



مقاله پژوهشی

انتخاب وزن سیال حفاری بر مبنای معیارهای مکانیک سنگ: مطالعه موردی در یکی از میادین جنوب غرب ایران

رضا جلکانی^۱؛ سید شهاب طباطبایی مرادی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد مهندسی حفاری، دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند

۲- استادیار، دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۰۲ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۹

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2024.417631.1211

واژگان کلیدی	چکیده
چگالی سیال حفاری، پایداری دیواره، پنجره چگالی سیال، ضرایب الاستیک، تنش‌های قائم	از مهم‌ترین وظایف سیال حفاری، حفظ و فراهم کردن پایداری دیواره چاه می‌باشد. فشار کم در داخل چاه می‌تواند منجر به ریزش دیواره و یا ورود ناخواسته سیال به درون چاه گردد. از طرفی فشار بالای داخل چاه می‌تواند منجر به شکست دیواره چاه گردد؛ بنابراین مقدار مناسب چگالی سیال حفاری باید به گونه‌ای انتخاب شود که فشار داخل چاه در حد تعادل باقی بماند. هدف این پژوهش تعیین مقدار چگالی سیال حفاری با توجه به مفهوم پایداری دیواره چاه است به گونه‌ای که تنش‌های شعاعی و مماسی در دیواره چاه برابر گردند. بدین منظور ابتدا داده‌های موردنیاز از یکی از چاه‌های میدانی در جنوب غربی ایران جمع‌آوری شدند. سپس با استفاده از روابط موجود تنش‌های قائم در دیواره چاه محاسبه گردیدند. نتایج این مطالعه نشان داد که با توجه به پنجره ایمن چگالی سیال حفاری، مقدار بیشترین و کمترین چگالی بهینه سیال که در آن پایداری دیواره چاه در عمق‌های مورد نظر حفظ خواهد شد به ترتیب ۱۶/۸۰ و ۱۳/۹۳ پوند بر گالن خواهد بود. همچنین مقایسه چگالی بهینه و چگالی واقعی مورد استفاده در سیال حفاری این چاه نشان داد که به دلیل پایین‌تر بودن چگالی واقعی استفاده شده در عملیات نسبت به چگالی بهینه، در اعماق مختلف مشکلات عدم پایداری دیواره چاه مشاهده شده است.

۱. پیش‌گفتار

سیال حفاری به منظور انجام وظایفی نظیر خنک‌سازی مته، انتقال کنده‌های حفاری به سطح، معلق نگه‌داشتن کنده‌ها در زمان توقف گردش سیال، کنترل فشار سازندهای زیرسطحی، جلوگیری از خوردگی تجهیزات درون چاهی، روانکاری حرکت رشته حفاری، انتقال توان هیدرولیک به مته و فراهم کردن پایداری دیواره حفره به درون چاه پمپ می‌گردد [۱]. به‌منظور انجام وظایف فوق، ویژگی‌های سیال حفاری از جمله چگالی، خواص رئولوژیکی، فیلتراسیون، شاخص pH و

محتوای جامد و گاز باید مشخص و در صورت لزوم مقدار بهینه آنها تعیین گردد [۲]. چگالی سیال حفاری، چگالی گل یا وزن سیال حفاری از مهم‌ترین ویژگی‌های سیال حفاری می‌باشد که نقش مهمی در عملکرد موفقیت‌آمیز سیال دارد. مهم‌ترین پارامتر وابسته به چگالی سیال، فشار درون چاه می‌باشد. انتخاب نامناسب چگالی سیال و به طبع آن فشار داخل چاه می‌تواند مشکلاتی از قبیل تهاجم ناخواسته سیال سازندی^۱ به درون چاه، شکست لایه‌های زیرسطحی، گیر رشته حفاری^۲، کاهش نرخ نفوذ مته^۳

³ Rate of penetration

¹ Kick

² Pipe sticking

چاه‌هایی که قطر یکسانی ندارند، به دو عامل وابسته است: (الف)، عوامل غیرقابل کنترل و (ب)، عوامل قابل کنترل. از عوامل غیرقابل کنترل، می‌توان به تنش‌های برجا^{۱۱}، فشار سازندی و مقاومت سنگ و از عوامل قابل کنترل می‌توان به چگالی سیال حفاری اشاره کرد [۸].

بر اساس پژوهش مالکی و همکاران (۲۰۱۴) پایداری چاه یکی از مهم‌ترین مشکلات مشاهده شده در حین عملیات حفاری گزارش گردید. طبق نتایج به‌دست‌آمده، برای جلوگیری از مشکلات ناپایداری چاه، تعیین پنجره یا چگالی مناسب سیال حفاری بسیار مهم است [۹].

در سال ۲۰۱۷ بایساختی^{۱۴} و ریما^{۱۵} نشان دادند که تجزیه و تحلیل عدم پایداری چاه شامل ارزیابی خصوصیات مکانیکی سنگ و وضعیت تنش‌های برجا است و تنها عامل قابل کنترل در این فرآیند، چگالی سیال حفاری است [۱۰].

درویش‌پور و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی حفاری چاهی در لایه مخزنی آسماری پرداختند. آن‌ها توانستند محدوده ایمن چگالی سیال حفاری را به‌منظور حفظ پایداری چاه با استفاده از نرم‌افزار *FLAC3D* و یک مدل المان محدود با ویژگی‌های ژئومکانیکی لایه‌های حفاری تعیین و شبیه‌سازی کنند [۱۱]. در سال ۲۰۲۰ رفیعی‌پور و همکاران به بررسی حفاری در سازندهای شیلی پرداختند و نشان دادند که حفاری در این سازندها، به دلیل فعل‌وانفعالات شیمیایی بسیار وابسته به زمان است [۱۲].

کدخدایی (۲۰۲۱) با بررسی مدل‌های ژئومکانیکی در یکی از میددین‌گازی جنوب ایران توانست کاهش عدم قطعیت در طراحی پنجره مناسب چگالی سیال حفاری، آزیموت و شیب بهینه حفاری را محاسبه کند [۱۳].

در سال ۲۰۲۲ حسین‌پور و ریاحی مشخص کردند که مواردی همچون مسیر چاه و چگالی گل حفاری تأثیر قابل توجهی بر پایداری دیواره چاه منطقه مورد مطالعه دارد. پژوهشگران با استفاده از داده‌های نمودارگیری، گزارش‌های حفاری و داده‌های زمین‌شناسی مدلی را برای پایداری دیواره چاه در

در سنگ و هرزروی سیال حفاری^۴ را در پی داشته باشد [۲-۴].

