

## مدل ژئومکانیکی و مقایسه روش‌های مختلف محاسبه معیارهای شکست سنگ و فشار منفذی در یکی از میادین هیدروکربوری جنوب غرب ایران

حامد امرایی<sup>۱\*</sup>

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۱۰

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۱۴

### چکیده

مدل ژئومکانیکی یک بعدی، تفسیری کمی از وضعیت تنش‌های درجا و خواص فیزیکی و مکانیکی موجود در میادین هیدروکربوری می‌باشد. مدل مذکور بر اساس نمودارهای چاه‌پیمایی حاصل می‌شود که به کمک آن می‌توان به بررسی وضعیت پایداری دیواره چاه، تعیین پنجره ایمن گل، بهینه سازی برداشت، جلوگیری از مچالگی لوله جداری و ... پرداخت. مدل ژئومکانیکی پایه و اساس مطالعات ژئومکانیکی به ویژه در موضوع پایداری چاه است. لذا با توجه به اهمیت علم ژئومکانیک و پتروفیزیک مخزن در صنعت نفت و گاز، در این پژوهش به بررسی جامع آنالیز پایداری دیواره چاه با تکیه بر ترکیب مطالعات ژئومکانیکی - پتروفیزیکی از طریق ساخت مدل یک بعدی ژئومکانیکی چاه با رویکرد مقایسه انواع روش‌های مختلف محاسبه معیارهای شکست سنگ و پارامتر فشار منفذی پرداخته شده است. برای این منظور، ابتدا پارامترهای الاستیک و مقاومتی سازند مورد مطالعه به کمک نمودارهای چاه‌پیمایی و روابط توسعه داده شده از مطالعات آزمایشگاهی تعیین و سپس با توجه به اینکه تخمین فشار منفذی برای جلوگیری از مخاطرات ناشی از عملیات حفاری امری ضروری بوده و امروزه به دلیل هزینه بالای ابزارهای اندازه‌گیری مستقیم فشار منفذی، استفاده از روش‌های غیرمستقیم مقرون به صرفه تر است، فشار منفذی با دو روش تراکم‌پذیری یا آتشناری و ایتون برای مخزن مورد مطالعه تخمین زده شد. مقایسه نتایج این دو روش با داده‌های آزمون RFT نشان داد که روش تراکم‌پذیری از دقت بالاتری نسبت به روش ایتون برخوردار است. در ادامه با تخمین تنش‌های برجا و القایی در چاه مورد مطالعه، حد پایین و بالای وزن ایمن گل با معیارهای موهر-کلمب، هوک-براون و موگی-کلمب محاسبه گردید. مقایسه نتایج این سه روش نشان داد که معیار موهر-کلمب از دقت بالاتری برخوردار است و علاوه بر این نسبت به روش‌های هوک-براون و موگی-کلمب محافظه کارانه‌تر عمل می‌کند. برای صحت سنجی و تایید پنجره تعیین شده از تطابق وضعیت پیشبینی شده ناپایداری چاه مورد مطالعه با وضعیت واقعی آن بر مبنای نمودارهای چاه‌نگاری به ویژه قطرسنجی استفاده گردید. رژیم گسلش در چاه مورد مطالعه، با توجه به مقادیر تنش‌های افقی و عمودی از نوع امتداد لغز می‌باشد.

کلمات کلیدی: مدل ژئومکانیکی، فشار منفذی، معیار موهر-کلمب، معیار هوک-براون، معیار موگی-کلمب.

## ۱. مقدمه

مطالعات ژئومکانیکی میادین با هدف تحلیل پایداری چاه و برنامه ریزی برای آن از فاز اکتشاف تا توسعه میادین حائز اهمیت فراوان است. با ساخت چنین مدل‌هایی می‌توان به بررسی و حل مشکلاتی نظیر؛ تولید ماسه، جلوگیری از آسیب دیدگی لوله جداری چاه، بازفعالی گسل‌ها، فشردگی مخزن و ... پرداخت (Fischer and Henk, 2013). چنین موارد و مشکلاتی موجب هزینه‌های گزافی به صنعت نفت شده که با علم ژئومکانیک نفت قابل مدیریت می‌باشند (Herwanger, 2014). ساخت مدل ژئومکانیکی در تمام طول عمر یک مخزن می‌تواند ضمن تولید بهینه از میدان از اعمال هزینه‌های گزاف جلوگیری نماید. آگاهی جامع از وضعیت تنش پیش از تولید و تغییرات آن با زمان، نقش مهمی در انجام ایمن و اقتصادی تولید هیدروکربور از مخازن و ذخیره‌سازی زیرزمینی آن ایفا می‌نماید (Zoback et al., 1985). تنش‌های زیرسطحی از جنبه‌های مختلفی منجمله؛ پایداری دیواره چاه، یکپارچگی پوش سنگ، تغییرات خواص سنگ در نتیجه تنش‌های القایی، عملیات‌های مهندسی در صنعت بالادستی را تحت شعاع خود قرار می‌دهد. از این‌رو، تعیین مقدار و جهت تنش‌های برجای اصلی تحت فرآیند مدلسازی ژئومکانیکی یک بعدی چاه، پیش از حفاری و پایش تغییرات آن در حین و یا بعد از این عملیات بسیار حیاتی است. مدل ژئومکانیکی پایه و اساس سایر مطالعات ژئومکانیکی به ویژه موضوع پایداری چاه است. برای ساخت مدل ژئومکانیکی به طور معمول از نمودارهای چاه‌پیمایی استفاده می‌شود و مدل با استفاده از مغزه و آزمایشات درون چاهی کالیبره می‌گردد. مطالعات مختلفی در زمینه ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی صورت گرفته است. سیدسجادی و عقیقی (۱۳۹۴) به ساخت و تحلیل مدل ژئومکانیکی و تعیین پنجره ایمن گل حفاری در مخزن بنگستان در میدان کوپال پرداختند. خامه‌چی و عباسی (۱۴۰۱) به ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی چاه با هدف بررسی ایجاد شکاف هیدرولیکی در یکی از چاه‌های میدان سراجیه پرداختند. صارم و ابراهیم‌آبادی (۱۴۰۱) به ساخت مدل

ژئومکانیکی برای مخزن آسماری میدان شادگان با هدف تعیین پنجره ایمن گل حفاری و معرفی راستای بهینه حفاری پرداختند. سعادت‌نیا و همکاران (۱۴۰۱) به مدل‌سازی ژئومکانیکی و بررسی یکپارچگی پوش سنگ برای یکی از میادین بزرگ کربناته جنوب غرب ایران پرداختند. قالیباف-محمدآبادی و همکاران (۱۴۰۱) به تخمین پارامترهای ژئومکانیکی و تجزیه و تحلیل تنش‌های برجا و تعیین پنجره وزن بهینه گل با استفاده از روش‌های مرسوم و الگوریتم‌های هوشمند پرداختند. جهان‌محمدی و همکاران (۱۴۰۲) به تعیین پنجره ایمن گل حفاری و مسیر بهینه حفاری سازند گداوان با استفاده از معیارهای شکست سنگ موهر-کولمب و موگی-کولمب در یکی از میادین جنوب غرب ایران پرداختند. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش معیار موهر-کولمب به نسبت معیار موگی-کولمب تخمین بهتر و دقیق‌تری در مورد فشار ریزش ارائه می‌دهد. محی‌الدین و همکاران جهت بررسی و تحلیل پایداری دیواره چاه و تعیین پنجره ایمن گل حفاری به ساخت مدل ژئومکانیکی پرداختند (Mohiuddin et al., 2001). ابعلی اوغلو و همکاران جهت پیشبینی ناپایداری-های دیواره چاه از مدل ژئومکانیکی در سازند کلوش بهره گرفتند (Abalioglu et al., 2011). عظیم و همکاران در پژوهشی از مدل‌های ژئومکانیکی مبتنی بر روابط پوروالاستیک خطی و ناهمسانگرد جهت شبیه سازی رفتار سازند زبیر برای درک ناپایداری دیواره چاه استفاده نمودند (Azim et al., 2011). منصورزاده و همکاران از مدلی ژئومکانیکی جهت پیشبینی و مطالعه پایداری چاه و فشار ریزش متقارن در چاه‌های انحرافی و عمودی به کمک معیارهای شکست پرداختند (Mansourizadeh et al., 2016). رامجان و همکاران به ساخت یک مدل ژئومکانیکی برای تجزیه و تحلیل پایداری چاه پرداختند (Ramjohn et al., 2018). کولاوله و همکاران مدلی ژئومکانیکی برای پیشبینی و تعیین ناپایداری دیواره چاه به کمک نمودارهای چاه‌پیمایی در میدانی واقع در بخش شرقی حوضه پانونین مجارستان استفاده

