی حداقل، ν ضریب پواسون، σ_v تنش قائم است (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006).

۶. تحلیل پایداری چاه مورد مطالعه

در این بخش به منظور بررسی ناپایداری چاه و پیش‌بینی شکست در طول حفاری، دو معیار شکست موهر-کولمب و موگی-کولمب به کار برده شده است. نتایج تحلیل پایداری در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این شکل رنگ زرد بیانگر ایجاد شکستگی‌های کششی، محدوده سبز رنگ، از دست رفتن گل حفاری، رنگ قرمز پدیده *Breckout* و در نهایت رنگ سفید پنجره ایمن گل حفاری را نشان می‌دهد. نتایج تحلیل پایداری حاصل از هر دو معیار، با نمودار کالیپر، همخوانی مناسبی دارد.

در این جدول σ_r تنش شعاعی، σ_θ تنش مماسی، σ_z تنش محوری، P_w فشار گل، σ_H تنش افقی حداکثر، σ_h تنش افقی حداقل، ν ضریب پواسون، σ_v تنش قائم و UCS مقاومت فشاری تک محوره است (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006).

۲.۵ معیار شکست موگی - کولمب

از طرف دیگر، معیارهای شکست سه بعدی سنگ به منظور در نظر گرفتن تاثیر تنش میانه بر مقاومت سنگ توسعه داده شده‌اند. این معیارها برای بررسی پایداری چاه نتایج قابل قبول تری نسبت به معیارهای دو بعدی دارند. معیار شکست موگی - کولمب به دلیل در نظر گرفتن تنش اصلی متوسط، مقادیر فشار گل بیشتری را برای پایداری چاه پیشنهاد می‌کند (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006). جدول ۴، فشار بهینه گل حفاری وابسته به معیار موگی-کولمب را نشان

جدول ۴: فشار پایین گل با استفاده از معیار موگی - کولمب (Ajmi and Zimmerman, 2006)

فشار بهینه گل وابسته به شکست <i>Breakout</i>	حالت تنش‌های اصلی ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$)	حالت
$P_{WB1} = \frac{1}{6-2b'^2} \left[(3A + 2b'K) - \sqrt{H + 12(K^2 + b'AK)} \right]$	($\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$)	۱
$P_{WB2} = \frac{1}{2}A - \frac{1}{6} \sqrt{12[a'+b'(A-2P_p)]^2 - 3(A-2B)^2}$	($\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$)	۲
$P_{WB1} = \frac{1}{6-2b'^2} \left[(3A - 2b'G) - \sqrt{H + 12(G^2 - b'AG)} \right]$	($\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$)	۳

$$H = A^2(4b'^2 - 3) + (B^2 - AB)(4b'^2 - 12)$$

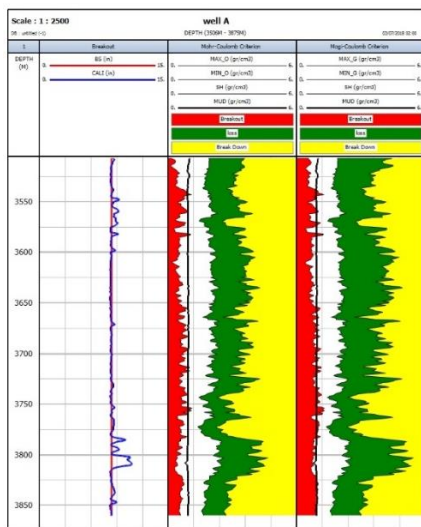
$$G = K + b'A$$

$$a' = 2C \cos \varphi$$

$$K = a' + b'(B - 2p_p)$$

$$A = 3\sigma_H - \sigma_h$$

$$B = \sigma_v + 2\nu(\sigma_H - \sigma_h)$$

$$b' = \sin \varphi$$


شکل ۱۲: تعیین پنجره ایمن وزن گل حفاری طبق دو معیار شکست در چاه مورد مطالعه

در عمق ۳۵۴۰ تا ۳۵۸۰ طبق معیارهای شکست موهر - کولمب و موگی - کولمب، همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، فشار حداقل گل حفاری بیشتر از فشار گل شده که باعث ایجاد شکست برشی عریض و یا پدیده (*Breakout*)