در حفاری فراتعادلی، زمانی که فشار داخل چاه بیشتر از فشار سازندی باشد، مقدار چگالی سیال حفاری با توجه به پنجره چگالی گل^۵ انتخاب می‌شود. بدین صورت که مقدار فشار چاه از فشار سازندی بیشتر انتخاب می‌شود تا از ورود ناخواسته سیالات سازندی به چاه جلوگیری شود. از سوی دیگر مقدار فشار داخل چاه باید از فشار شکست سازند کمتر باشد تا شکستگی سنگ و مشکلات بعدی نظیر هرزروی و مسائل مرتبط با کنترل چاه اتفاق نیفتد؛ لذا انتخاب چگالی مناسب سیال حفاری باید به‌گونه‌ای باشد که فشار داخل چاه از فشار سازندی بیشتر و از فشار شکست سازند کمتر باشد [۲-۴].

یکی از روش‌های انتخاب چگالی مناسب سیال حفاری، ارزیابی رفتار مکانیکی سنگ و پایداری دیواره چاه می‌باشد. در سال‌های گذشته در این زمینه برخی مطالعات انجام شده است. در سال ۱۹۹۰ مک‌لین^۶ و آدیس^۷ با توجه به دو معیار شکست موهر - کلمب^۸ و دراگر - پراگر^۹ سعی بر تعیین مناسب پنجره چگالی گل داشتند. آن‌ها معتقد بودند که عدم پایداری دیواره چاه می‌تواند به مشکلاتی مثل گیر لوله منجر شود [۵].

رامیرو^{۱۰} و همکاران (۲۰۰۰) بیان کردند که مشکلات مربوط به پایداری چاه یکی از منابع اصلی اتلاف وقت و هزینه در عملیات حفاری است. پژوهشگران نشان دادند که یکی از پارامترهای کلیدی در فرآیند کنترل چاه، چگالی سیال است [۶].

در سال ۲۰۰۰ چن^{۱۱} و همکاران روش‌های تعیین بهینه چگالی سیال را بر اساس ملاحظات مکانیک سنگ توصیف کردند. آن‌ها معتقد بودند برای جلوگیری و یا به حداقل رساندن مشکلات ناشی از عدم پایداری دیواره چاه، طراحی چگالی سیال حفاری بر اساس تحلیل پایداری دیواره چاه بسیار مهم می‌باشد [۷].

خان^{۱۲} و همکاران (۲۰۰۵)، نشان دادند که ناپایداری در

¹¹ Chen

¹² Khan

¹³ In-situ stresses

¹⁴ Baisakhi

¹⁵ Rima

⁴ Drilling fluid lost circulation

⁵ Mud weight window

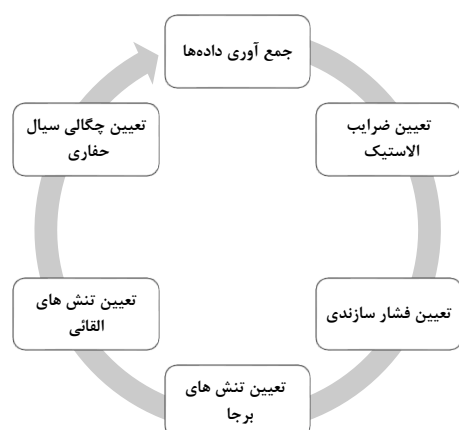
⁶ McLean

⁷ Addis

⁸ Mohr-Coulomb

⁹ Drucker-Prager

¹⁰ Ramiro



شکل ۱. روش انجام پژوهش

داده‌های مورد استفاده مربوط به سازند سروک در یکی از میداین جنوب غربی ایران می‌باشد. این میدان یکی از بزرگترین میداین نفتی جنوب غرب ایران محسوب می‌شود که در شرق شهر اهواز و در مجاورت میداین کوپال، آغاچاری، رامین، شادگان و رامشیر واقع شده است. طول میدان ۶۷ کیلومتر و عرض متوسط آن ۷ کیلومتر بوده و از لحاظ زمین‌شناسی در قسمت شرقی حوضه فروافتادگی دزفول شمالی قرار گرفته است. این میدان بصورت تاق‌دیس نامتقارن است که دارای شیب ۴۵ الی ۶۵ درجه در یال جنوب غربی و ۲۰ الی ۴۵ درجه در یال شمال و دارای خمش محوری در بخش میانی ساختار است. چاه مورد مطالعه در این میدان در مرکز ساختاری میدان واقع شده است. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل لاگ‌های دانسیته و سونیک، فشار سازندی و داده‌های هندسی چاه شامل آزیموت و زاویه شیب در بازه عمقی ۱۰۶۰۰ تا ۱۲۸۰۰ فوتی می‌باشند.

۱.۲. تعیین ضرایب الاستیک

در مدل‌های مختلف ژئومکانیکی، مهم‌ترین ضرایب الاستیک مؤثر بر رفتار سنگ، مدول یانگ و نسبت پواسون است. برای تخمین این دو پارامتر، با استفاده از داده‌های سرعت موج‌برشی، سرعت موج تراکمی و داده‌های لاگ دانسیته (شکل (۲))، از روابط (۱) و (۲) استفاده می‌شود [۱۸].

منطقه مورد مطالعه ارائه کردند [۱۴].

بهشتیان و همکاران در سال ۲۰۲۲ توانستند با استفاده از داده‌های نمودارگیری استخراج شده از سه حلقه چاه در میدان گازی پارس جنوبی، پنجره مناسب چگالی سیال حفاری را از نظر فشار منفذی پیش‌بینی کنند. پژوهشگران مدلی را توسعه دادند که در آن موارد مرتبط با عدم قطعیت و دقت در تخمین فشار منفذی و فشار شکست سازند دیده شده بود [۱۵].

در سال ۲۰۲۳ علاوی^{۱۶} و الجواد^{۱۷} بیان کردند که در هر مطالعه ژئومکانیکی، دانش خواص مکانیکی و تنش‌ها در زمین ضروری است. آن‌ها توانستند مدل مکانیکی زمینی را برای پیش‌بینی شکست برشی که عامل اصلی در ریزش دیواره چاه می‌باشد را ارائه کنند [۱۶].