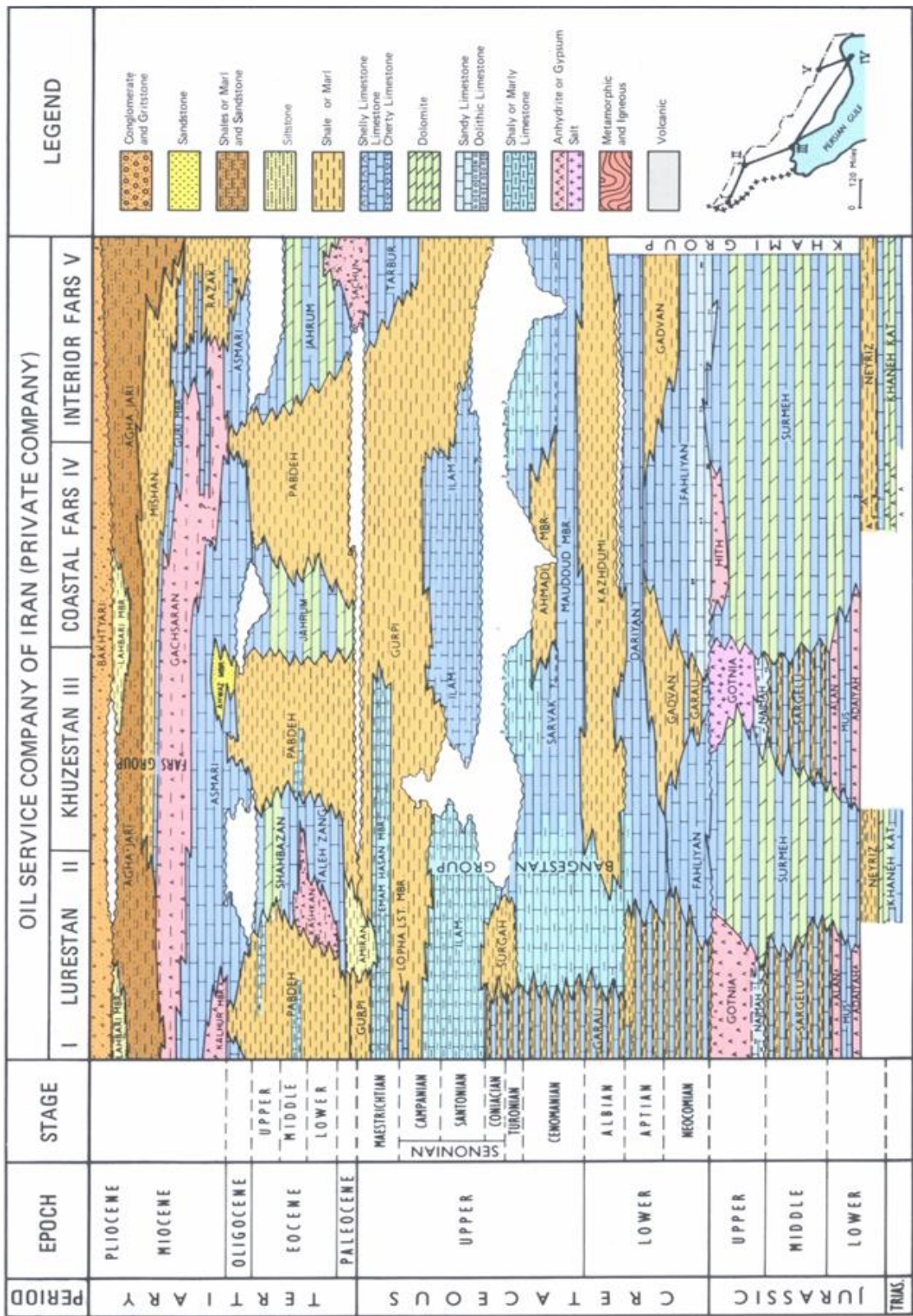
همکاران به توسعه یک مدل ژئومکانیکی یک بعدی در یک میدان نفتی در جنوب غربی ایران پرداختند، در این پژوهش مقدار و جهت تنش‌های برجا به کمک نمودارهای چاه مذکور تعیین گردیدند (Ammarloo et al., 2025). لذا با توجه به اهمیت علم ژئومکانیک و پتروفیزیک مخزن در صنعت نفت و گاز، در این پژوهش به بررسی جامع آنالیز پایداری دیواره چاه با تکیه بر ترکیب مطالعات ژئومکانیکی- پتروفیزیکی از طریق ساخت مدل یک بعدی ژئومکانیکی چاه با رویکرد مقایسه انواع روش‌های مختلف محاسبه معیارهای شکست سنگ و ارائه فلوچارتی از روش‌های مختلف غیرمستقیم برای محاسبه فشار منفذی با تکیه بر نمودارهای چاه‌پیمایی ارائه گردید.

اغلب به صورت امتدادلغز تا نرمال گزارش شده است. چینه-شناسی و تغییرات رخساره‌ای سازندهای جنوب غرب ایران در شکل ۱ نشان داده شده است. در ناحیه خوزستان که میدان مورد پژوهش در آن واقع شده، مقدار فاصله زمانی که رسوبات نهشته نشده‌اند بیشتر از مناطق دیگر است، بطوری که در بیشترین حالت خود به ۲۰ میلیون سال (از تورونین تا مائسترشتین) می‌رسد. این زمان طولانی می‌تواند تاثیر بسزایی بر کیفیت سنگ مخزن در جهت مثبت و یا منفی بگذارد.

نمودند (Kolawole et al., 2018). ال‌کامیل و همکاران به بررسی پایداری دیواره چاه و مقایسه معیارهای شکست موهر کلمب، لید اصلاح شده و موگی کلمب با یکدیگر پرداختند (Ikamil et al., 2018). عزتی و همکاران به تحلیل پایداری چاه با استفاده از مدل‌سازی ژئومکانیکی پرداختند. در این مطالعه، یک تحلیل ژئومکانیکی یک بعدی برای مخزن کربناته سروک در سه حلقه چاه یکی از میادین نفتی در دشت آبادان در جنوب غربی ایران با محاسبه پارامترهای الاستیک، مقاومتی، فشار منفذی و تعیین پنجره ایمن گل حفاری انجام شد (Ezati et al., 2020). الماسی و محسنی‌پور به تعیین پنجره گل و پایداری دیواره چاه با روش‌های تحلیلی و عددی پرداختند (Almasi and Mohsenipour, 2022). عمارلو و

## ۲. جایگاه زمین‌شناسی منطقه

میدان نفتی مورد مطالعه در بخش شمالی ناحیه دشت آبادان با روند ساختاری WNW-ESE در جنوب غرب ایران واقع شده است. دشت آبادان زونی ساختمانی است که در انتهای جنوب غرب ایران قرار گرفته است. این میدان دارای ساختمانی کم و بیش متقارن بوده که از نظر ابعاد دارای حدود ۶۵ کیلومتر طول و ۵ کیلومتر عرض است. این میدان دارای چهار مخزن آسماری، ایلام، سروک و خامی است (James and Wynd, 1965). در میدان مذکور، رژیم تنش آن است که



شکل ۱. چینه‌شناسی سازندها در میدان‌های جنوب غرب ایران (اقتباس از گزارش زمین‌شناسی چاه مورد مطالعه).

### ۳. مواد و روش‌ها

پژوهش مورد نظر بر روی مخزن آسماری به عنوان اصلی-ترین تولید کننده هیدروکربور میدان مذکور انجام گردیده است (Motiei, 1993). برای انجام پژوهش حاضر از مجموعه داده‌های کامل نمودارهای چاه‌پیمایی معمول چاه A میدان مورد مطالعه و اطلاعات مربوط به آزمون فشار منفذی RFT در ۱۶ نقطه که برای صحت‌سنجی فشارهای منفذی تخمین زده شده استفاده گردید (جدول ۱). برای این منظور در مخزن مورد مطالعه، ابتدا پارامترهای الاستیک و مقاومتی سازند به کمک نمودارهای چاه‌پیمایی و روابط توسعه داده شده از

مطالعات آزمایشگاهی تعیین و سپس با توجه به هزینه بالای ابزارهای اندازه‌گیری مستقیم فشار منفذی، از روش‌های غیرمستقیم فشار منفذی با دو روش تراکم‌پذیری یا آتشیاری و ایتون برای مخزن مورد مطالعه تخمین زده شد. در ادامه با تخمین تنش‌های برجا و القایی در چاه مورد مطالعه، حد پایین و بالای وزن ایمن گل با معیارهای موهر-کلمب، هوک-براون و موگی-کلمب محاسبه گردید.