طبق گزارش حفاری و شکل ۱۰، در عمق ۳۷۸۰ تا ۳۸۲۵، آهک شیلی وجود دارد. همچنین در این عمق افت فشار گل نیز رخ داده است. بنابراین احتمال وجود شکستگی در این ناحیه و در پی آن هرزروی گل وجود دارد. هرزروی گل می‌تواند سبب انتقال ذرات ریز گل به درون منافذ سازند و کاهش نفوذپذیری ناحیه‌ای اطراف چاه شود. افت فشار تا جایی که فضای خالی شکستگی پر شود، ادامه یافته و دوباره به حالت اولیه بر می‌گردد. پس از نفوذ گل درون شکستگی و در صورت نرم بودن لایه مورد نظر، احتمال پدیده انحلال و شسته‌شدن سازند بالا بوده که در پی آن افزایش قطر اتفاقی افتاده است. همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، معیار موگی - کولمب نسبت به معیار موهر - کولمب، پدیده هرزروی گل را با دقت بیشتری نشان می‌دهد. بنابراین برای محاسبه فشار بهینه گل حفاری مناسب‌تر است. نتایج مشابهی توسط برخی محققان از جمله (Mirzaghobanali and Afshar, 2011)، (Gholami et al., 2014) و (Success, 2019) بدست آمده است که حاکی از سازگاری نتایج بدست آمده در این تحقیق نسبت به تحقیقات گذشته است.

ژئومکانیکی سازند بر پنجره گل بررسی شده است (علیرضا نجفی پور و کاوه آهنگری، ۱۳۹۶).

مطالب ارائه شده در مورد پنجره ایمن وزن گل حفاری، نمودار کالیبر و همچنین گزارشات فنی موجود، نشان دهنده تشکیل پدیده *Breakout* در بازه عمقی ۳۵۴۵ تا ۳۵۵۰ است. در این مقاله، برای پیش‌بینی این پدیده و بررسی توانایی معیارهای شکست در تشخیص پدیده *Breakout* و صحت‌سنجی مدل-های ژئومکانیکی تهیه شده، علاوه بر مدل‌های تجربی، مدل-سازی عددی نیز توسعه داده شده است. مدل‌سازی چاه مورد مطالعه در این تحقیق، به صورت سه‌بعدی و با استفاده از شیوه‌المان محیط پیوسته انجام شده است. این نوع از المان‌ها به عنوان المان استاندارد حجمی در نرم‌افزار *ABAQUS* به شمار می‌روند. المان استفاده شده برای این تحقیق دارای تابع شکلی از نوع خطی است. در اکثر نواحی مدل، از المان‌های هشت گوشه و مکعبی (*C3D8RP*) استفاده شده ولی در مرکز مدل (نزدیکی دیواره چاه)، به منظور مدل‌سازی دقیق‌تر، از نوع شش گوشه یا منشوری (*C3D6RP*) المان‌ها نیز استفاده شده است.

ابعاد هندسه مدل در راستای x و y و z به ترتیب برابر با ۲، ۲ و ۵ متر است. شرایط تکیه‌گاهی در این مدل به گونه‌ای است که با گرفتن فاصله کافی از دیواره چاه (حدود ۱۰ برابر شعاع)، مرزهای خارجی در مقابل تغییر مکان عمود بر همان صفحه مقید می‌شوند. رفتار سنگ‌های دربرگیرنده چاه را می‌توان با معیار شکست موهر کولمب و مدل رفتاری پوروالاستیک بیان کرد. این مدل‌ها ارتباط بین اجزاء تنش و کرنش را در هر نقطه خاص از جسم نشان می‌دهند. مشخصات سازند دربرگیرنده چاه مورد مطالعه در جدول ۵ ارایه شده است.

می‌شود که در نتیجه‌ی آن قطر چاه افزایش یافته است. در اینجا نیز، همانطور که مشاهده می‌شود در این حالت معیار موگی - کولمب این پدیده را با وضوح بیشتری نشان می‌دهد.