یکی از مطالعات اصلی در این زمینه پژوهش مربوط به آدنوی (۲۰۱۰) است که بر اساس آن، چگالی مناسب سیال حفاری از دیدگاه پایداری دیواره چاه، باید به گونه‌ای انتخاب شود که تنش‌های القائی^{۱۸} شامل تنش‌های مماسی^{۱۹} و شعاعی^{۲۰} در هر عمق با یکدیگر برابر شوند. طبق نظریه آدنوی، این چگالی از نظر پایداری دیواره چاه چگالی بهینه بوده و از مشکلات بعدی، نظیر ریزش یا شکست دیواره جلوگیری می‌کند [۱۷]. بر اساس مطالعات گذشته این نظریه آدنوی در میداین ایران مورد بررسی قرار نگرفته است و مطالعات انجام شده بر مبنای مقایسه تنش‌های القائی و مقاومت سنگ در دیواره چاه بوده است. بنابراین در این پژوهش، نظریه آدنوی در زمینه انتخاب چگالی سیال حفاری برای یکی از میداین جنوب غرب ایران بررسی و سپس مقادیر بهینه چگالی سیال حفاری با چگالی واقعی سیال مورد مقایسه قرار گرفت.

۲. روش انجام پژوهش

شکل (۱) نشان‌دهنده روش انجام این پژوهش می‌باشد. بر این اساس، پس از جمع‌آوری و ارزیابی داده‌ها، ضرایب الاستیک، فشار سازندی، تنش‌های برجا و تنش‌های القائی محاسبه می‌گردند. سپس، مقادیر چگالی سیال حفاری در اعماق مختلف محاسبه و با مقدار چگالی سیال حفاری واقعی مورد استفاده مقایسه می‌شود.

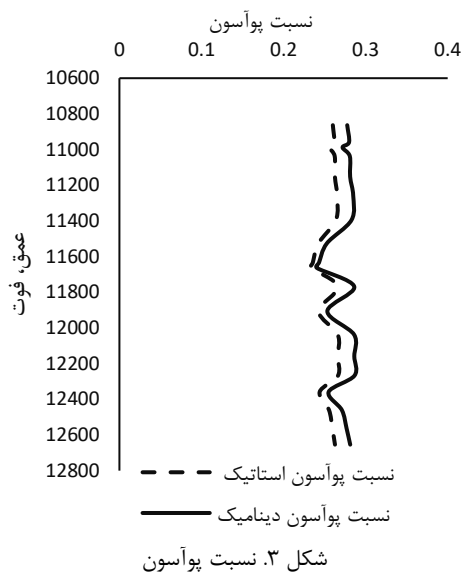
¹⁹ Tangential stresses

²⁰ Radial stresses

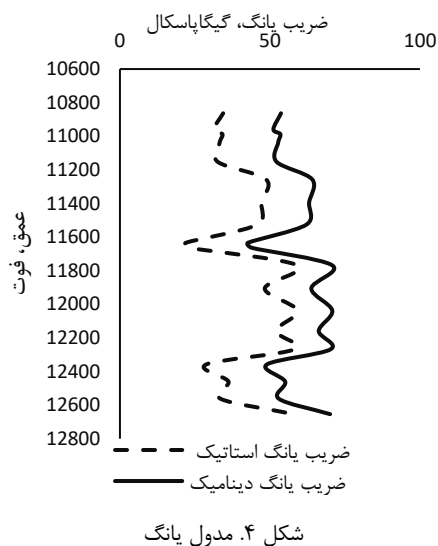
¹⁶ Allawi

¹⁷ Al-Jawad

¹⁸ Induced stresses



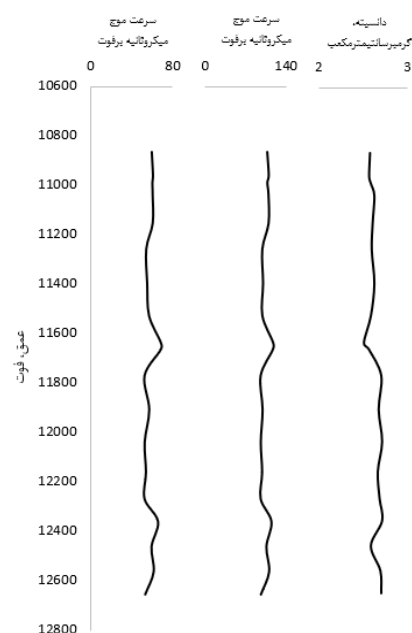
برای صحت سنجی مقادیر دینامیک و استاتیک ضرایب الاستیک به دست آمده در مرحله قبل، از مطالعات صورت گرفته توسط نجیبی و همکاران (۲۰۱۵) و غفوری و همکاران (۲۰۱۸) در سازند سروک استفاده شد. بر این اساس بیشترین و کمترین مقدار برای مدول یانگ دینامیک به ترتیب ۷۷/۴ و ۱۳/۷ گیگاپاسکال و بیشترین و کمترین مقدار برای نسبت پواسون دینامیک به ترتیب ۰/۳۸ و ۰/۲۷ گزارش شده است. مقادیر محاسبه شده در بازه مشخص شده توسط پژوهشگران برای سازند سروک قرار داشته و معتبر است [۱۹، ۲۱].



$$E_d = \rho \times V_s^2 \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{(V_p^2 - V_s^2)} \quad (1)$$

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

در روابط (۱) و (۲)، ضریب یانگ دینامیک برحسب گیگاپاسکال، ρ چگالی برحسب گرم بر سانتیمتر مکعب، V_s سرعت موج برشی برحسب کیلومتر بر ثانیه، V_p سرعت موج تراکمی (فشاری) برحسب کیلومتر بر ثانیه می باشد و v_d نسبت پواسون دینامیک می باشد.