جدول ۱. ارزیابی کامل نگاره‌های چاه مورد مطالعه

Available Well Logs	Statistical Parameters	Well A
Depth (m)	Minimum	2568
	Maximum	2843
Drill Bit Diameter (in)	-	8.5
Caliper (in)	Minimum	8.2
	Mean	10.16
	Maximum	23.9
Gamma Ray (GAPI)	Minimum	1.8
	Mean	18.8
	Maximum	79.1
Porosity (%)	Minimum	0.001
	Mean	0.048
	Maximum	0.18
Density (g/cc)	Minimum	2.19
	Mean	2.50
	Maximum	2.78
Pressure Wave Slowness (us/ft)	Minimum	50.91
	Mean	71.11
	Maximum	99.60

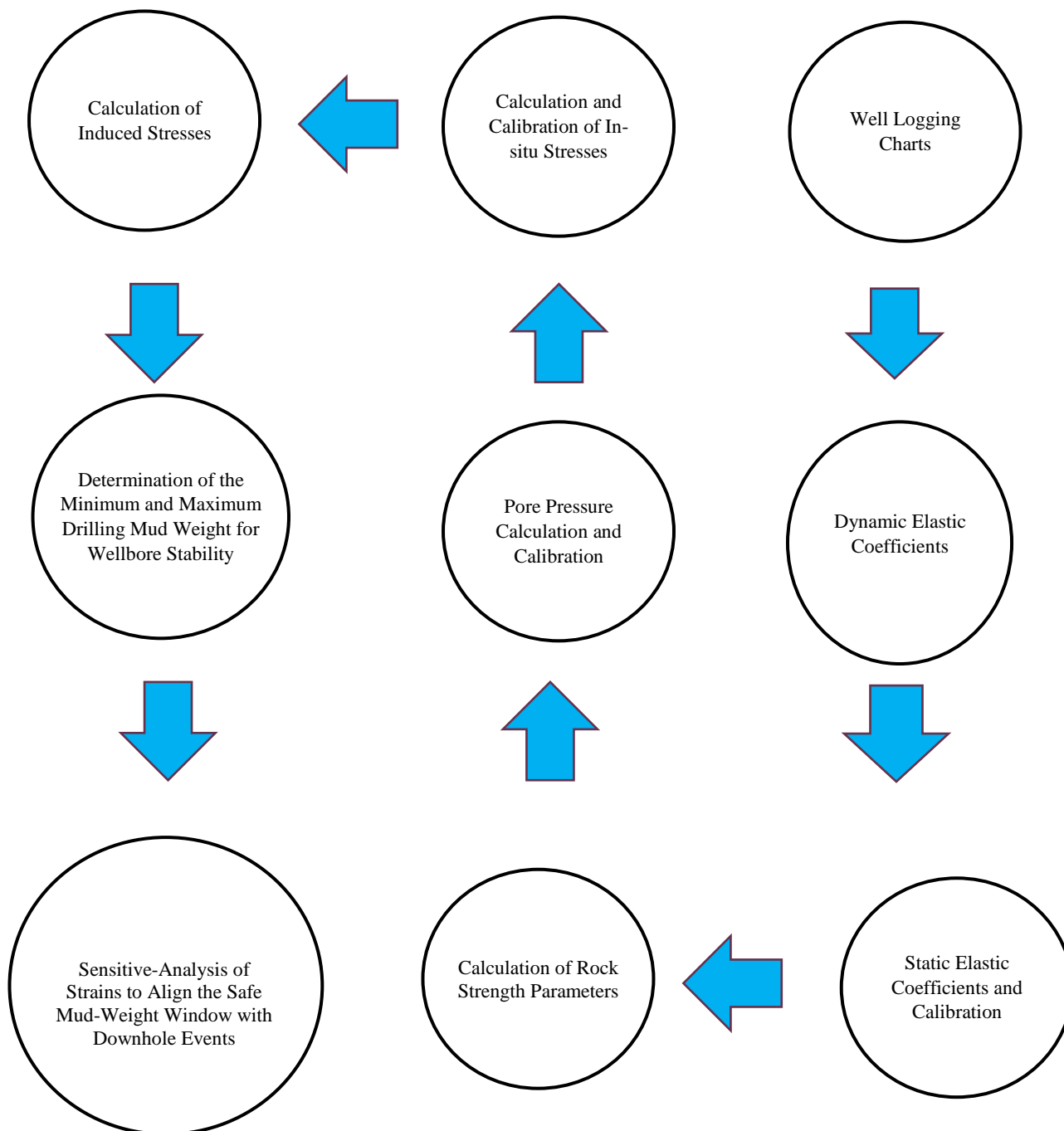
### ۴. بحث و نتایج

ژئومکانیکی یک بعدی چاه نشان داده شده است. در این فرآیند، ابتدا، پارامترهای الاستیک به کمک نمودارهای چاه-پیمایی محاسبه و سپس پارامترهای مقاومتی سنگ نظیر؛ مقاومت فشاری تک محوری، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت کششی براساس روابط توسعه داده شده از مطالعات

ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی چاه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است، چرا که براساس آن می‌توان در زمینه پایدارسازی دیواره چاه تحت چگالی مشخصی از سیال حفاری، با در نظر گرفتن شرایط ژئومکانیکی محدوده مورد بررسی، تصمیم‌گیری نمود. در شکل ۲ نحوه انجام مدل‌سازی

استفاده از معیار شکست سنگ به دست خواهد آمد. با تنظیم مقادیر کرنش در جهت‌های افقی می‌توان پنجره ایمن گل را با رویدادهای درون چاهی منطبق نمود.

آزمایشگاهی تعیین می‌شوند. در ادامه فشار منفذی و تنش‌های برجا تخمین زده شده و با استفاده از آزمایشات درون چاهی کالیبره خواهند شد. در نهایت نیز براساس تنش‌های القایی ایجاد شده در حین عملیات حفاری، پنجره ایمن وزن گل با



شکل ۲. فلوچارت فرایند مدل‌سازی ژئومکانیکی یک بعدی چاه برای تعیین پنجره ایمن وزن گل.

محاسبه و تخمین ضرایب الاستیک و مقاومت سنگی را می‌توان مبنای مطالعات ژئومکانیک مخازن دانست (Al-Qahtani

۴-۱. محاسبه پارامترهای الاستیک و مقاومتی سنگ

نظیر؛ سرعت موج فشاری، سیال منفذی و غیره تأثیر می‌پذیرد، می‌تواند بیانگر خصوصیات فیزیکی سنگ نیز باشد. از این رو، سرعت موج برشی در تعیین نوع لیتولوژی سازند، سیال منفذی و تعیین پارامترهای ژئومکانیکی سازند نظیر مدول برشی، مدول حجمی و غیره کاربرد دارد. برای محاسبه پارامترهای مذکور در چاه مورد مطالعه از روابط موجود در جدول ۲ استفاده گردید (Al-Qahtani and Zillur., 2001).

(and Zillur., 2001). چرا که با دانستن آن‌ها می‌توان به برخی از پارامترهای متغیر در مخزن نظیر؛ فشار پی برد. نمودار سرعت موج برشی (DTS) و سرعت موج فشاری (DTC) از پارامترهای اساسی در محاسبات مخازن هیدروکربوری هستند که با ترکیب این دو نمودار با نمودار چگالی (RHOB) می‌توان ثابت‌های الاستیک سنگ مخزن را محاسبه نمود. از آن جایی که سرعت موج برشی از پارامترهای مختلف سنگ

جدول ۲. روابط مربوط به محاسبه پارامترهای الاستیک در چاه مورد مطالعه (Al-Qahtani and Zillur., 2001)

Equation 1	Poisson's modulus	$v_d = \frac{(V_p^2 - 2V_s^2)}{2(V_p^2 - V_s^2)}$
Equation 2	Dynamic Young's modulus	$E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2}$
Equation 3	Shear modulus	$G = \rho_b * V_s^2$
Equation 4	Bulk modulus	$K_d = \frac{E_{dyn}}{3(1 - 2\nu)}$
Equation 5	Static Young's modulus	$E_s = 0.7 * E_d$
Equation 6	Poisson's ratio	$\nu_s = \nu_d$
Equation 7	Static shear modulus	$G_s = \frac{E_s}{2(1 + \nu)}$
Equation 8	Static bulk modulus	$K_s = \frac{E_s}{3(1 - 2\nu)}$

ضریب یانگ استاتیک برقرار نمود. در این پژوهش برای محاسبه این پارامتر از رابطه ۴ استفاده شد. که در آن UCS مقاومت فشاری تک محوری، Esta مدول یانگ استاتیک و  $\phi_e$  تخلخل موثر مخزن می‌باشد. مقاومت کششی سنگ (Tensile Strength) بر طبق نوع سازند  $\frac{UCS}{10}$  است. در ادامه جهت محاسبه زاویه اصطکاک داخلی سنگ ( $\Phi$ ) از رابطه پلامب (Plumb) استفاده گردید که تخلخل حاصل از نمودار نوترون (NPHI) و حجم شیل متغیرهای این معادله‌اند (Gholami et al., 2015).