۷. مدل‌سازی عددی برای پیش‌بینی و

صحت‌سنجی پدیده *Breakout*

مطالعه نحوه توزیع کرنش‌های پلاستیک اطراف چاه با استفاده از شبیه‌سازی عددی برای تشخیص پدیده *Breakout* قبل از حفاری، باعث افزایش دانش مهندس‌های اجرا، نسبت به مراحل حفاری می‌شود. برخی از مهمترین مطالعاتی که در سال‌های اخیر در خصوص تحلیل پایداری دیواره چاه و تعیین پنجره گل حفاری انجام شده، در ادامه اشاره شده است. در سال ۱۳۹۷، تحلیل پایداری دیواره چاه نفت در حفاری فروتعدالی به وسیله نرم‌افزار *ABAQUS* بررسی شده است. در این مطالعه، با افزایش و کاهش فشار گل اعمالی به دیواره چاه، فشار حد پایداری محاسبه شده و نشان داده شده که کمتر از این فشار، دیواره چاه وارد ناحیه پلاستیک می‌شود (محمد دانیالی و آرش ابراهیم آبادی، ۱۳۹۷). در تحقیق دیگری، تحلیل پایداری چاه با استفاده از گل حفاری و نرم‌افزار *ABAQUS* ارائه شد. نتایج این تحقیق نشان داده است که چاه قائم و چاه‌های افقی در راستاهای مختلف را می‌توان با فشار گل معادل فشار منفذی در شرایط فراتعدالی حفاری کرد (مهدی پیرحیاتی و افشین شهم، ۱۳۹۸). همچنین در سال ۱۳۹۶، تعیین پنجره گل مناسب و آنالیز حساسیت پایداری دیواره چاه افقی با استفاده از مدل‌سازی عددی در یکی از میادین نفتی جنوب غرب ارائه شده است. در این تحقیق علاوه بر تعیین پنجره ایمن گل حفاری به روش عددی، تاثیر تنش-های برجا، امتداد و جهت حفر چاه و برخی از خواص

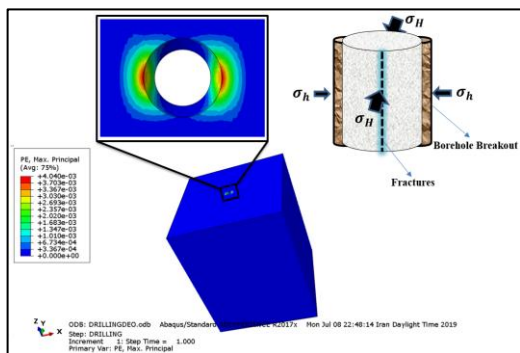
جدول ۵: مشخصات سازند دربرگیرنده چاه شماره ۴۰۴ میدان مارون در عمق ۳۵۴۵ تا ۳۵۵۰

Variable	E_{sta}	ν_{sta}	C	φ	σ_V	σ_h	σ_H	UCS	σ_t	P_p	ρ
Unit	GPa	-	MPa	degree	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	Kg/m ³
Value	22.59	0.28	31.92	22.35	88.76	70.23	79.98	95.09	7.61	30.57	2550

جهت تنش قائم فرض می‌شود. جهت تبدیل مدل به اجزای کوچکتر از المان‌های چهاروجهی استفاده شده است. برای افزایش دقت، با نزدیک شدن به سمت دیواره چاه، المان‌ها

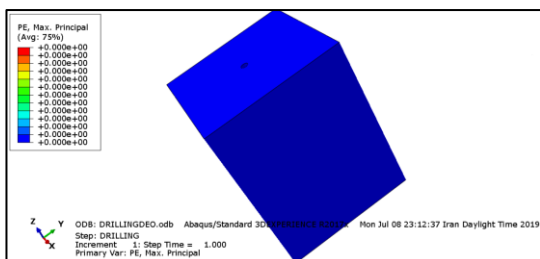
قطر چاه در مدل‌سازی ۸،۳۸ اینچ است. مطابق شکل ۱۳ جهت محور x به عنوان جهت تنش افقی حداقل، جهت محور y به عنوان جهت تنش افقی حداکثر و جهت محور z به عنوان

فشار سیال وارده برای پایداری چاه کافی نبوده و در پی آن چاه دچار ناپایداری می‌شود. در این فشار دیواره چاه در راستای تنش افقی حداقل (x) وارد ناحیه پلاستیک شده و این نشان‌دهنده پدیده *Breakout* و ریزش دیواره چاه است.



شکل ۱۵: ایجاد پدیده Breakout بعد از حفاری چاه در مدل سازی عددی

فشار سیال بعد از حفاری به صورت متناوب، در هر مرحله ۱۰ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. در عمق مورد بررسی طبق گزارش‌های فنی از چاه مورد مطالعه، فشار سیال حفاری برابر با ۳۱،۷۹ مگاپاسکال است. همانطور که در شکل ۱۶ نشان‌دهنده شده است، ناحیه پلاستیک‌شدگی (کرنش‌های پلاستیک) در فشار مذکور برابر صفر است.