شکل ۲. لاگ سرعت موج برشی، سرعت موج تراکمی و لاگ دانسیته برحسب عمق

به منظور محاسبه تنش های برجای افقی در این پژوهش از روابط زویک^{۲۱} استفاده می گردد. در روابط زویک، از ضرایب الاستیک استاتیک استفاده می گردد. بدین منظور، روابط (۳) و (۴) به منظور تبدیل ضرایب دینامیک محاسبه شده به ضرایب استاتیک استفاده می گردند [۱۹، ۲۰]:

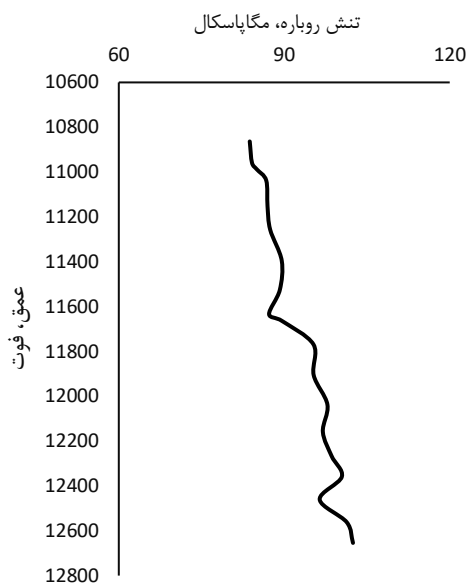
$$E_s = 0.014 E_d^{1.96} \quad (3)$$

$$v_s = 0.063 + 0.71 v_d \quad (4)$$

شکل های (۳) و (۴) نشان دهنده ضرایب الاستیک استاتیک و دینامیک می باشند.

²¹ Zobak

در رابطه بالا، $\rho(z)$ دانسیته سنگ، Z عمق و g ثابت نیروی گرانش زمین است. $\bar{\rho}$ دانسیته میانگین روباره برحسب گرم بر سانتیمتر مکعب می‌باشد. یکی از راه‌های تعیین تنش روباره استفاده از لاگ دانسیته می‌باشد. تنش روباره برحسب عمق در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶. تنش روباره برحسب عمق

۴.۲. کرنش در راستای طولی و عرضی

برای تعیین کرنش در راستای طولی و عرضی از روابط (۷) و (۸) که توسط کیدامبی^{۲۴} و کومار^{۲۵} در سال ۲۰۱۶ ارائه شده است، استفاده گردید [۲۴]. نمودار کرنش در راستای طولی و عرضی محاسبه شده برحسب عمق در شکل (۷) نشان داده شده است.

$$\varepsilon_x = \frac{S_v \times \nu}{E_s} \times \left(\frac{1}{1-\nu} - 1 \right) \quad (7)$$

$$\varepsilon_y = \frac{S_v \times \nu}{E_s} \times \left(1 - \frac{\nu^2}{1-\nu} \right) \quad (8)$$

همچنین برای صحت سنجی مقادیر محاسبه شده کرنش، از شکل (۸) استفاده شده است. این شکل که بر مبنای مطالعات چانگ^{۲۶} و وو^{۲۷} ترسیم گردیده است، نشان‌دهنده مقادیر مجاز

²⁵ Kumar

²⁶ Chang

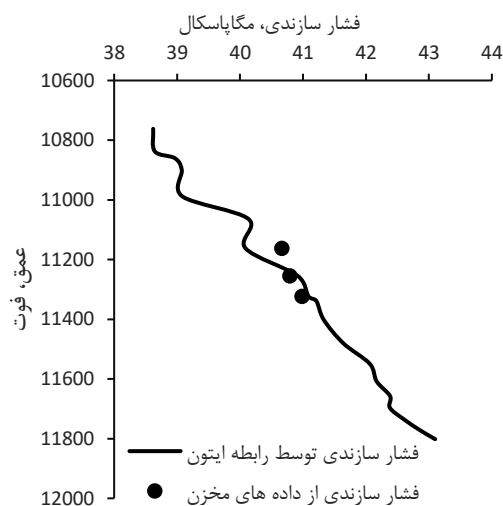
²⁷ Vo

۲.۲. محاسبه فشار سازندی

برای به دست آوردن فشار سازندی در بازه مورد مطالعه از سازند سروک، از رابطه ایتون^{۲۲} استفاده شده است [۲۲]:

$$G_p = G_o - (G_o - G_n) \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t_o} \right)^x \quad (5)$$

در رابطه بالا، G_p گرادیان فشار سازند، G_o گرادیان تنش روباره، G_n گرادیان فشار نرمال، Δt_n زمان عبور صوت در شیل در فشار نرمال، Δt_o مدت زمان عبور موج صوتی در سازند مورد نظر و x یک ثابت می‌باشد که با توجه به سازندهای مختلف می‌تواند مقدار متفاوتی داشته باشد [۲۲]. نمودار تغییرات فشار سازندی محاسبه شده با استفاده از این روش برحسب عمق در شکل (۵) نشان داده شده است. همچنین در این شکل فشار سازندی در سه عمق با استفاده از داده‌های فشار مخزن به منظور تایید نتایج حاصله از رابطه ایتون نشان داده شده است.



شکل ۵. فشار سازندی برحسب عمق

۳.۲. محاسبه تنش روباره

تنش روباره^{۲۳} یکی از تنش‌های برجا ناشی از چگالی طبقات لایه‌های زمین می‌باشد [۲۳]. برای تعیین تنش روباره در این پژوهش از رابطه (۶) استفاده شده است:

$$S_v = \int_0^z \rho(z)g dz \approx \bar{\rho}gz \quad (6)$$

²² Eaton

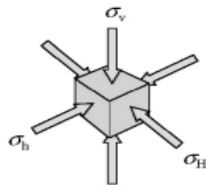
²³ Overburden stress

²⁴ Kidambi

ضریب در سنگ‌های مختلف دارای مقدار متفاوتی می‌باشد. با توجه به جنس سازند در بازه مورد مطالعه که از جنس سنگ آهک می‌باشد، در این پروژه برای ضریب بایوت مقدار ۰/۷ در نظر گرفته شده است [۲۶].

۶.۲. تنش‌های افقی برجا

در اثر تنش‌های عمودی وارده بر لایه‌های زیرسطحی، تمایل به جابه‌جایی به صورت افقی وجود دارد. در نتیجه جابه‌جایی سنگ‌ها به صورت افقی که توسط دیگر سنگ‌ها محاصره شده‌اند، تنش‌های جانبی به نام تنش افقی حداکثر و تنش افقی حداقل به وجود می‌آید [۲۷]. وضعیت تنش‌های برجا در یک نقطه از زمین در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹. وضعیت تنش‌های برجا [۲۷].