در روابط مذکور  $E_d$  مدول یانگ دینامیک،  $\rho$  چگالی،  $V_s$  سرعت موج برشی،  $V_p$  سرعت موج فشاری،  $\nu$  ضریب پواسون،  $G$  ضریب برشی و  $K$  ضریب حجمی است.

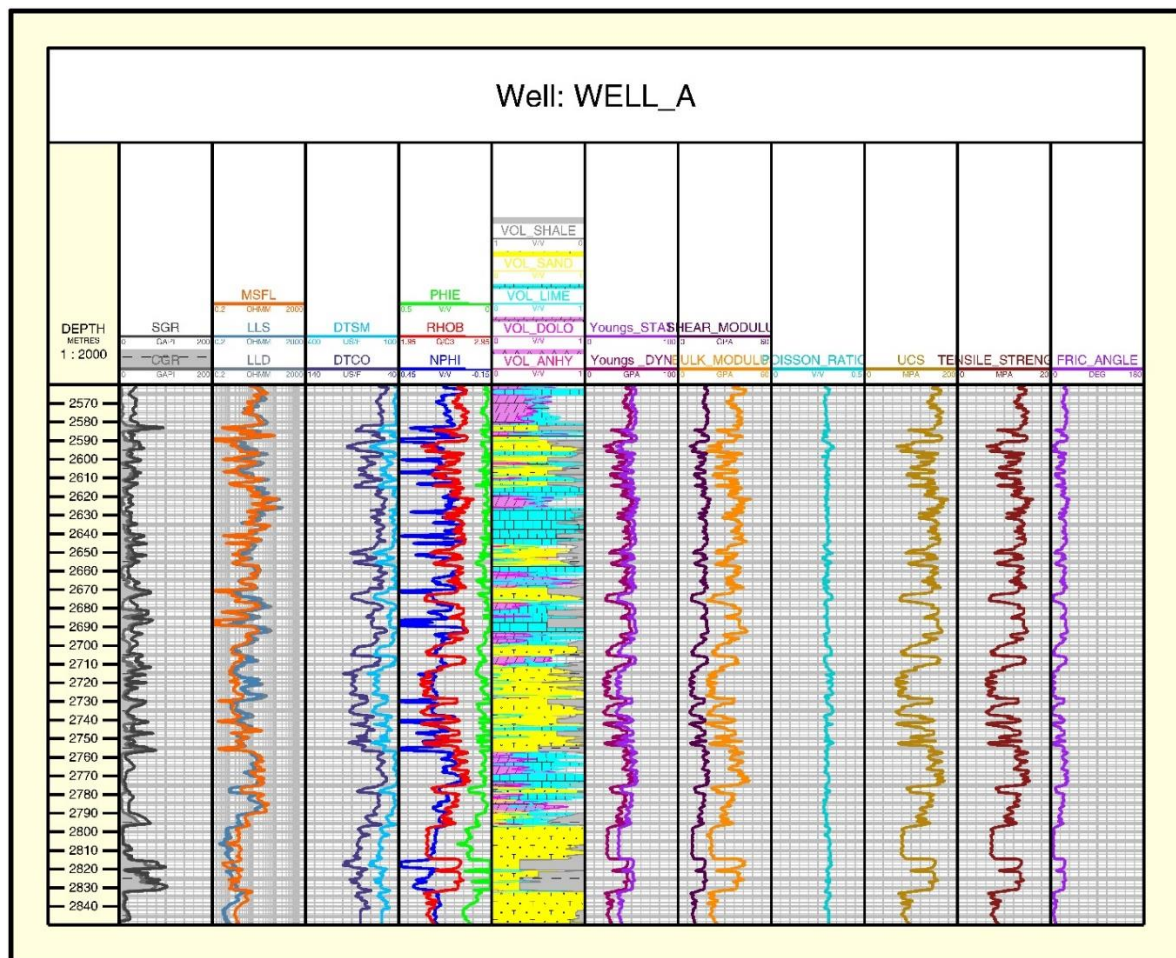
مقاومت فشاری تک محوری (UCS)، مقاومت کششی (T) و زاویه اصطکاک داخلی سنگ ( $\Phi$ ) پارامترهای مقاومتی سنگ‌اند که باید مورد محاسبه قرار گیرند. برای به دست آوردن نمودار پیوسته‌ای از مقاومت فشاری تک‌محوری باید از رابطه‌ی تجربی حاصل از آزمایشگاه استفاده کرد. این رابطه را می‌توان از رسم منحنی مربوط به مقادیر UCS در مقابل تخلخل یا

جدول ۳. روابط مربوط به محاسبه پارامترهای مقاومتی در چاه مورد مطالعه (Gholami et al., 2015)

Equation 9	Uniaxial compressive strength (UCS)	$UCS = 2.65 \times (E_{sta}^{0.8} / \varphi_e^{0.2})$
Equation 10	Internal friction angle of the rock	$\phi = 26.5 - 37.4(1 - NPHI - V_{shale}) + 62.1(1 - NPHI - V_{shale})^2$
Equation 11	Shale volume	$V_{shale} = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}}$

سرعت موج برشی و فشاری، ستون پنجم نمودارهای تخلخل موثر و نوترون و چگالی، ستون ششم لیتولوژی، ستون هفتم مدول یانگ، ستون هشتم مدول بالک و برشی، ستون نهم نسبت پواسون، ستون دهم مقاومت فشاری تک محوری، ستون یازدهم مقاومت کششی، و ستون دوازدهم نشان دهنده زاویه اصطکاک داخلی محاسبه شده می‌باشد.

در نهایت به کمک روابط فوق‌الذکر پارامترهای الاستیک و مقاومتی چاه مورد مطالعه مطابق شکل ۳ محاسبه شد. در شکل مذکور بترتیب از چپ به راست ستون اول عمق حفاری را نشان داده، ستون دوم مربوط به نمودارهای گاما، ستون سوم نمودارهای مقاومت ویژه، ستون چهارم نمودارهای



شکل ۳. محاسبه پارامترهای الاستیک و مقاومتی سازند مورد مطالعه. ستون‌ها به ترتیب از چپ به راست: عمق حفاری، نمودارهای گاما، نمودارهای مقاومت ویژه، نمودارهای سرعت موج برشی و فشاری، نمودارهای تخلخل موثر و نوترون و چگالی، لیتولوژی، مدول یانگ، مدول بالک و برشی، نسبت پواسون، مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، زاویه اصطکاک داخلی.

## ۲-۴. تخمین فشار منفذی

که در آن فشار منفذی تخمین زده شده،  $P_{ob}$  فشار روباره،  $P_{hyd}$  فشار هیدرواستاتیکی در عمق مورد نظر و  $k$  ثابت ایتون است. همچنین،  $NCT$  سرعت نرمال در زون شیلی با فشردگی نرمال و  $V_p$  سرعت موج فشاری در عمق مورد نظر است. در شکل ۴ (ستون چهارم از سمت چپ) مقدار فشار منفذی تخمینی با روش ایتون در چاه مورد مطالعه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود مقدار فشار منفذی تخمینی در اکثر محدوده های عمقی نسبت به مقدار اندازه گیری شده به روش آزمایش مکرر سازند (RFT) بیشتر است.

### ۲-۴-۲. روش تراکم پذیری یا آتشیاری

رابطه (۱۳) برای محاسبه فشار منفذی براساس روش تراکم-پذیری با استفاده از پارامترهای تنش موثر ( $\sigma_{eff}$ )، حجم تراکم پذیری ( $C_b$ )، تراکم پذیری منافذ ( $C_p$ )، تخلخل سنگ ( $\phi$ ) و ثابت تجربی ( $\gamma$ ) را نشان می دهد (Atashbari and Tingay, 2012). عامل کلیدی در دقت روش تراکم پذیری چگونگی تعیین ضریب مربوط به تراکم پذیری منافذ ( $C_p$ ) است. برای تعیین این پارامتر معمولاً از نتایج آزمایشگاهی استفاده می شود و مقدار آن وابستگی شدیدی به مقادیر تخلخل سنگ دارد و آن را می توان با دقت خوبی از تخلخل سنگ با رابطه (۱۴) برآورد نمود.

$$P_p = \left( \frac{(1-\phi)C_b\sigma_{eff}}{(1-\phi)C_b - \phi C_p} \right)^\gamma \quad (13)$$

$$C_{plimestone} = \left( \frac{1}{1.022^{-2} + 1.681^{-2}\phi^{1.05}} \right) \times 10^{-6} \quad (14)$$

$$C_b = \left( \frac{1}{0.367 + 0.099 \ln(\phi)} \right) \times 10^{-6} \quad (15)$$