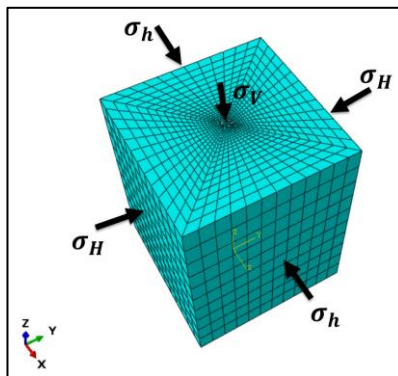


شکل ۱۶: کرنش پلاستیک در چاه با افزایش فشار سیال حفاری

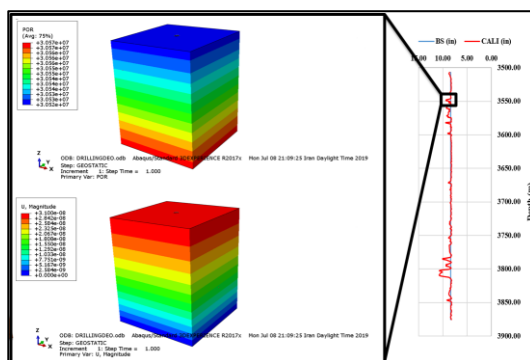
۸. نتیجه‌گیری

در این مقاله مدل ژئومکانیکی تک بعدی برای تخمین پارامترهای مکانیکی سازند و شرایط تنش برجا براساس روابط تجربی و لاگ‌های موجود در یکی از چاه‌های نفت میدان مارون در جنوب غرب ایران ساخته شد. با توجه به اینکه مدل ساخته شده بیشترین همخوانی را با نمودار کالیپر و اتفاقات حفاری گزارش شده دارد، نتیجه گرفته شد که روابط به کار

کوچکتر و منظم‌تر می‌شوند. تخلخل و نسبت پوکی مخزن مورد مطالعه به ترتیب ۱۵/۳۹ درصد و ۰/۱۸۲ هستند. فشار منفذی در مرحله ابتدایی مدل‌سازی به صورت هیدرواستاتیک در نظر گرفته شده و به مدل اعمال می‌شود. تغییرات کنتور فشار منفذی به دلیل اعمال شتاب گرانش به مدل، در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود. برای اطمینان حاصل کردن از اینکه این مرحله به تعادل رسیده است، باید جابجایی‌های ناچیزی در مدل اتفاق بیافتد. لذا در شکل ۱۴، جابجایی کلی (ترکیب جابجایی در جهت‌های x ، y و z) در مدل نیز نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، جابجایی‌های اندکی در حدود صفر در مدل ایجاد شده است که نشان می‌دهد مرحله اول مدل‌سازی، به درستی انجام شده و مدل برای مرحله حفاری آماده شده است.



شکل ۱۳: نحوه مش‌بندی و جهت تنش‌های برجا



شکل ۱۴: کنتور جابجایی کلی و فشار منفذی در مرحله تعادل اولیه با توجه به عمق مدل‌سازی شده

مقدار فشار گل وارد بر دیواره و در زمان حفر چاه، مقداری کم و برابر با یک مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. همانطور که نتیجه مدل‌سازی عددی در شکل ۱۵ نشان داده شده است،

شده از دقت کافی برای پیش بینی ناپایداری های چاه برخوردار بوده اند. البته لازم به ذکر است که این پدیده مطابق مدل ژئومکانیکی و معیارهای شکست در اعماق دیگر نیز تشکیل شده است. مقاله ارائه شده ابزاری مناسب برای پیش بینی خطرات حفاری و ریزش چاه است. ساخت مدل ژئومکانیکی تک بعدی مخزن با استفاده از لاگ های پتروفیزیکی، تعیین پنجره ایمن گل حفاری با استفاده از معیارهای شکست موگی کولمب و موهر کولمب، استفاده از روش های تجربی و عددی به صورت ترکیبی برای شبیه سازی سه بعدی تشخیص پدیده *Breakout* و اعتبارسنجی آن از موارد تمایز این مقاله نسبت به تحقیقات گذشته است. علاوه بر همه اینها، با توجه به اینکه در این مقاله، بر روی مسایل پیرامون یکی از چاه های میدان مارون، به عنوان یک چاه فعال و عملیاتی در داخل کشور، تمرکز شده است؛ نتایج حاصل از این تحقیق می تواند برای مهندسين طراح و بهره بردار چاه مذکور و حتی چاه های اطراف با شرایط مشابه، کاربردی و مفید واقع شود.