روابط (۹) و (۱۰) (زویک) به ترتیب به منظور پیش‌بینی تنش‌های افقی حداکثر و حداقل استفاده می‌شود [۱۰]:

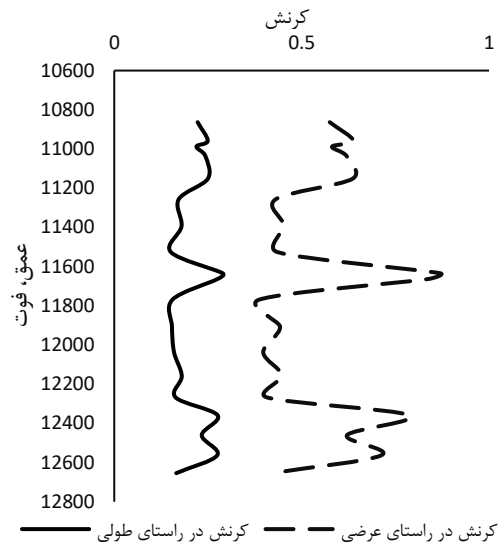
$$\sigma_H = \frac{v_s}{1-v_s} \sigma_v - \frac{v_s}{1-v_s} \alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E_s}{1-v_s^2} \varepsilon_x + \frac{v_s E_s}{1-v_s^2} \varepsilon_y \quad (9)$$

$$\sigma_h = \frac{v_s}{1-v_s} \sigma_v - \frac{v_s}{1-v_s} \alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E_s}{1-v_s^2} \varepsilon_y + \frac{v_s E_s}{1-v_s^2} \varepsilon_x \quad (10)$$

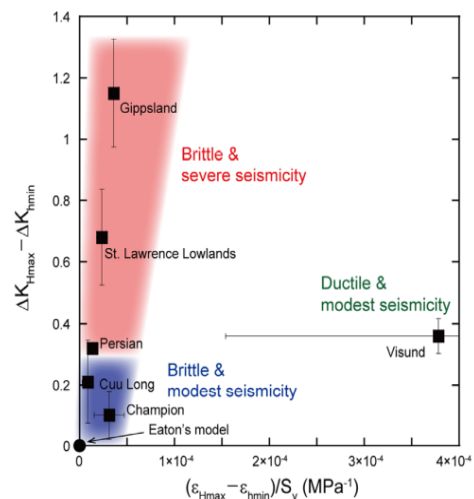
در روابط (۹) و (۱۰)، v_s نسبت پواسون در حالت استاتیکی، P_p تنش عمودی برحسب مگاپاسکال، α ضریب بایوت، فشار سازندی برحسب مگاپاسکال، E_s ضریب یانگ در حالت استاتیکی، ε_x و ε_y به ترتیب میزان کرنش در راستای طولی و عرضی، σ_H تنش افقی بیشینه و σ_h تنش افقی کمینه برحسب مگاپاسکال می‌باشند [۱۰].

مقدار تنش‌های برجا در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

کرنش طولی و عرضی در منطقه ایران می‌باشد. همان‌طور که در این شکل مشخص است مقدار مجاز برای مقادیر کرنش در راستای طولی و عرضی در منطقه ایران ۰/۲۵ تا ۰/۶۵ می‌باشد [۲۵]. مقادیر محاسبه شده کرنش در این بازه قرار داشته و معتبر است.



شکل ۷. کرنش در راستای طولی و عرضی



شکل ۸. مقادیر کرنش در راستای طولی و عرضی [۲۵].

۵.۲. ضریب بایوت

به منظور محاسبه تنش‌های برجا با استفاده از روابط زویک، مشخصه‌سازی مقدار ضریب بایوت^{۲۸} ضروری می‌باشد. این

²⁸ Biot coefficient

$$\tau_{xy} = \frac{1}{2}(\sigma_h - \sigma_H)\sin 2\varphi \cos \gamma \quad (13)$$

برای محاسبه تنش‌های القائی در دیواره چاه از روابط کرش استفاده می‌شود [۲۸]:

$$\sigma_\theta = (\sigma_H + \sigma_h) - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos(2\theta) - P_w \quad (14)$$

$$\sigma_r = P_w \quad (15)$$

$$\sigma_z = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \cos(2\theta) \quad (16)$$

در روابط بالا، σ_θ تنش مماسی برحسب مگاپاسکال، σ_r تنش شعاعی برحسب مگاپاسکال، σ_z تنش محوری برحسب مگاپاسکال و P_w فشار درون چاه ناشی از سیال حفاری می‌باشد [۲۸].

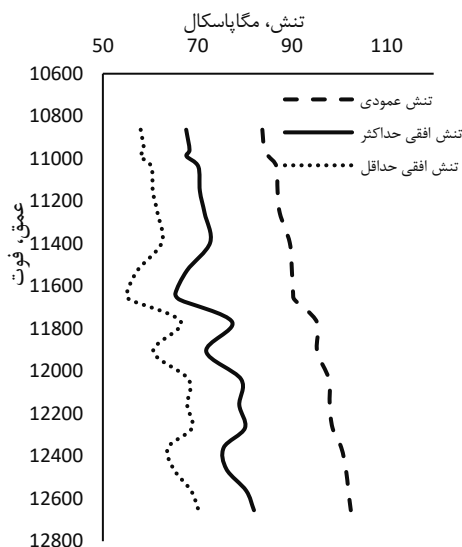
یکی از پارامترهای مهم در روابط کرش (روابط ۱۴-۱۶) θ می‌باشد که زاویه چرخش در جهت عقربه‌های ساعت روی دیواره چاه نسبت به تنش افقی بیشینه است. به منظور محاسبه θ از رابطه زیر استفاده می‌شود [۲۷]:

$$\tan 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (17)$$

در رابطه فوق، σ_x ، σ_y و τ_{xy} تنش‌های دیواره در سیستم کارترین متصل به چاه می‌باشند که از روابط ۱۱-۱۳ قابل محاسبه هستند.

پس از تعیین تنش‌های القائی و بر اساس نظریه آدنوی، مقدار چگالی سیال حفاری و فشار داخل چاه معادل آن به‌گونه‌ای تعیین می‌گردد تا تنش‌های مماسی و شعاعی در دیواره با هم برابر گردند.