در شکل ۴ (ستون سوم از سمت چپ) فشار منفذی تخمینی با روش تراکم پذیری برای چاه مورد مطالعه نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود در نقاطی که فشار منفذی اندازه گیری شده است منحنی مقادیر تخمینی

در فضای متخلخل، قسمتی از فشار لایه های روباره توسط سیال منفذی تحمل می شود و سیال متناسب با آن بار، فشاری را به دیواره منفذ وارد می کند که به آن فشار منفذی گفته می شود. آگاهی از میزان فشار منفذی برای پروژه های اکتشافی و حفاری به منظور تعیین وزن گل برای پیشگیری از ناپایداری دیواره چاه، فوران، هرزروی گل حفاری، تولید شن و ماسه و خسارت وارد شده به مخزن امری ضروری و اجتناب ناپذیر است. به طور کلی دو روش مستقیم و غیر مستقیم برای تعیین مقدار فشار منفذی وجود دارد؛ روش های مستقیم به روش هایمانند آزمایش های اندازه گیری فشار درون چاهی اطلاق می شود که فشار منفذی را به صورت مستقیم با استفاده از یک سری ابزارها اندازه گیری می کنند (Ammarloo et al., 2025). با توجه به اینکه تخمین فشار منفذی برای جلوگیری از مخاطرات ناشی از عملیات حفاری امری ضروری بوده و امروزه به دلیل هزینه بالای ابزارهای اندازه گیری مستقیم فشار منفذی، استفاده از روش های غیرمستقیم متکی به نمودارهای چاه پیمایی مقرون به صرفه تر است. در چاه مورد مطالعه فشار منفذی به طور مستقیم اندازه گیری شده است، لذا از روش های تجربی نیز برای تخمین فشار منفذی با هدف مقایسه روش های مختلف و در نهایت معرفی دقیق ترین روش استفاده شد. از میان این روش ها، از روش های ایتون (Eaton, 1976, 1969) و تراکم پذیری (Atashbari and Tingay, 2012) برای تخمین فشار منفذی بهره برده شد.

### ۲-۴-۱. روش ایتون

روش ایتون معمول ترین و رایج ترین روش غیرمستقیم پیشینی فشار منفذی است. تحقیقات ایتون منجر به ارائه مجموعه روابطی جهت تخمین فشار منفذی سازند به کمک نمودارهای چاه پیمایی شد (Eaton, 1976, 1969). ایتون (۱۹۶۹) رابطه را بین سرعت و فشار منفذی توسعه داد و در سال (۱۹۷۶) آن را به صورت رابطه (۱۲) اصلاح نمود.

$$P_p = P_{ob} - (P_{ob} - P_{hyd}) \times \left( \frac{V_p}{NCT} \right)^k \quad (12)$$

تخمینی برای محدوده عمقی مورد مطالعه نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشهود است، رژیم تنش در ناحیه مورد بررسی امتداد لغز بوده که با نقشه تنش و گزارشات زمین شناسی این میدان مطابقت دارد.

$$\sigma_v = P_0 + \int_0^z \rho(z) dz \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$\sigma_v = 0.433[(1 - \phi)\rho_{ma} + \rho_f\phi] \times z \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1 - \nu}(\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E_{sta}}{1 - \nu^2}(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1 - \nu}(\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E_{sta}}{1 - \nu^2}(\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

#### ۴-۳-۲. تنش‌های القایی

در زمان حفر چاه، میزان باری به سنگ‌های اطراف چاه اعمال می‌شود. این امر باعث تمرکز تنش در اطراف چاه می‌گردد. که این تمرکز تنش در نهایت موجب ناپایداری چاه و به دنبال آن هزینه‌های گزافی است. تمرکز تنش در نواحی اطراف چاه با مولفه‌های تنش مماسی ( $\sigma_\theta$ )، شعاعی ( $\sigma_r$ ) و محوری ( $\sigma_z$ ) مشخص می‌شوند. برای سنگ‌های الاستیک همسانگرد و ایزوتروپیک، تنش‌های القایی اطراف چاه به وسیله روابط ۲۰ تا ۲۲ محاسبه می‌گردد.

$$\sigma_r = \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \left(1 - 4\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta + \frac{a^2}{r^2} P_w \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

با روش تراکم‌پذیری به خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده همخوانی دارد. از طرفی مشاهده می‌شود که منحنی حاصل از روش ایتون نوسانات زیادی در محدوده مورد مطالعه از این چاه نشان می‌دهد که در مقایسه با روند تغییرات مقادیر اندازه‌گیری شده، که خطی به نظر می‌رسد، غیرمنطقی جلوه می‌کند.

#### ۴-۳-۳. تخمین تنش‌ها

برآورد دقیق توزیع تنش‌های برجا در کنار آگاهی از خواص مکانیکی سنگ لازمه دستیابی به بهترین موقعیت حفر چاه به منظور بهبود پایداری دیواره چاه است (Radwan et al., 2021). از آنجایی که با حفاری، تعادل تنش‌های اطراف ناحیه عملیاتی نامتعادل شده و موجب ایجاد ناپایداری در دیواره چاه می‌شود. نیاز است تنش‌های برجای ناحیه مورد حفر قبل از عملیات حفاری و تنش‌های القایی در حین حفاری برآورد شوند. در ادامه به تخمین هر یک از این تنش‌ها پرداخته خواهد شد.

#### ۴-۳-۱. تنش‌های برجا

تنش‌های برجا دارای سه مولفه اصلی؛ تنش قائم ( $\sigma_v$ )، تنش افقی کمینه ( $\sigma_h$ ) و تنش افقی بیشینه ( $\sigma_H$ ) می‌باشند (Ammarloo et al., 2025). از میان این سه مولفه، تنش قائم را می‌توان با داشتن چگالی ( $\rho$ ) سنگ‌های روباره برای هر نقطه عمقی با استفاده از رابطه (۱۶) محاسبه نمود. چگالی برای بازه مخزنی را می‌توان از نمودار چگالی تعیین نمود اما برای بازه‌های ابتدایی مخزن غالباً نمودار مذکور برداشت نمی‌شود. لذا، روش‌های متعددی برای تخمین چگالی و یا تنش روباره توسط محققین ارائه گردیده که در این پژوهش از رابطه (۱۷) برای تخمین تنش قائم با کمک پارامترهای تخلخل ( $\phi$ )، چگالی ماتریکس ( $\rho_{ma}$ )، عمق ( $z$ ) و چگالی سیال منفذی ( $\rho_f$ ) استفاده گردید. در چاه مورد مطالعه مقادیر تنش افقی کمینه ( $\sigma_h$ ) و بیشینه ( $\sigma_H$ ) به ترتیب با روابط (۱۸) و (۱۹) محاسبه شد. در شکل (۴) تنش‌های اصلی

معیار شکست برشی موهر کلمب به وفور در عملیات‌های مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این معیار، شکست در صفحه‌ای رخ می‌دهد که در آن تنش نرمال ( $\sigma_n$ ) و تنش برشی ( $\tau$ ) از رابطه ذیل پیروی کنند.

$$\tau = c + \mu\sigma_n \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

در این رابطه  $\mu$  ضریب اصطکاک داخلی و  $c$  چسبندگی است.

نسخه خطی معیار موهر-کلمب در فضای تنش‌های اصلی به صورت رابطه (۲۴) می‌باشد. همانطور که در این رابطه مشخص است، تنش اصلی متوسط تأثیری در شکست برشی سنگ ندارد.

$$\sigma_1 = \sigma_c + N\sigma_3 \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

در این رابطه؛  $\sigma_c$  مقاومت تک محوری سنگ،  $\sigma_1$  تنش اصلی بیشینه و  $\sigma_3$  تنش اصلی کمینه می‌باشد. مقادیر تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه براساس رژیم تنش منطقه یا محدوده عمقی مورد بررسی تعیین می‌شود. با مشخص بودن زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ )، پارامتر  $N$  در این رابطه را نیز می‌توان با رابطه (۲۵) محاسبه نمود.

$$N = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

به منظور بررسی حداقل فشار گل، که منجر به ایجاد ریزش در راستای تنش اصلی افقی کمینه می‌شود، مقادیر کمینه و بیشینه تنش‌های القایی در این راستا تعیین می‌گردند و براساس جایگذاری آن در رابطه (۲۴) می‌توان به جدول (۴) دست یافت. بنابراین با توجه به وضعیت تنش‌های القایی برای تعیین حداقل وزن گل ( $P_{W(BO)}$ ) در هر نقطه عمقی براساس معیار موهر-کلمب از یکی از این روابط اشاره شده در جدول استفاده خواهد شد.