برده شده برای تخمین پارامترهای مکانیکی و تنش های برجا قابل قبول هستند. با مشخص شدن میزان تغییرات پارامترهای الاستیک و مقاومتی سنگ، نتایج مدل ژئومکانیکی نشان می دهد که شرایط تنش در چاه همچنان که در گزارش های فنی نیز تأکید شده است، تقریباً به صورت گسل نرمال است. کاربرد دو معیار شکست موهر کولمب و موگی کولمب برای بررسی ناپایداری چاه و پیش بینی شکست در طول حفاری، باهم مقایسه شدند. در معیار موگی کولمب با توجه به در نظر گرفتن تنش میانه و نزدیک تر بودن به شرایط واقعی تنش ها، مقدار فشار گل بحرانی بیشتر از معیار موهر کولمب بوده و همچنین هرزروی گل و شکستگی های *Breakout* را بهتر تشخیص می دهد. در این تحقیق مخزن تحت شرایط آنیزوتروپی تنش قرار گرفته است که مشخص شد این شرایط به شدت بر روی توزیع تنش و کرنش ها در اطراف چاه تاثیرگذار است. در حالت حفر چاه در امتداد تنش قائم، همانطور که در مدل سازی عددی مشخص شد، پدیده *Breakout* در راستای تنش افقی حداقل در عمق ۳۵۴۵ تا ۳۵۵۰ ایجاد می شود. همچنین تنش های افقی تخمین زده

۹. مراجع

- Afsari, M., Ghafoori, M. R., Roostaeian, M., Haghshenas, A., Ataei, A., & Masoudi, R. (2009). Mechanical Earth Model (MEM): An Effective Tool for Borehole Stability Analysis and Managed Pressure Drilling (Case Study). Paper presented at the Proceedings of the 2009 SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference. Bahrain: Society of Petroleum Engineers, (pp. 1-12).
- Akbar A., Husen, A., Brown, T., Delgado, R., Lee, D., Plumb, D., Smirnov, N., Marsden, R. (2005). Watching rocks change - mechanical earth modeling. Oilfield Review, Houston, Texas, USA: Schlumberger.
- Akhtarmanesh, S., Shahrabi, M. A., & Atashnezhad, A. (2013). Improvement of wellbore stability in shale using nanoparticles. Journal of Petroleum Science and Engineering, 112, 290-295.
- Al-Ajmi, A. M., & Zimmerman, R. W. (2006). Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi–Coulomb failure criterion. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43 (8), 1200-1211.
- Al-Ajmi, A. M., & Zimmerman, R. W. (2009). A new well path optimization model for increased mechanical borehole stability. Journal of Petroleum Science and Engineering, 69 (1-2), 53-62.
- Alizadeh, B., Telmadarreie, A., Shadizadeh, S. R., & Tezhe, F. (2012). Investigating geochemical characterization of asmari and bangestan reservoir oils and the source of H₂S in the marun oilfield. Petroleum Science and Technology, 30 (10), 967-975.
- Andrews, R. J., Hareland, G., Nygaard, R., Engler, T. W., & Virginillo, B. K. (2007, January). Methods of using logs to quantify drillability. Paper presented at the Proceedings of the Rocky Mountain Oil & Gas

Technology Symposium. Society of Petroleum Engineers.

Archer, S., & 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 (Curtin University, Department of Petroleum Engineering)* 12.

Ask, M. V., Ask, D., Elvebakk, H., & Olesen, O. (2015). Stress analysis in boreholes drag Bh and Leknes Bh, nordland, north norway. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(4), 1475-1484.

Asquith, G. B., Krygowski, D., & Gibson, C. R. (2004). *Basic well log analysis (Vol. 16)*. Tulsa, OK: American association of petroleum geologists.

Aubertin, M., Li, L., & Simon, R. (2000). A multiaxial stress criterion for short-and long-term strength of isotropic rock media. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37 (8), 1169-1193.

Chang, C., McNeill, L. C., Moore, J. C., Lin, W., Conin, M., & Yamada, Y. (2010). In situ stress state in the Nankai accretionary wedge estimated from borehole wall failures. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(12).

Cheng, W., Jiang, G., Zhou, Z., Wei, Z., & Li, X. (2019). Numerical simulation for the dynamic breakout of a borehole using boundary element method. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(4), 2873-2881.

Collins, P. M. (2002, January). Geomechanics and wellbore stability design of an offshore horizontal well, North Sea. Paper presented at the Proceedings of the SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium and International Horizontal Well Technology Conference. Society of Petroleum Engineers.

Darvish, H., Nouri-Taleghani, M., Shokrollahi, A., & Tatar, A. (2015). Geo-mechanical modeling and selection of suitable layer for hydraulic fracturing operation in an oil reservoir (south west of Iran). *Journal of African Earth Sciences*, 111, 409-420.

Dijvejin, Z. A., Ghaffarkhah, A., Sadeghnejad, S., & Sefti, M. V. (2019). Effect of silica nanoparticle size on the mechanical strength and wellbore plugging performance of SPAM/chromium (III) acetate nanocomposite gels. *Polymer Journal*, 51(7), 693-707.

Duan, K., & Kwok, C. Y. (2016). Evolution of stress-induced borehole breakout in inherently anisotropic rock: Insights from discrete element modeling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(4), 2361-2381.