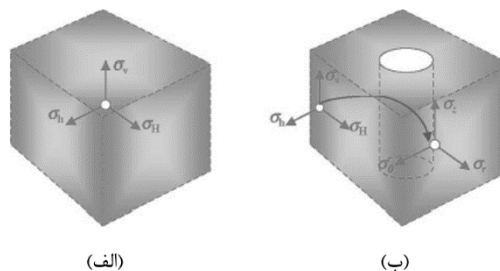
اساس نظریه آدنوی در شکل نشان (۱۲) نشان داده شده است. بر اساس این شکل، با افزایش فشار داخل چاه، تنش شعاعی افزایش پیدا می‌کند و برخلاف آن تنش مماسی کاهش پیدا می‌کند. با کاهش چگالی سیال، فشار داخل چاه کاهش پیدا می‌کند که مطابق شکل منجر به کاهش مقدار تنش شعاعی و افزایش تنش مماسی می‌گردد؛ لذا چگالی مناسب سیال حفاری باید به‌گونه‌ای تعیین شود که در هر عمق، تنش مماسی و تنش شعاعی وارده بر دیواره چاه با هم برابر باشند [۱۷].



شکل ۱۰. تنش‌های برجا در سازند

۷.۲. تنش‌های القائی در دیواره چاه

سازندها در زیرزمین تا قبل از عملیات حفاری در حالت تعادل قرار دارند. هنگامی که عملیات حفاری آغاز شود، این تعادل در تنش‌ها برهم‌خورده و موجب تغییر در این تنش‌ها می‌شود. در شکل (۱۱)، تنش‌ها در وضعیت قبل و بعد از عملیات حفاری نشان داده شده است.

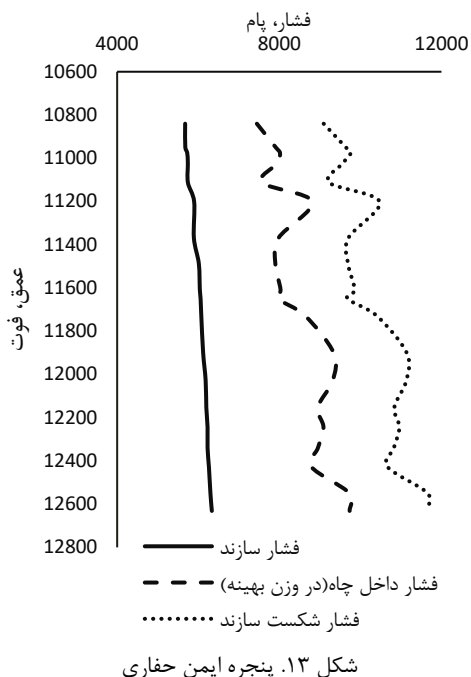


شکل ۱۱. (الف)، سازند در حالت تعادل، (ب)، وضعیت تنش‌ها بعد از عملیات حفر چاه [۲۷].

پس از تعیین تنش‌های اصلی در مرحله قبل، به دلیل اینکه چاه می‌تواند هر جهتی داشته باشد، این تنش‌ها باید به سیستم کارترین جدید (z, y, x) در مختصات چاه منتقل شود تا تنش‌های σ_x ، σ_y و σ_z به دست آید. برای انتقال تنش‌ها از روابط زیر استفاده می‌شود [۲۷]:

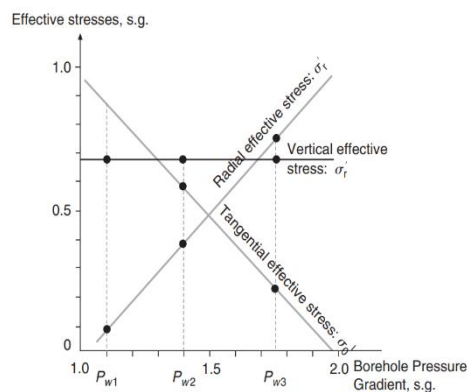
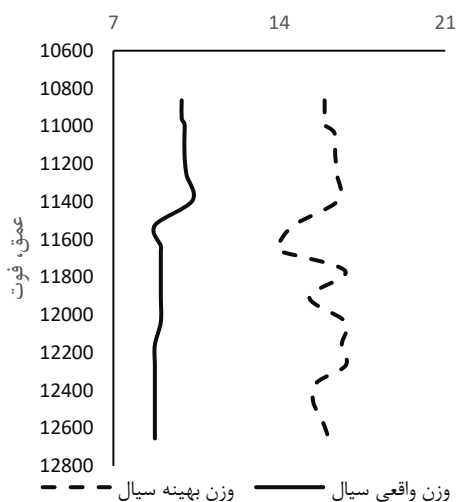
$$\sigma_x = (\sigma_H \cos^2 \varphi + \sigma_h \sin^2 \varphi) \cos^2 \gamma + \sigma_v \sin^2 \gamma \quad (11)$$

$$\sigma_y = \sigma_H \sin^2 \varphi + \sigma_h \cos^2 \varphi \quad (12)$$



شکل (۱۵) از داده‌های لاگ کالیپر، تغییرات قطر چاه نسبت به قطر حفاری شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است، در تمامی اعماق، بزرگ‌شدگی حفره مشاهده می‌گردد. این امر می‌تواند ناشی از ناپایداری و ریزش دیواره در اثر انتخاب نادرست چگالی سیال حفاری باشد.

چگالی سیال، پوند بر گالن



۳. نتایج

با توجه به رابطه بین تنش روباره، تنش افقی بیشینه و تنش افقی کمینه، رژیم تنش‌های منطقه بر مبنای دسته‌بندی اندرسون^{۲۹}، نرمال می‌باشد [۲۹].

همان‌گونه که ذکر گردید، برای محاسبه چگالی بهینه سیال حفاری، تنش‌های مماسی و شعاعی با یکدیگر برابر قرار داده شدند. با استفاده از چگالی تعیین شده، فشار داخل چاه محاسبه و در شکل (۱۳) نشان داده شده است. به‌منظور مقایسه مقادیر فشار چاه با پنجره چگالی گل، مقادیر فشار سازندی و فشار شکست سازند نیز در این شکل نشان داده شده است.

همان‌گونه که از شکل مشخص است، فشار داخل چاه در محدوده پنجره ایمن حفاری (حداقل فشار سازندی و فشار شکست) قرار دارد.

در شکل (۱۴) مقادیر چگالی سیال حفاری بهینه به دست آمده با توجه به معیار پایداری دیواره چاه، مقدار بیشتری نسبت به چگالی واقعی سیال حفاری مورد استفاده در این چاه دارد. مزیت اصلی بالاتر بودن چگالی سیال حفاری، فراهم آوردن پایداری دیواره چاه است.