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_h + \sigma_H) \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - \frac{a^2}{r^2} P_w \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

$$\sigma_z = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \frac{a^2}{r^2} \cos 2\theta \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

روابط بالا برای محاسبه تنش‌های القایی در نقطه‌ای به فاصله  $r$  از مرکز چاهی با شعاع  $a$  است که با فشار سیال درون آن برابر  $P_w$  است. زاویه  $\theta$  برای تعیین موقعیت نقطه در مختصات قطبی نسبت به جهت  $\sigma_H$  به صورت ساعتگرد می‌باشد. با توجه به این که در ناپایداری دیواره چاه مقادیر بحرانی این تنش‌های القایی اهمیت دارند بنابراین مقادیر کمینه و بیشینه هر یک از این تنش‌های القایی در اطراف دیواره چاه تعیین می‌شود.

#### ۴-۴. ارزیابی پایداری چاه و تعیین پنجره ایمن وزن گل

برای تعیین پنجره ایمن وزن گل نیاز است از معیارهای شکست سنگ استفاده شود. به عبارتی در این بخش براساس مقادیر بحرانی تنش‌های القایی محاسبه شده، بررسی می‌شود که با فشار مفروض برای سیال درون چاهی آیا ریزش یا شکست کششی در چاه رخ می‌دهد. سپس نتایج این بخش با مشاهدات درون چاهی (نمودارهای تصویری یا کالیپر و همچنین هرزروی سیال چاه) مقایسه می‌شود (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006). برای این منظور در این مطالعه از دو معیار موهر-کلمب و هوک-براون استفاده شد که در ادامه به تشریح هر یک از این معیارها برای یک چاه قائم پرداخته خواهد شد.

جدول ۴. روابط تعیین مقدار وزن گل کمینه برای حفظ پایداری دیواره چاه براساس معیار موهر-کلمب (Al-Ajmi and

(Zimmerman, 2006)

Minimum required mud pressure	Different states of induced stresses
$P_{W(BO)} = \frac{E - \sigma_c}{N}$	$\sigma_r \leq \sigma_\theta \leq \sigma_z$
$P_{W(BO)} = \frac{D - \sigma_c}{1 + N}$	$\sigma_r \leq \sigma_z \leq \sigma_\theta$
$P_{W(BO)} = D - \sigma_c - NE$	$\sigma_z \leq \sigma_r \leq \sigma_\theta$
$D = 3\sigma_H - \sigma_h, E = \sigma_V + 2\nu(\sigma_H - \sigma_h), N = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)$	

در رابطه (۲۴) جایگذاری می‌شوند. براین اساس روابط ارائه شده در جدول (۵) بدست خواهد آمد. با توجه به وضعیت تنش‌های القایی برای هر نقطه عمقی، یکی از روابط ارائه شده در این جدول برای تعیین بیشینه وزن گل بکار می‌رود.

برای تعیین حداکثر وزن گل نیز مطابق فرآیند قبلی عمل می‌شود با این تفاوت که حداکثر وزن گل موجب ایجاد شکست کششی در راستای عمود بر تنش افقی کمینه می‌شود. بنابراین مقادیر کمینه و بیشینه تنش‌های القایی در این راستا تعیین و

جدول ۵. روابط تعیین مقدار وزن گل بیشینه برای حفظ پایداری دیواره چاه براساس معیار موهر-کلمب (Al-Ajmi and

(Zimmerman, 2006)

Minimum required mud pressure	Different states of induced stresses
$P_{W(Frac)} = \sigma_c + NB$	$\sigma_r \leq \sigma_\theta \leq \sigma_z$
$P_{W(Frac)} = \frac{\sigma_c + NA}{1 + N}$	$\sigma_r \leq \sigma_z \leq \sigma_\theta$
$P_{W(Frac)} = \frac{\sigma_c - B}{N} + A$	$\sigma_z \leq \sigma_r \leq \sigma_\theta$
$A = 3\sigma_h - \sigma_H, B = \sigma_V - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h), N = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)$	

۲-۴-۴. معیار هوک- براون

آزمایشگاهی، رابطه (۲۵) را براساس تنش‌های کمینه و بیشینه ارائه دادند.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left( m \left( \frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right) + s \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

معیار شکست تجربی هوک- براون در دهه ۱۹۸۰ برای تخمین مقاومت سنگ بکر و توده سنگ ارائه شد (Brown and Hoek, 1980). این معیار تجربی از مقاومت تک محوری سنگ بکر به عنوان پارامتر مقیاس بهره می‌برد و دو پارامتر مقاومتی بی‌بعد را با نام m و s معرفی می‌کند. این دو پارامتر براساس نوع سنگ تعیین می‌شوند. در جدول (۶) مقادیر پیشنهادی برای پارامتر m ارائه شده است. با بکارگیری این دو پارامتر، هوک و براون پس از مطالعات گسترده روی داده‌های

جدول ۶. مقادیر پیشنهادی پارامتر  $m$  برای انواع سنگ‌ها (Hoek et al., 1995; Al-Ajmi and Zimmerman, 2006)

Value of parameter $m$	Type of Rock
5-8	Carbonate rocks, including dolomite, limestone, and marble
4-10	Argillaceous rocks, such as mudstone, shale, slate, and siltstone
15-24	Crystalline sandstones with good interlocking and weak cleavage planes, such as sandstone and quartzite
16-19	Fine-grained crystalline igneous rocks with multiple mineral types, such as andesite, dolerite, diabase, and rhyolite
22-33	Coarse-grained metamorphic and igneous rocks with multiple mineral types (e.g., amphibolite, gabbro, gneiss, granite, norite, and quartz diorite)

در اینجا نیز براساس مقادیر کمینه و بیشینه تنش‌های القایی در راستای تنش افقی حداقل و بیشینه به تعیین حد پایین و بالای وزن ایمن گل پرداخته می‌شود. بر این اساس از روابط ارائه شده در جدول (۷) برای تعیین حداقل وزن گل و از روابط ارائه شده در جدول (۸) برای تعیین حداکثر وزن گل استفاده می‌شود.

جدول ۷. روابط تعیین مقدار وزن گل کمینه براساس معیار هوک-براون (Gholami et al., 2014)

Minimum required mud pressure	Different states of induced stresses
$P_{W(BO)} = \frac{(2D + p) - \sqrt{(2E + p)^2 - 4E^2 + q}}{2}$	$\sigma_r \leq \sigma_\theta \leq \sigma_z$
$P_{W(BO)} = \frac{(4D + p) - \sqrt{(4D + p)^2 + 16q - 16D^2}}{8}$	$\sigma_r \leq \sigma_z \leq \sigma_\theta$
$P_{W(BO)} = \frac{2(D - E) - \sqrt{4(D - E)^2 - 4(D - E - pE - q)}}{2}$	$\sigma_z \leq \sigma_r \leq \sigma_\theta$
$D = 3\sigma_H - \sigma_h, E = \sigma_V + 2\nu(\sigma_H - \sigma_h), p = m\sigma_c, q = \sigma_c^2$	

جدول ۸. روابط تعیین مقدار وزن گل بیشینه براساس معیار هوک-براون (Gholami et al., 2014)

Minimum required mud pressure	Different states of induced stresses
$P_{W(Frac)} = \frac{2B + \sqrt{2B^2 - 4(B^2 - pB + q)}}{2}$	$\sigma_r \leq \sigma_\theta \leq \sigma_z$
$P_{W(Frac)} = \frac{(4A - p) + \sqrt{(4A - p)^2 - 16(A^2 - pA - q)}}{8}$	$\sigma_r \leq \sigma_z \leq \sigma_\theta$
$P_{W(Frac)} = \frac{2(A - B) - \sqrt{(2(B - A) + p)^2 - 4((B - A)^2 - pA - q)}}{2}$	$\sigma_z \leq \sigma_r \leq \sigma_\theta$
$A = 3\sigma_h - \sigma_H, B = \sigma_V - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h), p = m\sigma_c, q = \sigma_c^2$	

### ۴-۲-۴. معیار شکست موگی-کلمب

است و شکست در امتداد جهت  $\sigma_2$  رخ خواهد داد. لذا موگی بر اساس مشاهدات خود به معیاری دست یافت که تاثیر تنش اصلی میانی را لحاظ می‌کند (Al-Ajmi and Zimmerman, 2006). جدول ۹، فشار بهینه گل حفاری وابسته به معیار موگی - کلمب را نشان می‌دهد.