Fattahpour, V., Pirayehgar, A., Dusseault, M. B., & Mehrgini, B. (2012, January). Building a mechanical earth model: a reservoir in Southwest Iran. Paper presented at the Proceedings of the 46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.

Fernandez-Ibanez, F., Cardona, F., Holland, M., Araujo, E., Brudy, M., Alvarelos, J., Ordonez, Y., & Mateus, D. (2010). 3D geomechanical modeling for the Apiay and Suria Oil Fields (Llanos Orientales Basin, Colombia): insights on the stability of reservoir bounding faults. Paper presented at the Proceedings of the SPE Latin American & Caribbean Petroleum Engineering Conference. Lima, Peru: Society of Petroleum Engineers. 1-14.

Fersheed, K., & Mody, U. T. (2007). Sustainable deployment of geomechanics technology to reducing well construction cost. Paper No. SPE/IADC 108241. In *Middle East Drilling and Technology Conference* (pp. 1-15).

Fjaer, E., Holt, R. M., Raaen, A. M., Risnes, R., & Horsrud, P. (2008). *Petroleum related rock mechanics*, 53, Elsevier.

Fjaer, E., Holt, R. M., Raaen, A. M., Risnes, R., & Horsrud, P. (2008). *Petroleum related rock mechanics* (Vol. 53). Elsevier.

Fjaer, E., Horsrud, P., Raaen, A. M., Risnes, R., & Holt, R. M. (1992). *Petroleum related rock mechanics* (Vol. 33). Elsevier.

Fleming, N. H., Ronaldi, R., Bruce, S., & Haryanto, J. (1990, January). The application of mechanical borehole stability theory to development well planning. Paper presented at the Proceedings of the SPE/IADC Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers.

Fowler, M. J., & Weir, F. M. (2008, September). The use of borehole breakout for geotechnical investigation of an open pit mine. Paper presented at the Proceedings of the Proceedings of the First Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium (pp. 541-550). Australian Centre for Geomechanics.

Ghafoori, M., Rastegarnia, A., & Lashkaripour, G. R. (2018). Estimation of static parameters based on dynamical and physical properties in limestone rocks. *Journal of African Earth Sciences*, 137, 22-31.

Gholami, R., Moradzadeh, A., Rasouli, V., & Hanachi, J. (2014). Practical application of failure criteria in determining safe mud weight windows in drilling operations, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6 (1), 13-25.

Gholami, R., Moradzadeh, A., Rasouli, V., Hanachi, J. (2014). Practical application of failure criteria in determining safe mud weight windows in drilling operations. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*, 6, 13-25.

Haimson, B. C., & Cornet, F. H. (2003). ISRM suggested methods for rock stress estimation—part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40 (7-8), 1011-1020.

Haimson, B., & Chang, C. (2005). Brittle fracture in two crystalline rocks under true triaxial compressive stresses. Geological Society, London, Special Publications, 240(1), 47-59.

Han, Y., Liu, C., Phan, D., AlRuwaili, K., & Abousleiman, Y. (2019, March). Advanced wellbore stability analysis for drilling naturally fractured rocks. Paper presented at the Proceedings of the SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. Society of Petroleum Engineers.

He, S., Zhou, J., Chen, Y., Li, X., & Tang, M. (2017). Research on wellbore stress in under-balanced drilling horizontal wells considering anisotropic seepage and thermal effects. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 45, 338-357.

Holland, M., Brudy, M., van der Zee, W., Perumalla, S., & Finkbeiner, T. (2010). Value of 3D geomechanical modeling in field development - a new approach using geostatistics. Paper presented at the Proceedings of the 2010 SPE/DGS Annual Technical Symposium and Exhibition, 4-7 April. Al-Khobar, Saudi Arabia: Society of Petroleum Engineers. 1-7.

Jaeger, J. C., Cook, N. G., & Zimmerman, R. (2009). *Fundamentals of rock mechanics*. John Wiley & Sons.

Kaibin, Q., Cheng, N., Ke, X., Liu, Y., Wang, L., Chen, Y., Wang, Y., and Xiong, P. (2013). 3D Reservoir

geomechanics workflow and its application to a tight gas reservoir in western China. Paper presented at the Proceedings of the International Petroleum Technology Conference, 26–28 March. Beijing, China: International Petroleum Technology Conference. 1-11.

Khaksar, A., Geoffrey Taylor, P., Fang, Zh., Kayes, T., Salazar, A., Rhaman, Kh. (2009). Rock strength from core and logs, where we stand and ways to go. Paper presented at the Proceedings of the EUROPEC/EAGE Conference and exhibition. Amsterdam, Netherlands.