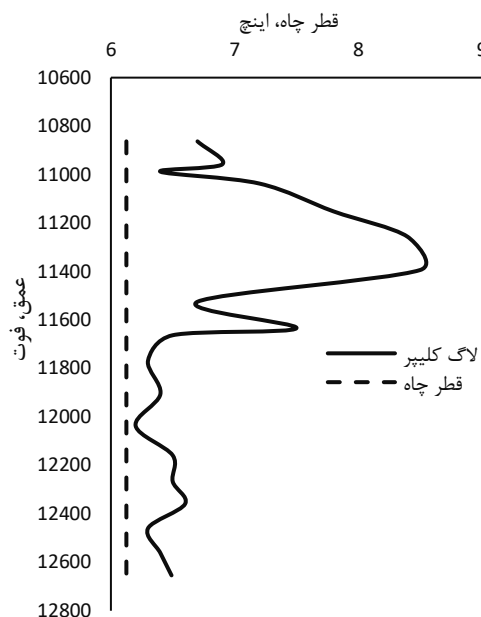
بررسی داده‌های مرتبط با چاه مورد مطالعه، نشان می‌دهد که به دلیل پایین‌تر بودن چگالی واقعی سیال نسبت به چگالی بهینه، در اعماق مختلف مشکلات عدم پایداری دیواره چاه مشاهده شده است.

شدند:

- با توجه به تعیین تنش‌های برجا در چاه و تئوری اندرسون^۳، رژیم تنش منطقه به صورت نرمال معرفی می‌گردد.
- مقادیر ضرایب الاستیک به دست آمده با نتایج مطالعات پیشین در سازند سروک همخوانی داشت.
- با تعیین تنش‌های برجا و تنش‌های القایی در چاه مورد مطالعه، چگالی بهینه سیال حفاری که همان چگالی در حالت برابر بودن تنش‌های مماسی و شعاعی می‌باشد، مشخص شدند.
- در چاه مورد مطالعه کمترین و بیشترین مقدار چگالی بهینه سیال حفاری در اعماق مختلف ۱۳/۹۳ و ۱۶/۸۰ پوند بر گالن مشخص شده است.
- مقایسه چگالی بهینه سیال حفاری و چگالی واقعی نشان داد که مقادیر بهینه به دست آمده با توجه به معیار پایداری دیواره چاه، مقدار بیشتری نسبت به چگالی واقعی سیال حفاری دارد. مزیت اصلی بالاتر بودن چگالی سیال، فراهم آوردن پایداری دیواره چاه است. بررسی داده‌های واقعی مرتبط با چاه مورد مطالعه، نشان می‌دهد که به دلیل پایین تر بودن چگالی واقعی نسبت به مقدار بهینه، در اعماق مختلف مشکلات عدم پایداری دیواره چاه مشاهده شده است.

۵. سپاس‌گزاری

نویسندگان قدردانی خود را از شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب بابت همکاری صمیمانه و فراهم نمودن داده‌های مورد نیاز، ابراز می‌دارند.



شکل ۱۵. مقایسه لاگ کلیپر و قطر چاه

۴. نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های سیال حفاری، چگالی سیال می‌باشد که عامل اصلی تعیین‌کننده مقدار فشار سیال در داخل چاه می‌باشد. مقدار بهینه چگالی سیال حفاری باید به گونه‌ای باشد که فشار سازندهای زیرزمینی کنترل شده و از ورود ناخواسته سیالات سازندی به چاه جلوگیری شود. از سوی دیگر انتخاب چگالی بالا برای سیال حفاری می‌تواند منجر به شکسته شدن سازندهای دیواره چاه گردد که مشکلات بعدی نظیر هرزروی سیال را در پی دارد؛ لذا انتخاب چگالی مناسب سیال حفاری با توجه به مفهوم پنجره چگالی گل به گونه‌ای صورت می‌گیرد که فشار داخل چاه از فشار سازندی بیشتر و از فشار شکست سازند کمتر باشد. از دیدگاه ژئومکانیکی و در حوزه‌های فعال، چگالی مناسب سیال حفاری باید به گونه‌ای باشد که در هر عمق، تنش مماسی و تنش شعاعی وارده بر دیواره چاه با هم برابر باشند. در این پژوهش، این نظریه در مورد یکی از چاه‌های نفت و گاز ایران مورد بررسی قرار گرفت.

با توجه به مطالعات انجام شده در زمینه تعیین چگالی بهینه سیال حفاری بر مبنای پایداری دیواره چاه نتایج زیر حاصل

[3] Gholilou, A., Behnoud far, P., Vialle, S., Madadi, M. (2017). Determination of safe mud window considering time-dependent variations of temperature and pore pressure: Analytical and numerical approaches, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9, 900-911. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.02.002>

[4] 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.11.002>.

[5] McLean, M. R., Addis, M. A. (1990). Wellbore stability. The effect of strength criteria on mud weight recommendations, *Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE 20405, 9-17. <https://doi.org/10.2118/20405-MS>

[6] Liz-Losada, Ramiro J., Alejano, Leandro R. (2000). New Safe Mud Weight Window Representations to Prevent Wellbore Instability, *Proceedings of the IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference*, APDT, ADC/SPE 62800, 493-504. <https://doi.org/10.2118/62800-MS>

[7] Chen, X., Tan, C. P., Haberfield, C. M. (2000). Case studies on application of novel guideline charts in planning well trajectory and mud weight program, *Society of Petroleum Engineers - International Oil and Gas Conference and Exhibition in China 2000*, IOGCEC 2000, SPE 64737. <https://doi.org/10.2118/64737-MS>

[8] Mohiuddin, M. A., Khan, K., Abduraheem, A., Al-Majed, A., Aurifullah, V. (2005). Field based criteria for the design of safe mud weight window, *society of Petroleum Engineers - SPE Technical Symposium of Saudi Arabia Section 2005*, TSSA 2005, SPE 106327, 1-6. <https://doi.org/10.2118/106327-MS>

[9] Maleki, Sh., Gholami, R., Rasouli, V., Moradzadeh, A., Riabi, R., Ghavami, Sadaghzadeh, Farhad. (2014). Comparison of different failure criteria in prediction of safe mud weigh window in drilling practice, *Earth-Science Reviews*, 136, 36-58. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.05.010>

[10] Das, B., Chatterjee, R. (2017). Wellbore stability analysis and prediction of minimum mud weight for few wells in Krishna-Godavari Basin, India, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 93, 30-37. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.12.018>