از طرف دیگر، معیارهای شکست سه بعدی سنگ به منظور در نظر گرفتن تأثیر تنش میانه بر مقاومت سنگ توسعه داده شده‌اند. موگی (۱۹۷۱) مطالعات آزمایشگاهی متعددی بر روی انواع مختلف سنگ‌ها با استفاده از تست‌های تراکمی سه محوری انجام داد. از نتایج پژوهش ایشان این بود که مقاومت سنگ به طور قابل توجهی تحت تاثیر مقدار تنش اصلی میانی

**جدول ۹. فشار پایین گل با استفاده از معیار موگی - کلمب ( Al-Ajmi and Zimmerman, 2006 )**

Optimal mud pressure related to breakout	State of principal stresses
	$(\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3)$
$P_{wB1} = \frac{1}{6-2b'^2} [(3A + 2b'K) - \sqrt{H + 12(K^2 + b'AK)}]$	$(\sigma_z \geq \sigma_0 \geq \sigma_r)$
$P_{wB2} = \frac{1}{2}A - \frac{1}{6}[12[a' + b'(A - 2P_p)]^2 - 3(A - 2B)^2]$	$(\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r)$
$P_{wB1} = \frac{1}{6-2b'^2} [(3A + 2b'G) - \sqrt{H + 12(G^2 - b'AG)}]$	$(\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z)$

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

$$G = K + b'A$$

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

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

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

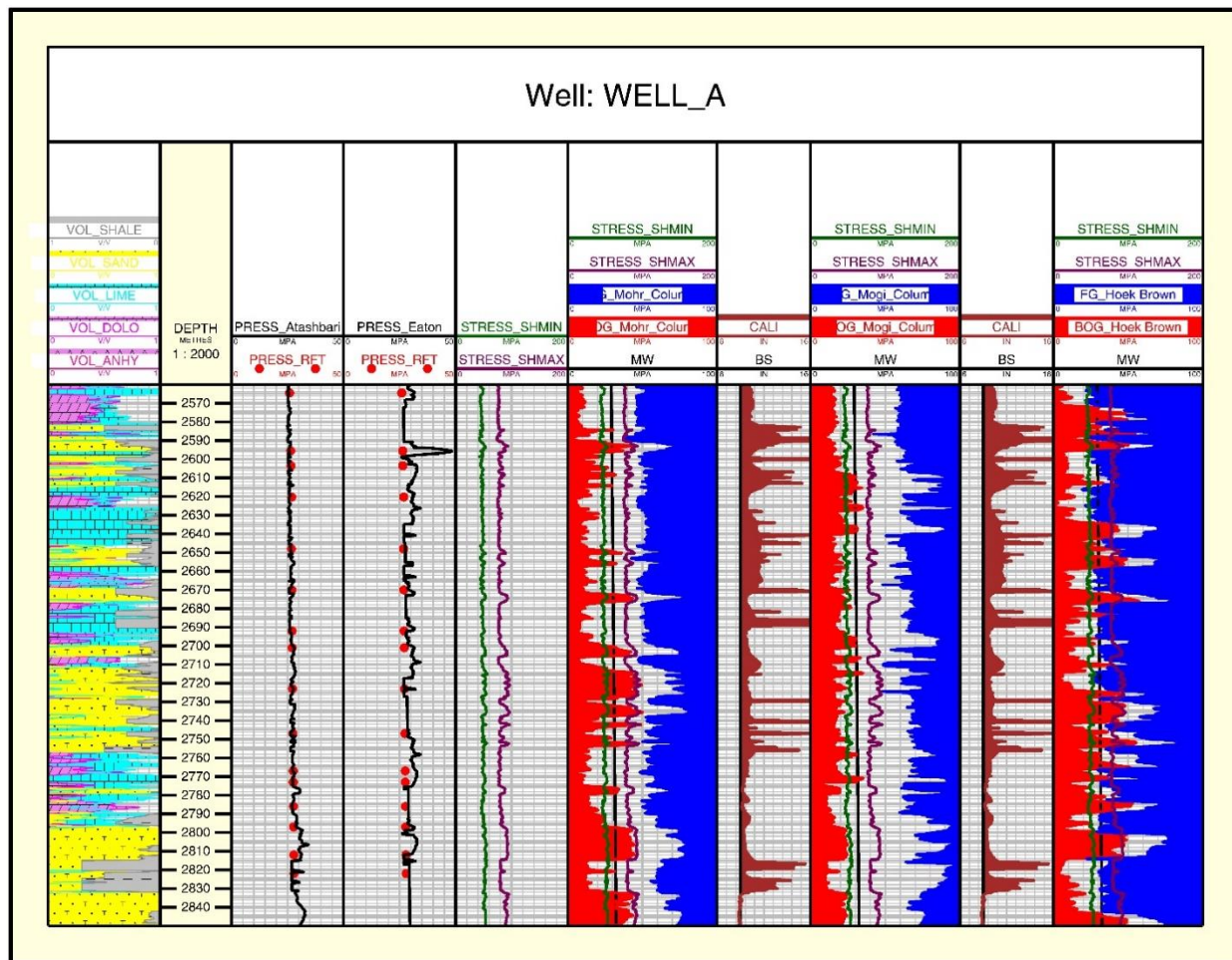
$$B = \sigma_v + 2v(\sigma_H - \sigma_h)$$

$$b' = \sin \varphi$$

RFT، ستون چهارم فشار منفذی محاسبه شده از روش ایتون در مقابل آزمون فشار منفذی RFT، ستون پنجم تنش‌های افقی حداقل و حداکثر و معیار شکست محاسبه شده از روش موهر - کلمب، ستون ششم نمودارهای قطرسنجی، ستون هفتم معیار شکست محاسبه شده از روش موگی - کلمب، ستون هشتم نمودارهای قطرسنجی و ستون نهم نشان دهنده معیار شکست محاسبه شده از روش هوک - براون می‌باشد.

در جدول مذکور  $P_{wb}$  فشار پایین گل،  $b'$ ،  $a'$ ،  $H$ ،  $G$ ،  $K$ ،  $B$  و  $A$  ثابت‌های معادله،  $\sigma_H$  تنش افقی حداکثر تنش افقی حداقل،  $v$  ضریب پواسون،  $\sigma_H$  تنش قائم است ( Al-Ajmi and Zimmerman, 2006 ).

در شکل ۴ مدل ژئومکانیکی یک بعدی چاه مورد مطالعه نشان داده شده است. در شکل مذکور بترتیب از چپ به راست ستون اول ستون لیتولوژی را نشان داده، ستون دوم مربوط به عمق حفاری، ستون سوم محاسبه فشار منفذی از روش تراکم‌پذیری یا آتشیاری در مقابل آزمون فشار منفذی



شکل ۴. مدل ژئومکانیکی یک بعدی چاه مورد مطالعه. نمودارها از چپ به راست: ستون لیتولوژی، عمق حفاری، محاسبه فشار منفذی از روش تراکم‌پذیری یا آتشیاری در مقابل آزمون فشار منفذی RFT، فشار منفذی محاسبه شده از روش ایتون در مقابل آزمون فشار منفذی RFT، تنش‌های افقی حداقل و حداکثر و معیار شکست محاسبه شده از روش موهر-کلمب، نمودارهای قطرسنجی، معیار شکست محاسبه شده از روش موگی-کلمب، معیار شکست محاسبه شده از روش هوک-براون.

## ۵. نتیجه گیری

با توجه به اهمیت علم ژئومکانیک و پتروفیزیک مخزن در صنعت نفت و گاز، در این پژوهش به بررسی جامع آنالیز پایداری دیواره چاه با تکیه بر ترکیب مطالعات ژئومکانیکی - پتروفیزیکی از طریق ساخت مدل یک بعدی ژئومکانیکی چاه با رویکرد مقایسه انواع روش‌های مختلف محاسبه معیارهای شکست سنگ و پارامتر فشار منفذی پرداخته شده است. در مرحله اول، پارامترهای الاستیک و مقاومتی سازند و مقادیر تنش‌ها بر اساس روابط پروالاستیک محاسبه گردید. بدین منظور؛ از ترکیب نمودار سرعت موج برشی (DTS) و سرعت موج فشارشی (DTC) با نمودار چگالی (RHOB) ثابت‌های الاستیک سنگ مخزن به دست آمد و در ادامه مقاومت فشاری تک محوری (UCS)، مقاومت کششی (T) و زاویه اصطکاک داخلی سنگ ( $\phi$ ) نیز مورد محاسبه قرار گرفت. سپس فشار منفذی از دو روش تراکم-پذیری یا آتشیاری و ایتون محاسبه و با داده‌های آزمون RFT مقایسه گردید. منحنی مقادیر تخمینی فشار منفذی با روش تراکم‌پذیری یا آتشیاری به خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده همخوانی دارد. از طرفی مشاهده می‌شود که منحنی حاصل از روش ایتون نوسانات زیادی در محدوده مورد مطالعه از این چاه نشان می‌دهد که در مقایسه با روند تغییرات مقادیر اندازه‌گیری شده، که خطی به نظر می‌رسد، غیرمنطقی جلوه می‌کند. بنابراین روش تراکم‌پذیری یا آتشیاری در مناطق

مشابه برای تخمین فشار منفذی پیشنهاد می‌گردد. عامل کلیدی در دقت روش مذکور چگونگی تعیین ضریب مربوط به تراکم‌پذیری منافذ ( $C_p$ ) است. برای تعیین این پارامتر معمولاً از نتایج آزمایشگاهی استفاده می‌شود و مقدار آن وابستگی شدیدی به مقادیر تخلخل سنگ دارد و آن را می‌توان با دقت خوبی از تخلخل سنگ به کمک روابطی برآورد نمود. در ادامه با مقایسه معیارهای شکست استفاده شده، مشخص شد که معیارهای موهر-کلمب نتایج بهتر و دقیق‌تری به نسبت معیارهای هوک-براون و موگی-کلمب را برای بازه فشار گل بهینه ارائه می‌دهد. زیرا با توجه به ریزش‌های شناسایی شده از نمودارهای قطرسنجی مشخص شد که سازند مورد مطالعه دارای فواصل ریزشی زیادی است و شرایط پایداری ندارد. بر اساس شکل ۴ محدوده پیشبینی شده توسط معیار موهر-کلمب، غالباً در محدوده ریزشی قرار دارد، در حالی که دو معیار دیگر وضعیت چاه را با این دقت نشان نمی‌دهند. لذا نتیجه می‌شود که معیار شکست موهر-کلمب تخمین دقیق‌تری از پنجره ایمن وزن گل ارائه نموده است. رژیم تنش در ناحیه مورد مطالعه امتداد لغز بوده که با نقشه تنش و گزارشات زمین شناسی میدان مطابقت دارد.