Kidambi, T., & Kumar, G. S. (2016). Mechanical earth modeling for a vertical well drilled in a naturally fractured tight carbonate gas reservoir in the Persian Gulf. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 141, 38-51.

Lan, K., Liu, M., & Chao, W. (2015). Determination of collapse pressure for deviated wellbore in transversely isotropic water-sensitive formation. *J. Jilin Univ. (Earth Sci. Ed.)*, 45(1), 198-206.

Lashkaripour, G. R., Rastegarnia, A., & Ghafoori, M. (2018). Assessment of brittleness and empirical correlations between physical and mechanical parameters of the Asmari limestone in Khersan 2 dam site, in southwest of Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 138, 124-132.

Lee, H., Moon, T., & Haimson, B. C. (2016). Borehole breakouts induced in Arkosic sandstones and a discrete element analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(4), 1369-1388.

Li, Q., & Tang, Z. (2016). Optimization of wellbore trajectory using the initial collapse volume. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 29, 80-88.

Li, X., Jaffal, H., Feng, Y., El Mohtar, C., & Gray, K. E. (2018). Wellbore breakouts: Mohr-Coulomb plastic rock deformation, fluid seepage, and time-dependent mudcake buildup. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 52, 515-528.

Li, X., Yan, X., & Kang, Y. (2017). Investigation of drill-in fluids damage and its impact on wellbore stability in Longmaxi shale reservoir. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 159, 702-709.

Ma, T., Chen, P., Zhang, Q., & Zhao, J. (2016). A novel collapse pressure model with mechanical-chemical coupling in shale gas formations with multi-weakness planes. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 36, 1151-1177.

McLean, M. R., & Addis, M. A. (1990, January). Wellbore stability: the effect of strength criteria on mud weight recommendations. Paper presented at the Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.

Militzer, H., & Stoll, R. (1973). Einige beitraeger der geophysik zur primaerdatenerfassung im Bergbau, *Neue Bergbautechnik*, Leipzig, Vol. 3, No. 1, pp 21–25.

Miller, S. L. (1992). Well log analysis of V_p and V_s in carbonates. *CREWES Research Report*, 4, 1-11.

Mirzaghobanali, A., Afshar, M. (2011). A mud weight window investigation based on the mogi-coulomb Failure criterion and elasto-plastic constitutive model. *Petroleum Science and Technology*, 29:2, 121-131.

Mogi, K. (2007). *Experimental rock mechanics*. CRC Press.

Moraveji, M. K., Sabah, M., Shahryari, A., & Ghaffarkhah, A. (2017). Investigation of drill pipe rotation effect on cutting transport with aerated mud using CFD approach. *Advanced Powder Technology*, 28 (4),

1141-1153.

Najibi, A. R., Ghafoori, M., Lashkaripour, G. R., & Asef, M. R. (2017). Reservoir geomechanical modeling: In-situ stress, pore pressure, and mud design. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 151, 31-39.

Nasiri, A., Ghaffarkhah, A., Moraveji, M. K., Gharbanian, A., & Valizadeh, M. (2017). Experimental and field test analysis of different loss control materials for combating lost circulation in bentonite mud. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 44, 1-8.

Nmegbu, C. J., & Ohazuruike, L. (2014). Wellbore instability in oil well drilling: a review. *International Journal of Engineering Research and Development*, 10 (5), 11-20.

Pabakhsh, M., Ahmadi, K., Riahi, M. A., Shahri, A. A. (2012). Prediction of PEF and LITH logs using MRGC approach. *Life Science Journal*, 9 (4), 974-982.

Pan, X. D., & Hudson, J. A. (1988, January). A simplified three dimensional Hoek-Brown yield criterion. Paper presented at the Proceedings of the ISRM International Symposium. International Society for Rock Mechanics.

Plumb, R. A. (1994, January). Influence of composition and texture on the failure properties of clastic rocks. *Rock Mechanics in Petroleum Engineering*. Society of Petroleum Engineers.

Reik, G., & Zacas, M. (1978). Strength and deformation characteristics of jointed media in true triaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15 (6), 295-303.

Russell, K. A., Ayan, C., Hart, N. J., Rodriguez, J. M., Scholey, H., Sugden, C., & Davidson, J. K. (2003, January). Predicting and preventing wellbore instability using the latest drilling and logging technologies: Tullich Field Development, North Sea. Paper presented at the Proceedings of the SPE annual technical conference and exhibition. Society of Petroleum Engineers.