[11] Darvishpour, A., Cheraghi Seifabad, M., Wood David, A. (2019). Wellbore stability analysis to determine the safe mud weight window for sandstone layers. *Petroleum Exploration and Development*, 46, 5, 1031-1038. <https://doi.org/10.1016/S1876->

۶. فهرست نمادها

جدول ۱. فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
E_d	Gpa	ضریب یانگ دینامیک
ρ	$\frac{g}{cm^3}$	چگالی
V_s	$\frac{Km}{s}$	سرعت موج برشی
V_p	$\frac{Km}{s}$	سرعت موج کششی
v_d	-	نسبت پواسون دینامیک
E_s	Gpa	ضریب یانگ استاتیک
v_s	-	نسبت پواسون استاتیک
z	Ft	عمق
$\bar{\rho}$	$\frac{g}{cm^3}$	دانسیتته میانگین روباره
g	-	ثابت نیروی گرانش زمین
ϵ_x	-	کرنش در راستای طولی
ϵ_y	-	کرنش در راستای عرضی
σ_v	Mpa	تنش عمودی
α	-	ضریب بایوت
P_p	Mpa	فشار منفذی
σ_H	Mpa	تنش افقی بیشینه
σ_h	Mpa	تنش افقی کمینه
γ	Degree	زاویه شیب چاه
φ	Degree	آزیموت
σ_r	Mpa	تنش شعاعی
θ	Degree	زاویه چرخش در جهت عقربه های ساعت روی دیواره چاه از تنش افقی بیشینه
σ_θ	Mpa	تنش مماسی
σ_z	Mpa	تنش محوری

۷. مراجع

[1] Marshall, W., H., Brandt, L., K. (1978). Solids control in a drilling fluid. *Proceedings - SPE International Symposium on Formation Damage Control*, SPE 7011, 109-112. <https://doi.org/10.2118/7011-MS>

[2] Darley, H.C.H., George R., Gra. (1907-1983). *Composition and properties of drilling fluids and completion fluids: Fifth Edition*. Butterworth-Heinemann. TN871.2. G695 1988 622-338 87-31536,0-87201-147-X

- [21] Ghafoori, M., Rastegarnia, A., Lashkaripour, G. (2018). Estimation of static parameters based on dynamical and physical properties in limestone rocks. *Journal of African Earth Sciences* 137 (2018) 22-31. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.09.008>
- [22] Azadpour, M., Shad Manaman, N., (2015), Determination of Pore Pressure from Sonic Log: a Case Study on One of Iran Carbonate Reservoir Rocks. *Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology*, Vol. 4, No. 3, pp. 37-50 <https://doi.org/10.22050/ijogst.2015.10366>
- [23] Farsimadan, M., Dehghan, A. and Khodaei, M., 2020. Determining the domain of in situ stress around Marun Oil Field's failed wells, SW Iran. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 10(4), pp.1317-1326. <https://doi.org/10.1007/s13202-020-00835-2>
- [24] Kidambi, T., Suresh Kumar, G., (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, May 2016, 38-51. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.01.003>
- [25] Vo, U., Chang, C., (2020), Geomechanical characterization of sedimentary basins using tectonic stress and strain. *Geosciences Journal* volume 24, 669–678. <https://doi.org/10.1007/s12303-020-0006-8>
- [26] Li, Q., Aguilera, R., (2019), A correlation for estimating the biot coefficient. *SPE Drilling & Completion*, 1–13. <https://doi.org/10.2118/195359-PA>
- [27] Aadney, B., and Reza Looyeh, M., n.d. 2010, *Petroleum rock mechanics*.
- [28] Al-Ajmi, A.M., and R.W. Zimmerman. (2006). Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi–Coulomb failure criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(8): 1200-1211. doi:10.1016/j.ijrmms.2006.04.001.
- [29] Anderson, E.M., (1951), *The dynamics of faulting and dyke formation with applications to Britain.*: Hafner Pub. Co. [BA01728838](https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.09.008)
- [12] Rafieepour, S., Zamiran, S., Ostadhassan, Mehdi. (2020). A cost-effective chemo-thermo-poroelastic wellbore stability model for mud weight design during drilling through shale formations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12, 768-779. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.12.008>
- [13] Kadkhodaie, A. (2021). The impact of geomechanical units (GMUs) classification on reducing the uncertainty of wellbore stability analysis and safe mud window design, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 91, 103964, <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103964>.
- [14] Hoseinpour, M., Riahi, M.A. (2022). Determination of the mud weight window, optimum drilling trajectory, and wellbore stability using geomechanical parameters in one of the Iranian hydrocarbon reservoirs. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 12, 63–82. <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01399-5>
- [15] Beheshtian, S., Rajabi, M., Davoodi, SH., Wood, D., Ghorbani, H., Mohamadian, N., Ahmadi Alvar, M., S, Band, SH. (2022). Robust computational approach to determine the safe mud weight window using well-log data from a large gas reservoir, *Marine and Petroleum Geology*, Volume 142, 105772, ISSN 0264-8172. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105772>
- [16] Allawi, R.H., Al-Jawad, M.S. (2023). Wellbore stability analysis and selecting safe mud weight window for Mishrif reservoir in Southern Iraq. *Arabian Journal of Geosciences*, 16, 345. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11435-9>
- [17] Aadnoy, Bernt S. (2010). *Modern Well Design: 2nd Edition*. Petroleum Exploration and Development. 13:978-0-203-83613-2, 6000 Broken Sound park way, NW
- [18] Dashtian, H., Jafari, G., Koohi Lai, Z. Masihi, M., Sahimi, M., (2011). Analysis of Cross Correlations Between Well Logs of Hydrocarbon Reservoirs. *Transp Porous Med* (2011) 90: 445–464. DOI 10.1007/s11242-011-9794-x.
- [19] Najibi, A., Ghafoori, M., Lashkaripour, G. and Asef, M., (2015). Empirical relations between strength and dynamic elastic properties of Asmari and Sarvak limestones, two main oil reservoirs in Iran. *Journal of Petroleum Science and Engineering* Volume 126, February 2015, Pages 78-82. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.12.010>
- [20] Christaras, B., Auger, F. and Mosse, E., (1994). Determination of the moduli of elasticity of rocks. Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods. *Materials and Structures*, 27(4), pp.222-228. <https://doi.org/10.1007/BF02473036>