## منابع

- جهان محمدی، ح.، مصدق، ح.، عزیززاده، م.، سرخیل، ح.، محمدنیا، م.، ۱۴۰۲. تعیین پنجره ایمن وزن گل و مسیر بهینه حفاری سازند گدوان با استفاده از معیارهای شکست سنگ در یکی از میداین هیدروکربونی جنوب غرب ایران، *نشریه علمی ژئومکانیک نفت*، صفحه ۶۱ تا ۸۰.
- خامه چی، ا.، عباسی، ام.، ۱۴۰۱. مدلسازی ژئومکانیکی یک بعدی و بررسی ایجاد شکاف هیدرولیکی در یکی از چاه‌های سراجیه جهت بهبود تولید (مطالعه موردی)، *چهارمین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت نوآوری و فناوری*، تهران.
- صارم، م.، و ابراهیم‌آبادی، آ.، ۱۴۰۱. طراحی ژئومکانیکی میدان نفتی شادگان به منظور مدلسازی و برنامه‌ریزی چاه‌های ERD در سازندهای بنگستان، *نشریه علمی ژئومکانیک نفت*.
- سعادت نیا، ن.، شرقی، ی.، مقدسی، ج.، عزتی، م.، ۱۴۰۱. مدلسازی ژئومکانیکی و بررسی یکپارچگی پوش سنگ برای یکی از میدان‌های بزرگ کربناته جنوب غربی ایران، *نشریه علمی ژئومکانیک نفت*.
- سیدسجادی، ش.، عقیقی، م.، ۱۳۹۳. ساخت و تحلیل مدل ژئومکانیکی مخزن بنگستان در میدان کویال، *نشریه مهندسی معدن*، صفحه ۲۱ تا ۳۴.
- قالیباف محمدآبادی، ح.، حافظی مقدس، ن.، لشکری پور، ع.، غلامی، ر.، طالبی، ح.، ۱۴۰۱. تخمین پارامترهای ژئومکانیکی، تجزیه و تحلیل تنش‌های برجا، و تعیین پنجره وزن بهینه گل با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، *نشریه علمی ژئومکانیک نفت*، صفحه ۱ تا ۲۸.
- Almasi, A. and Mohsenipour, A., 2022. Determining the mud window, geomechanical model (MEM), and well wall stability analysis, using analytical and numerical methods in one of the wells in Iran's southwest fields. *Advanced Applied Geology*, 12(1), pp.1-11
- Alkamil, E.H., Abbood, H.R., Flori, R.E. and Eckert, A., 2018. Case study of wellbore stability evaluation for the Mishrif Formation, Iraq. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 164, pp.663-674.
- Atashbari, V. and Tingay, M., 2012, April. Pore pressure prediction in carbonate reservoirs. In *SPE Latin America and Caribbean petroleum engineering conference* (pp. SPE-150835). SPE.
- Abalioglu, I., Legarre, H., Garland, C., Sallier, B., Gao, J., van Galen, M., Chou, Q., Neil, B., Soroush, H., Qutob, H. and Mahli, Z., 2011, September. The Role of Geomechanics in Diagnosing Drilling Hazards and Providing Solutions to the Northern Iraq Fields. In *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference* (pp. SPE-142022). SPE.
- Ammarloo, H., Zoughy, P., Mehraban, L. F., & Amiri, M. (2025). Evaluation of empirical relationships in carbonates by developing a 1D mechanical earth model in an oil field in Southwestern Iran. *Results in Engineering*, 26, 104799.
- Al-Qahtani, M.Y. and Zillur, R., 2001, March. A mathematical algorithm for modeling geomechanical rock properties of the Khuff and Pre-Khuff reservoirs in Ghawar field. In *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference* (pp. SPE-68194). SPE
- Al-Ajmi, A.M. and 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), pp.1200-1211.
- Azim, S.A., Mukherjee, P., Al-Anezi, S.A., Al-Otaibi, B., Al-Saad, B., Perumalla, S., Araujo, E. and Babbington, J.F., 2011, October. Using Integrated Geomechanical Study To Resolve Expensive Wellbore Instability Problems While Drilling Through Zubair Shale/Sand Sequence of Kuwait: A Case Study. In *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition* (pp. SPE-148049). SPE.
- Bowers, G.L. (1995). Pore pressure estimation from velocity data: accounting for over pressure mechanisms besides under compaction, *SPE Drill & Compl* 10 (02): 89-95, doi.org/10.2118/27488-PA.
- Brown, E.T. and Hoek, E., 1980. *Underground excavations in rock*. CRC Press.
- Eaton, B.A., 1969. Fracture gradient prediction and its application in oilfield operations. *Journal of petroleum technology*, 21(10), pp.1353-1360.
- Eaton, B.A., 1976. Graphical method predicts geopressures worldwide. *World Oil*; (United States), 183(1).
- Fischer, K. and Henk, A., 2013. A workflow for building and calibrating 3-D geomechanical models &ndash a case study for a gas reservoir in the North German Basin. *Solid Earth*, 4(2), pp.347-355.
- Gholami, R., Moradzadeh, A., Rasouli, V., Hanachi, J., 2014. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* Practical application of failure criteria in determining safe mud weight windows in drilling operations. *Rock Mech. Geotech. Eng.* 6, 13-25.

- Herwanger, J., 2014, April. Seismic geomechanics: how to build and calibrate geomechanical models using 3D and 4D seismic data. In fourth EAGE CO2 geological storage workshop (pp. cp-439). European Association of Geoscientists & Engineers.
- Hoek, E., Brown, E.T., 1988. The Hoek-Brown failure criterion—a 1988 update. In: Proceedings of the 15th Canadian Rock Mechanics Symposium. Toronto, Canada: Proc. 15th Can. Rock Mech. Symp, University of Toronto, pp. 31–38.
- James, G.A. and Wynd, J.G., 1965. Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area. AAPG bulletin, 49(12), pp.2182-2245.
- Kolawole, O., Federer-Kovács, G. and Szabó, I., 2018, June. Formation susceptibility to wellbore instability and sand production in the Pannonian Basin, Hungary. In ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium (pp. ARMA-2018). ARMA.
- Motiei, E. 1993. "Geology of Iran, Zagros stratigraphy", Tehran, Geological Survey, First Edition.
- Mansourizadeh, M., Jamshidian, M., Bazargan, P. and Mohammadzadeh, O., 2016. Wellbore stability analysis and breakout pressure prediction in vertical and deviated boreholes using failure criteria—A case study. Journal of Petroleum Science and Engineering, 145, pp.482-492.
- Mohiuddin, M.A., Awal, M.R., Abdulraheem, A. and Khan, K., 2001, March. A new diagnostic approach to identify the causes of borehole instability problems in an offshore Arabian field. In SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference (pp. SPE-68095). SPE
- Radwan, A.E., Abdelghany, W.K. and Elkhawaga, M.A., 2021. Present-day in-situ stresses in Southern Gulf of Suez, Egypt: Insights for stress rotation in an extensional rift basin. Journal of Structural Geology, 147, p.104334.
- Ramjohn, R., Gan, T. and Sarfare, M., 2018, June. 3D Geomechanical Modeling for Wellbore Stability Analysis: Starfish, ECMA, Trinidad and Tobago. In SPE Trinidad and Tobago Section Energy Resources Conference? (p. D031S027R002). SPE.
- Zoback, M.D., Moos, D., Mastin, L. and Anderson, R.N., 1985. Well bore breakouts and in situ stress. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 90(B7), pp.5523-5530.