Simangunsong, R., Villatoro, J. J., & Davis, A. K. (2006, January). Wellbore stability assessment for highly inclined wells using limited rock-mechanics data. Paper presented at the Proceedings of the SPE annual technical conference and exhibition. Society of Petroleum Engineers.

Success, C. O. (2019, August 5). Evaluation of rock failure models for the determination of a safe mud weight window during drilling operations in the Niger Delta. Society of Petroleum Engineers. SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, 5-7 August, Lagos, Nigeria.

Tiwari, R. P., & Rao, K. S. (2004). Physical modeling of a rock mass under a true triaxial stress state. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 41(1), 396-401.

Von Winterfeld, C., Babajan, S., Amer, A., & Marsden, R. (2005, January). Geomechanics analyses of the crestal region of an omani gas field. Paper presented at the Proceedings of the International Petroleum Technology Conference.

Wawersik, W. R., Carlson, L. W., Holcomb, D. J., & Williams, R. J. (1997). New method for true-triaxial rock testing (No. SAND-97-0435C; CONF-970617-2). Sandia National Labs, Albuquerque, NM (United States).

Yasar, E., & Erdogan, Y. (2004). Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(5),

871-875.

Yousefian, H., Fatehi Marji, M., Soltanian, H., Abdollahipour, A., & Pourmazaheri, Y. (2020). Wellbore trajectory optimization of an Iranian oilfield based on mud pressure and failure zone. *Journal of Mining and Environment*, 11(1), 193-220.

Yousefian, H., Soltanian, H., Marji, M. F., Abdollahipour, A., & Pourmazaheri, Y. (2018). Numerical simulation of a wellbore stability in an Iranian oilfield utilizing core data. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 168, 577-592.

Yu, M. H., Zan, Y. W., Zhao, J., & Yoshimine, M. (2002). A unified strength criterion for rock material. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39 (8), 975-989.

Zang, A., & Stephansson, O. (2009). *Stress field of the Earth's crust*. Springer Science & Business Media.

Zhang, J. (2011). Pore pressure prediction from well logs: Methods, modifications, and new approaches. *Earth-Science Reviews*, 108 (1-2), 50-63.

Zhou, J., He, S., Tang, M., Huang, Z., Chen, Y., Chi, J., & Yuan, P. (2018). Analysis of wellbore stability considering the effects of bedding planes and anisotropic seepage during drilling horizontal wells in the laminated formation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 170, 507-524.

Zoback, M. D. (2010). *Reservoir geomechanics*. Cambridge University Press.

Zoback, M. D., Barton, C. A., Brudy, M., Castillo, D. A., Finkbeiner, T., Grollmund, B. R & Wiprut, D. J. (2003). Determination of stress orientation and magnitude in deep wells. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40 (7-8), 1049-1076.

رضا، علی‌پور، (۱۳۹۵). تحلیل شکستگی‌های سنگ مخزن آسماری در میدان نفتی مارون (جنوب باختر ایران)، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دانشگاه شهید چمران اهواز، شماره ۲۰

رومیانی، ف.، صابری، م.، ریاحی، م. (۱۳۹۸). تجزیه و تحلیل خواص مخزنی و تخمین شکستگی‌ها با استفاده از نگارهای چاه‌پیمایی در یکی از میادین هیدروکربنی جنوب غربی ایران، نشریه علمی ژئومکانیک نفت، دوره ۳، شماره ۴، ۴۴-۵۶.

محمدی بهبود، (۱۳۹۵). طبقه بندی ژئومکانیکی سازندهای نفتی بر اساس شاخص انرژی ویژه حفاری در حفاری‌های عمیق، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک.

نجفی پور علیرضا، آهنگری کاوه، آل علی سیدمحسن، (۱۳۹۶). تعیین پنجره ی گل مناسب و آنالیز حساسیت پایداری دیواره ی چاه افقی با استفاده از مدل‌سازی عددی در یکی از میادین نفتی جنوب غرب ایران. ماهنامه علمی اکتشاف و تولید نفت و گاز. (۱۵۰): ۶۰-۶۷.

پیرحیاتی، مهدی و شهام، افشین، ۱۳۹۸، تحلیل پایداری چاه با استفاده از گل حفاری و نرم افزار ABAQUS، پنجمین کنفرانس بین المللی مهندسی شیمی و نفت، تهران.

دانیالی، محمد و ابراهیم آبادی، آرش، ۱۳۹۷، تحلیل پایداری دیواره چاه نفت در حفاری فروتعدالی به وسیله ی نرم افزار ABAQUS، هفتمین کنفرانس بین المللی نفت، گاز، پالایش و پتروشیمی بارویکرد توسعه ارتباط دولت، دانشگاه صنعت، شیراز.